

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

МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ ТА УПРАВЛІННЯ

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

3(60)



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О.І. – К. :
Видавничий дім «Гельветика», 2025. – № 3(60). – 204 с.

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

Заступник головного редактора: Нагорнева Н.А.

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

Відповідальний редактор: Сікачина В.Г.

Редакційна колегія:

Єрмаков В.М., доктор технічних наук

Івашенко Т.Г., кандидат технічних наук

Коніщук В.В., доктор біологічних наук

Лукаш О.В., доктор біологічних наук

Машков В.А., доктор технічних наук

Нецветов М.В., доктор біологічних наук

Ольшевський С.В., доктор технічних наук

Риженко Н.О., доктор біологічних наук

Улицький О.А., доктор геологічних наук

Шматков Г.Г., доктор біологічних 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 – Державний заклад «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління» (вул. Митрополита Василя Липківського, буд. 35, м. Київ, 03035, dei2005@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 (Г2 – 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

ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ.....	7
Bondar O.I., Kuryliuk O.M., Fylypchuk V.L. New “green” water purification technologies: combined filtration systems using higher aquatic plants with deep electrochemical purification and oxidation with chlorine dioxide	7
Івусь Т.І., Карпенко Ю.О. Флористична та фітоценотична структура водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни в межах Чернігівського Полісся.....	15
Поліщук М.М., Ролік О.І. Моделювання процесу забору проб води для екологічного моніторингу водою.....	19
Шахман І.О., Бистрянцева А.М., Чвартковська А.О. Актуальна динаміка показників якості води річки Дніпро в межах Черкаської області.....	26
ЕКОЛОГІЯ І ВИРОБНИЦТВО.....	31
Герасимчук Л.О., Кириленко Н.П., Валерко Р. А., Пацева І.Г. Екологічні ризики та їх оцінювання в контексті сталого розвитку видобувних підприємств	31
Григор’єва Л.І., Григор’єв К.В. Ефективна доза іонізуючого випромінювання від викидів ¹³¹ I з АЕС.....	37
Кожемякін Г.Б. Конструктивні параметри форсунок зі співударними струменями для мокрого очищення газів.....	41
Халмурадов Б.Д., Пронь О.В. Особливості створення математичної моделі для оптимального вибору електрогенераторів з урахуванням екологічної складової.....	44
Yakymenko I., Bubliko N., Salavor O., Nychuk O., Shapovalov Ye., Henshel D. Energy security and renewable energy potential of the EU and Ukraine in terms of the Russia’s aggression.....	51
ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ.....	56
Герасимчук О.Л., Шевчук Л.М., Васільєва Л.А., Кагукіна А.М. Сучасні підходи до управління та відновлення деградованих земель через інноваційні інструменти землеустрою.....	56
Sopova N.V. Land use structure in Cherkasy region: formation, current state, dynamics.....	61
ЕКОЛОГІЯ І РОСЛИННИЦТВО.....	67
Пикало С.В., Юрченко Т.В., Харченко М.В., Волощук Г.Д., Пірич А.В. Спосіб стерилізації незрілих зернівок пшениці та тритикале для введення <i>in vitro</i> з подальшим доббором на стресостійкість.....	67
ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ.....	71
Хрутьба В.О., Кобзиста О.П., Лисак Р.С., Хрутьба Ю.С., Борятинський М.Ю., Бельмега І.В. План відновлення України як інструмент екологічної трансформації післявоєнної реконструкції.....	71
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ.....	77
Ломакіна О.С., Телюра Н.О. Аналіз систем державного та громадського моніторингу атмосферного повітря в м. Харків та Харківській області	77
Шумик М.І., Попіль Н.І., Бойко Р.В. Методичні та практичні аспекти моніторингу життєвого стану рослин в урбанізованих екосистемах.....	83
ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ.....	88
Оліненченко Ю.О. Енергоефективність закладів охорони здоров’я як чинник зменшення вуглецевого сліду.....	88
ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ.....	93
Барабаш О.В., Тарасюк М.В. Технології захисту навколишнього середовища для управління біорізноманіттям лісових екосистем національного природного парку «Синьгора»	93
Бігун М.В. Ландшафтно-геоморфологічні зміни в Карпатах під впливом екстремальних погодних умов: просторовий аналіз активізації зсувних процесів (2010-2023 pp).....	98
Білецький О.О., Петрученко А.О. Енергетичні процеси в навантаженні при роботі від комбінованого джерела живлення з суперконденсатором і акумуляторною батареєю.....	104

Воронова Н.В., Горбань В.В., Литвиненко А.В., Височін Д.В. YOLO-базована автоматична ідентифікація рогів оленів для оцінки стану популяцій.....	109
Іваненко М.К., Притула Н.М. Дослідження Великого Лугу як моделі давньої екосистеми.....	116
Кононенко Р.О., Пацюк М.К. Лікарські рослини (Rosaceae, Asteraceae, Fabaceae, Apiaceae) околиць м. Житомира. .	120
Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Краснов В.П., Можарівська І.А., Іванюк Р.О., Весельський О.О. Екологічна безпека лісових екосистем в умовах невизначеності.....	124
Подзерей Р.В. Сучасні технології захисту агроландшафтів Черкаської області.....	133
Руденко С.В., Руденко В.П. Потенціал лісостепових екосистем у біомі Східно-Європейської рівнини України.....	138
Солошенко В.С. Екологічні особливості видів роду <i>Ribes</i> L. у Правобережному Лісостепу України	143
Суслова О.П. Посухостійкість деревних рослин в паркових насадженнях промислових міст степової зони України.....	147
ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИЙ ФОНД УКРАЇНИ.....	153
Лялюк-Вітер Г.Д. Дослідження мережі природно-заповідного фонду в Івано-Франківській області.....	153
УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ.....	158
Бондар О.Б., Погорєлова О.М., Котляренко Л.Т., Галаган О.К. Аналіз стану управління відходами в Тернопільській області: проблеми та перспективи.....	158
Ілляш О.Е., Ганошенко Г.В. Аналіз сучасних практик поводження з побутовими відходами: європейський досвід менеджменту існуючих звалищ.....	162
Нонік Л.Ю., Пацева І.Г. Небезпечні компоненти відходів руйнацій як виклик екологічній безпеці.....	168
Полушкін Т.І., Сафранов Т.А. Можливості використання окремих видів відходів пластикових матеріалів у регіонах України.....	173
Хандогіна О.В., Дрозд О.М., Завражний А. О., Хорошилов А.В., Сталінська І.В. Оцінювання залишкових ризиків рекультивованих полігонів побутових відходів під впливом зміни клімату.....	178
ЗМІНА КЛІМАТУ.....	187
Гуреля І.В., Василенко О.В. Оцінка впливу наслідків змін клімату на вразливість основних водокористувачів міста.....	187
Карпенко Ю.О., Аравін П.А., Свердлов В.О., Потоцька С.О. Реалізація основних засад концепції озеленення міста Чернігова в умовах зміни клімату.....	192
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	199

CONTENTS

ECOLOGY OF WATER RESOURCES.....	7
Bondar O., Kuryliuk O., Fylypchuk V. New “green” water purification technologies: combined filtration systems using higher aquatic plants with deep electrochemical purification and oxidation with chlorine dioxide	7
Ivus T., Karpenko Yu. Floristic and phytocenotic structure of aquatic and coastal-aquatic ecosystems of small rivers lower town of Desna within the borders of Chernihiv Polissia.....	15
Polishchuk M., Rolik O. Modeling the process of water sampling for ecological monitoring of water bodies.....	19
Shakhman I., Bystriantseva A., Chvartkovska A. Contemporary Dynamics of Water Quality Indicators of the Dnipro River within the Cherkasky Region.....	26
ECOLOGY AND PRODUCTION.....	31
Herasymchuk L., Kyrylenko N., Valerko R., Patseva I. Environmental risks and their assessment in the context of sustainable development of mining enterprises.....	31
Grygorieva L., Grygoriev K. Effective dose of ionizing radiation from ¹³¹ I releases from NPPs.....	37
Kozhemiakin G. Design parameters of nozzles with impact jets for wet gas purification.....	41
Khalmuradov B., Pron O. Features of creating a mathematical model for the optimal selection of electric generators taking into account the environmental component.....	44
Yakymenko I., Bubliencko N., Salavor O., Nychyk O., Shapovalov Ye., Henshel D. Energy security and renewable energy potential of the EU and Ukraine in terms of the Russia’s aggression.....	51
ECOLOGY OF LAND RESOURCES.....	56
Herasymchuk O., Shevchuk L., Vasilieva L., Kagukina A. Modern approaches to the management and restoration of degraded lands through innovative land management tools.....	56
Sopova N.V. Land use structure in Cherkasy region: formation, current state, dynamics.....	61
ECOLOGY AND CROP PRODUCTION.....	67
Pykalo S., Yurchenko T., Kharchenko M., Voloshchuk H., Pirykh A. Method for sterilization of immature wheat and triticale kernels for <i>in vitro</i> culture followed by selection for stress tolerance.....	67
ENVIRONMENTAL IMPLICATION OF MILITARY ACTIONS.....	71
Khrutba V., Kobzista O., Lysak R., Khrutba Yu., Boryatynskyi M., Belmega I. Ukraine Recovery Plan as a tool of ecological transformation of post-war reconstruction.....	71
ENVIRONMENTAL MONITORING.....	77
Lomakina O., Teliura N. Analysis of state and public air monitoring systems the city of Kharkiv and Kharkiv region.....	77
Shumik M., Popil N., Boyko R. Methodological and practical aspects of monitoring the vital state of plants in urbanized ecosystems.....	83
GENERAL ENVIRONMENTAL SAFETY ISSUES.....	88
Olinechenko Yu. Energy efficiency of healthcare institutions as a factor for changing the carbon footprint.....	88
PRESERVATION OF BIOLOGICAL AND LANDSCAPE DIVERSITY.....	93
Barabash O., Tarasuik M. Environmental protection technologies for biodiversity management of forest ecosystems of the Syniohora National Nature Park.....	93
Bihun M. Landscape and geomorphological changes in the Carpathians under the influence of extreme weather conditions: spatial analysis of landslide activation (2010–2023).....	98
Biletskyi O., Zaluskyi D. Energy processes in load when operating from a combined power source with a supercapacitor and a battery.....	104

Voronova N., Gorban V., Lytvynenko A., Vysochin D. YOLO-Based Automatic Deer Antler Identification for Population Assessment.....	109
Ivanenko M., Prytula N. Biodiversity of the flora of the Great Meadow prior to the construction of the Kakhovka hydroelectric station.....	116
Kononenko R., Patsyuk M. Medicinal plants (Rosaceae, Asteraceae, Fabaceae, Apiaceae) in the vicinity of Zhytomyr city....	120
Melnyk-Shamrai V., Shamrai V., Krasnov V., Mozharivska I., Ivaniuk R., Veselskyi O. Environmental safety of forest ecosystems in the minds of investigation.....	124
Podzerei R. Modern technologies for the protection of agricultural landscapes in Cherkasy region.....	133
Rudenko S., Rudenko V. Potential of forest-steppe ecosystems in the biome of the east-european plain within Ukraine....	138
Soloshenko V. Ecological features of species of the genus <i>Ribes L.</i> in the right-bank forest-steppe of Ukraine.....	143
Suslova O. Drought tolerance of woody plants in park plantations of industrial cities of the steppe zone of Ukraine.....	147
NATURE RESERVE FUND OF UKRAINE	153
Lialiuik-Viter H. Research on the network of natural reserve fund in Ivano-Frankivsk region.....	153
WASTE MANAGEMENT	158
Bondar O., Pohorielova O., Kotlyarenko L., Halahan O. Analysis of waste management status in Ternopil region: problems and prospects.....	158
Illiash O., Hanoshenko H. Analysis of Modern Practices in Municipal Waste Management: European Experience in Landfill Governance.....	162
Nonik L., Patseva I. Hazardous components of destruction waste as a challenge to environmental safety.....	168
Polushkin T., Safranov T. Possibilities of Using Certain Types of Plastic Waste in the Regions of Ukraine.....	173
Khandogina O., Drozd O., Zavrzhnyi A., Khoroshylov A., Stalinska I. Assessment of residual risks of reclaimed landfill sites for household waste under the influence of climate change.....	178
CLIMATE CHANGE	187
Hurelya I., Vasylenko O. Assessment of climate change impacts on vulnerability of urban water users.....	187
Karpenko Yu., Aravin P., Sverdlov V., Pototska S. Implementation of the basic principles of the greening concept of the city of Chernigiv in the conditions of climate change	192
AUTHORS' CREDENTIALS	199

UDC 628.1; 628.3

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.1>

NEW “GREEN” WATER PURIFICATION TECHNOLOGIES: COMBINED FILTRATION SYSTEMS USING HIGHER AQUATIC PLANTS WITH DEEP ELECTROCHEMICAL PURIFICATION AND OXIDATION WITH CHLORINE DIOXIDE

Bondar O.I.¹, Kuryliuk O.M.², Fylypchuk V.L.²

¹ State Ecological Academy of Postgraduate Education
and Administration of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine
Metropolitan Vasyl Lypkivskyi str., 35, bldg. 2, 03035, Kyiv

² National University of Water and Environmental Engineering
Soborna St., 11, 33028, Rivne
dei2005@ukr.net, o.m.kurylyuk@nuwm.edu.ua

This study presents an innovative «green» water purification technology that combines electrochemical oxidation and biological treatment methods for the effective removal of contaminants and water disinfection. A key feature of the system is the autonomous synthesis of chlorine dioxide using a diaphragm electrolyzer. Chlorine dioxide acts as a powerful oxidizing agent capable of neutralizing a wide range of pathogenic microorganisms without generating harmful by-products, which is a major limitation of traditional chlorination processes. The proposed system also incorporates higher aquatic plants for the phytoremediation of nitrogenous compounds, phosphorus, and other complex pollutants, providing a natural and sustainable approach to water treatment.

The integrated modular system includes multiple purification stages: preliminary mechanical filtration, filtration through the rhizomes of higher aquatic plants, electrochemical treatment, and a final stage of bioengineered phytodesalination. The hydroponic bioplateau filter not only purifies water but also ensures its ongoing regeneration and partial desalination by absorbing excess minerals. The entire process is autonomous, does not require chemical reagents, and is powered by renewable natural resources and solar energy.

Field experiments confirm the system's efficiency, demonstrating up to 67% reduction in salt content and complete microbial disinfection of brackish water with a salinity of 2.5–3.5 g/dm³. These results highlight the high potential of the proposed technology for decentralized, environmentally safe, and sustainable water purification in various settings, including remote or ecologically sensitive areas. The technology represents a promising direction in the development of low-impact, energy-efficient, and reagent-free water treatment systems. *Key words:* chlorine dioxide, disinfection, «green» technology, water purification by photosynthesis, electrochemical treatment, phyto-desalination, bioplateau-filter.

Нові «зелені» технології очищення води: комбіновані системи фільтрації з використанням вищих водних рослин з глибоким електрохімічним очищенням та окисленням діоксидом хлору. Бондар О.І., Курилюк О.М., Филипчук В.Л.

У статті представлено інноваційну «зелену» технологію очищення води, що поєднує електрохімічне окиснення та біологічну обробку для ефективного видалення забруднень та знезараження води. Основою системи є автономний синтез діоксиду хлору за допомогою діафрагмового електролізера. Діоксид хлору виступає як потужний окисник, здатний нейтралізувати широкий спектр патогенних мікроорганізмів без утворення токсичних побічних продуктів, що є суттєвою перевагою порівняно з традиційним хлоруванням. Додатково у системі використовуються вищі водяні рослини для фітореMediaції сполук азоту, фосфору та інших складних забруднювачів, забезпечуючи природний та сталий підхід до очищення води.

Інтегрована модульна система включає кілька етапів очищення: попередню механічну фільтрацію, фільтрацію через кореневища вищих водяних рослин, електрохімічну обробку та завершальний етап фітодесалінації. Гідропонний біоплато-фільтр не лише очищує воду, а й забезпечує її постійне оновлення та часткове знесолення шляхом поглинання надлишкових мінералів. Весь процес є автономним, не потребує використання хімічних реагентів і функціонує за рахунок відновлюваних природних ресурсів та сонячної енергії.

Польові експерименти підтвердили ефективність технології: досягнуто до 67 % зменшення мінералізації та повне знезараження слабомінералізованої води з солоністю 2,5–3,5 г/дм³. Отримані результати демонструють високий потенціал запропонованої системи для децентралізованого, екологічно безпечного та сталого очищення води в різних умовах, зокрема в екологічно вразливих або віддалених районах. Технологія відкриває перспективи для створення енергоефективних, безреагентних систем водоочищення нового покоління і, безумовно, стане ефективним засобом на шляху поліпшення якості води в діяльності водного господарського комплексу країни. *Ключові слова:* діоксид хлору, знезараження, «зелена» технологія, очищення води за допомогою фотосинтезу, електрохімічна обробка, фітодесалінація, біоплато-фільтр.

The provision of high-quality drinking water from spring and surface sources represents a key challenge in modern water engineering, particularly under conditions of heavy pollution and heightened environmental risk. The urgency of this issue increases in areas with limited infrastructure, necessitating the use of compact, autonomous, and energy-efficient water treatment technologies [1].

A major issue in advanced treatment of natural water is the presence of persistent pollutants, including petroleum residues, nitrogen-based biogenic compounds (ammonium, nitrites), mineralized organic substances, surfactants, and microbiological contaminants. In response to these challenges, a novel water purification technology has been developed and tested, based on a modular block principle integrating filtration, electrochemical, and physicochemical processes. The system implements a multistage water treatment sequence including coagulation, oxidation, ion exchange, electrolysis, electrochemical synthesis of chlorine dioxide, and sorption using activated clinoptilolite.

A key component of the system is an autonomous electromagnetic vortex-layer apparatus (AVLA), integrated into the inlet water line. This device activates the water stream by rotating ferromagnetic elements in a magnetic field, inducing cavitation effects, elevated temperature, and increased oxidation-reduction potential (ORP). These effects promote the breakdown of organic structures, oxidation of complex impurities, and enhancement of subsequent treatment stages such as coagulation, sorption, and filtration.

The filtration module is equipped with a rotatable housing that allows for rapid discharge of spent media. Inside the housing, a composite filtration bed is arranged in three layers: quartz sand, ampholyte-containing metal shavings (aluminum-based), and natural activated clinoptilolite. Each layer fulfills a specific function: quartz sand provides mechanical filtration and water

activation, the ampholyte promotes coagulation and oxidation, and clinoptilolite efficiently sorbs ionic impurities including ammonium, heavy metals, and residual coagulants.

A distinctive feature of the technology is the built-in reagent dosing system, which delivers chlorine dioxide (ClO_2) synthesized electrochemically in an autonomous electrolyzer with an ampholyte cathode [2], along with coagulants, directly into the interlayer space of the filtration media. This allows for localized intensification of disinfection, oxidation, and flocculation processes without the need for separate flocculators or reagent blocks.

The technology was tested on a pilot unit with a capacity of up to $130 \text{ m}^3/\text{day}$, treating quarry water containing elevated levels of nitrites (up to 2.0 mg/dm^3), petroleum products, organochlorine compounds, and suspended solids (turbidity over 25 mg/dm^3). Following treatment, nitrite concentrations were reduced to $<0.03 \text{ mg/dm}^3$, with ammonium and hardness levels brought in line with national drinking water standards (DSTU 7525:2014), and complete disinfection achieved without sodium hypochlorite. Quality control was performed using photometric, titrimetric, and microbiological methods, accounting for pH, ORP, hardness, and water mineralization.

To ensure drinking water quality, a complex technology and an autonomous installation (Fig. 1, 2 and 3) were developed and tested, which allows to intensify the oxidation processes of toxic nitrites and cyanobacteria without the formation of intermediate toxic products. The installation includes a flow-non-flow type electrolyzer with an inert diaphragm, made on the basis of [2, 3, 4], with a filled cathode-ampholyte for the electrolysis of a sodium chlorite solution (NaClO_2). The installation is equipped with a filter with activated filtration layers of floating polystyrene (type PSVS) and granular clinoptilolite loading (zeolite from



Fig. 1, 2, 3. Autonomous mobile pilot unit for combined filtration and electrochemical water treatment to drinking water standards

the Sokyrian quarry), as well as blocks of “finishing” ultrafiltration and leachate disinfection. The reliability and autonomy of the power supply of the block-modular water treatment plant in field conditions was ensured by an autonomous electric generator, blocked in a single complex with additional modular solar panels-power plants. Uninterrupted autonomous power supply of the electrolyzer with low-voltage direct current was provided by a portable charging station of the HBM type. When testing the technology and autonomous installation in field conditions, water for purification was taken in the summer from a canal in the area of the city of Sloviansk. It was noted that in the source water before being supplied for purification, the content of nitrites and cyanobacteria exceeded the maximum permissible values by 12-15 and 13-28 times, respectively. Water quality was studied using autonomous devices (water tester - Pool Lab 1.0 photometer), as well as in laboratory conditions. The studies established that when water was supplied for purification to the anode cell of the diaphragm electrolyzer, the intensification of the oxidation of toxic nitrites into low-toxic nitrates, as well as the oxidation of cyanobacteria, was carried out due to the complex use of electrolysis gases obtained by vacuum-ejection suction from the electrode space of the anode cell of the diaphragm electrolyzer. Electrolysis gases (chlorine dioxide and oxygen electrochemically synthesized in the anode cell) were intensively mixed with the source water in a vacuum-ejection nozzle (column), hydraulically locked with a feed pump and pneumatically locked with the above-electrode space of the anode cell.

Electrolysis gases from the anode cell contained chlorine dioxide (ClO_2), as well as oxygen, the content of which was easily controlled and adjusted by changing the voltage-current characteristics of electrolysis, as well as as a result of the fact that a sodium chlorite solution (NaClO_2) and source water of a given flow rate were automatically dosed into the anode cell of the electrolyzer.

As an anode electrically connected to the positive pole of a low-voltage electric current source, high-purity graphite plates were used for electrolysis. Intensification of oxidation of contaminants occurred in the flow anode cell of the diaphragm electrolyzer by gases synthesized on the surface of the graphite anode: chlorine dioxide and partially oxygen. In the electrolyzer, a stainless-steel mesh of the Kh18N9T type was used as a combined cathode, electrically connected to the negative pole of the low-voltage electric current source, as well as a metal scaly aluminum-containing silumin chip-ampholyte, which was in contact with the mesh electrode (cathode) and was placed between the mesh cathode and the inert diaphragm. As an inert diaphragm, a chlorin-type fabric was used, which was fixed on an electrically neutral frame.

The anode cell of the diaphragm electrolyzer was designed as a flow cell, and the cathode cell, which contained a combined cathode with a loose aluminum-

containing ampholyte electrode, was designed as a non-flow cell. Flotation sludge with aggregated contaminants, which was formed directly in the electrolysis cells and in the supraelectrode space of the cathode and anode cells, was automatically removed into the sludge collector of the installation.

Studies in real field conditions have established that the complex oxidation of nitrites and cyanobacteria during the electrolysis of NaClO_2 solution in flow-through and non-flow electrolyzers with an inert diaphragm and a filled cathode-ampholyte intensifies water treatment by eliminating unpleasant odors of petroleum product residues, mercaptans, skatole, TNT and other impurities that are present in water during water supply from open sources and catchments during the production of drinking water.

After the filtration media's service life (10–30 days) is exhausted, it can be easily removed via the rotation mechanism, and backwashing is performed through the bottom outlet. The spent media can be either disposed of or regenerated for reuse, implementing a closed-loop system that reduces operational costs and solid waste generation.

Conclusions 1.

1. Flotation sludge with water contaminants formed in the cathode and anode cells as a result of the action of electrolysis gases is removed to the sludge collector.

2. The combined design of the cathode makes it possible to intensify the process of chlorine dioxide synthesis in the anolyte of the anode chamber due to the fact that OH^- ions synthesized in the cathode zone will defund to a lesser extent into the anode chamber and the anode chamber will provide optimal conditions for the use of H^+ ions to lower the pH and synthesize chlorine dioxide in an acidic environment.

3. OH^- ions in the bulk loading-ampholyte of the cathode chamber will participate in chemical reactions with bulk materials-ampholytes with amphoteric properties (a mixture of aluminum chips, aluminum scrap, and/or silumin crumbs) and to a lesser extent will participate in the neutralization of H^+ ions in the anode chamber, preventing a decrease in the pH of the anolyte.

4. It should be noted that when ensuring the lower the pH values of the anolyte, the more effectively the processes of chlorine dioxide synthesis in the anode chamber of the diaphragm electrolyzer will be ensured by the method of acidification of a sodium chlorite solution (NaClO_2).

5. The combined cathode design makes it possible to intensify the process of chlorine dioxide synthesis in the anolyte of the anode chamber and use the technology and water installations on an industrial scale for the oxidation of nitrites to low-toxic nitrates and the oxidation of cyanobacteria in water from surface water sources (prevention of eutrophication).

The proposed modular block filtration complex [3] enables full-scale water treatment within a single apparatus, eliminating the need for complex multi-

component systems. The absence of additional reagent blocks, flocculators, and filters, along with a high level of automation, reduces maintenance costs. The system is suitable for deployment in mobile and stationary water treatment units for military, medical, agricultural, recreational, and industrial applications.

At present, there is a trend towards the use of natural methods for water purification and conditioning using renewable natural resources, particularly by means of higher aquatic plants (HAP). Among natural water treatment systems, bioengineering facilities such as bioplato-filters are becoming increasingly widespread. They are applied for reagent-free stages of water treatment, as well as for advanced purification of domestic and industrial wastewater, natural water in water bodies and reservoirs, and polluted surface runoff, with the production of drinking-quality water. The essence of the functioning of most bioplato-filters lies in the fact that phytotreatment of water in them occurs through filtration of water through the root system of HAP, due to photosynthesis in HAP, which ensures their absorption, accumulation, oxidation, and detoxification capacities, as well as the ability to synthesize oxygen during the biological destruction of carbon dioxide (greenhouse gases).

Closed hydroponic-type bioplato-filters (CHBPF) are quite widespread, in which the root systems of HAP are fixed in loose (gravel, more often zeolite) filtration media and are constantly washed with water moving either vertically from top to bottom or from bottom to top. In this process, preliminary oxidation of impurities is carried out by environmentally friendly chlorine dioxide synthesized electrochemically, and the produced catholyte with reducing properties is used to intensify the biological purification of water by HAP.

In bioplato-filters, along with effective removal of suspended solids, organic impurities, and biogenic

nitrogen and phosphorus compounds, dissolved salts are also removed from the water by HAP. Thus, when using water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), in addition to the removal of organic pollutants in the biofilter (phyto-bioreactor), the removal of chlorides up to 32% and sulfates up to 43% was observed. Common reed, with a dry matter yield of 44 t/ha, can accumulate up to 419 kg/ha of potassium, 408 kg/ha of chlorides, and 450 kg/ha of sodium. At bioengineering facilities such as filtration-regeneration hydroponic-type bioplato, the purification efficiency of sulfates using higher aquatic plants reached 25–30%, and of sodium ions – up to 10–15%. The authors have obtained a patent [4] for this innovative water treatment technology at the industrial scale and have published a scientific article [5].

In order to purify brackish water from surface sources (with a total salt content of about 3.5‰), there is a need for a comprehensive water treatment technology based on the use of renewable natural resources, self-cleaning clarifier-filters, and solar energy.

Figure 4 presents the schematic diagram “green” technology of water treatment from brackish water sources with intensified oxidation of impurities using electrochemically synthesized chlorine dioxide.

As experimental data show, sulfate removal remains at a high level up to 144 hours of operation of bioplato-filter facilities and is 0.404–0.837 mg/h, then the absorption intensity decreases to 0.121–0.046 mg/h. The same is observed for chloride removal. For restoring the operation of “typical” bioplato-filters, periodic shutdown of the facilities for maintenance and restoration works is necessary, associated with washing and regeneration of the filter media and drainage, which creates stressful conditions for HAP and negatively affects further phytoremediation processes after stoppages for washing the bioplato-filters.

These drawbacks of bioplato-filters are absent when using filtration-regeneration hydroponic-type bioplato-filters (FRBHT), developed by the authors, in which automatic and continuous washing of the filter media, root systems of HAP, and drainage is provided, as well as oxidation of impurities by environmentally friendly chlorine dioxide synthesized in a diaphragm electrolyzer with an inert membrane and a complex ampholyte cathode. Washing and regeneration of the bioplato-filter is carried out by hydro-automated removal of contaminated circulation-washing waters from the filter media of the bioplato-filter through a special intermediate drainage, followed by their purification in a self-cleaning polystyrene foam filter with floating filtration media. This allows providing a self-restoring mode of operation of phytostructures bioplato-filters without creating stressful conditions for the growth of HAP on the bioplato-filters.

Thanks to the developed technology and FRBHT design using oxidation processes of water impurities by environmentally clean chlorine dioxide synthesized in the diaphragm electrolyzer with an inert membrane and

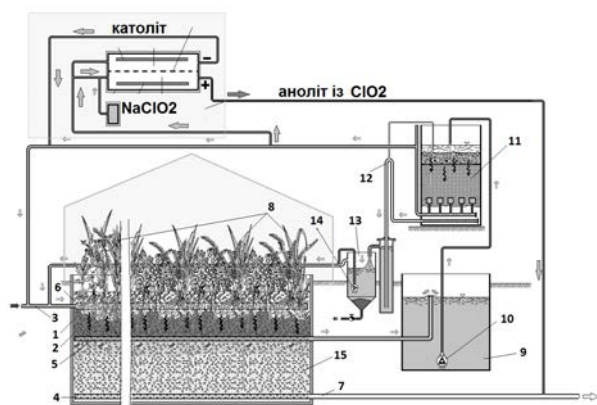


Fig. 4. Principal scheme of water treatment from brackish water sources using higher aquatic plants for phyto-desalination of water; self-cleaning clarifier-filters with complex floating media and natural filtration granules of clinoptilolite, as well as a diaphragm electrolyzer for synthesis of chlorine dioxide and catholyte (“green” technology)

a complex ampholyte cathode, the mode of operation of the bioplato-filter allows achieving, regardless of the concentration of organic, bacteriological, and mineral pollutants in the source water, the cyclicity of its supply for treatment, presence of service personnel, and in any climatic conditions, a higher quality and stability of water purification using higher aquatic plants and the diaphragm electrolyzer with an inert membrane and complex ampholyte cathode for chlorine dioxide synthesis.

Therefore, the use of FRBHT and diaphragm electrolyzer with an inert membrane and complex ampholyte cathode for chlorine dioxide synthesis for complex removal of contaminants and salts from mineralized water can be promising in water treatment and reagent-free and membrane-free desalination of mineralized water, particularly brackish waters with salt content of 2.5–3.5 g/dm³.

According to the technological scheme of the filtration-regeneration hydroponic-type bioplato-filter (FRBHT), phyto-desalination, oxidation of impurities, and water purification are performed in multiple stages. The main stage of desalination, oxidation of impurities, and water purification takes place directly in the bioplato-filter itself and by chlorine dioxide synthesized in the diaphragm electrolyzer with an inert membrane and a complex ampholyte cathode by means of photosynthesis processes in HAP with absorption of salts and biogenic compounds from water and their accumulation in the biomass of HAP. Thus, according to research data by Professor V. Kravets, it was established that in active phytoremediation systems using HAP, removal of sulfates and chlorides in bioplato-filters amounts to 58–35% and 67–49%, respectively, depending on the design of the bioplato-filter, season, and type of HAP. Overall removal of dissolved salts in bioplato-filters from mineralized waters can average 40–55% of the total salt content of the source water with a salt concentration of 2.5–3.5 g/dm³ (brackish waters). An additional stage of desalination of mineralized (brackish) water in the FRBHT technology is carried out by purifying the water and accompanying salt removal from circulation-regeneration waters of the bioplato-filters using chlorine dioxide synthesized in the diaphragm electrolyzer with an inert membrane and complex ampholyte cathode, as well as bioreagents and probiotics in a bioflotation reactor-clarifier and further in a polystyrene foam self-cleaning filter (floating filtration media), hydraulically connected with the bioplato-filter into a single water treatment complex. For purification and desalination (desalting) of circulation-regeneration waters, “green” coagulants, “clean” metal hydroxides (without salt “tails”), filtration materials and suspensions of natural minerals such as clinoptilolite, diatomite, brucite, tuff, bentonite, and peat, and their combinations, as well as chlorine dioxide synthesized in the diaphragm electrolyzer with an inert membrane and complex ampholyte cathode can be used.

When using aluminum hydroxychloride coagulants with sodium aluminate in combination with chlorine

dioxide synthesized in the diaphragm electrolyzer with an inert membrane and complex ampholyte cathode for purification of mineralized (brackish) waters with sulfate concentrations of 500–700 mg/dm³, the degree of sulfate removal reaches 83–88%.

High sorption properties regarding dissolved salts are exhibited by magnetite, electrochemically synthesized iron and aluminum hydroxides obtained as a result of electrolysis using metallic anodes, known as the “electrocoagulation” process.

Experimental data obtained by the authors show that during electrocoagulation, the degree of chloride removal from mineralized brackish water reaches 13–15%, and sulfates – 20–31% and more due to the high sorption capacity of metal hydroxides at the moment of their formation after ionization of metallic anodes under the influence of direct electric current or internal electrolysis of metal shavings.

To intensify photosynthesis processes in HAP with ensuring constant growth of green biomass of HAP in bioplato-filters, probiotics-enzymes and activated natural suspensions based on zeolite (clinoptilolite) and other natural minerals or their complex mixtures are dosed into the aerated source water using catholyte and chlorine dioxide synthesized in the diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholyte cathode.

Activation of natural zeolite suspension can be carried out by effective microorganisms-enzymes, probiotics, as well as catholyte obtained in the cathode zone of the diaphragm electrolyzer, or by complex activation using chlorine dioxide synthesized in the anode zone of the diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholyte cathode.

Activation of the suspension provides more intensive accumulation by the root system of HAP, as well as by zeolite and other natural filtration materials and suspensions of biogenic nitrogen and phosphorus compounds and stimulates intensive growth of the root system of HAP, which promotes acceleration of photosynthesis and immobilization of salts from water by higher aquatic plants on the bioplato-filters.

The technological scheme of purification and concurrent desalination of mineralized (brackish) water in FRBGT facilities, which includes the unit for electrochemical synthesis of chlorine dioxide in a diaphragm electrolyzer with an inert membrane and complex ampholytic cathode, operates as follows. The source mineralized (brackish) water is fed via the collector (8) into the bio-plateau filter (1) and, through the upper drainage (2), is evenly distributed in the upper layer of the filter media (3), where the most active absorption zone of the root system of the HAP (12) is located and where active aeration of the water occurs.

Due to the constant contact of the HAP with the source water, active mass exchange between the water and the root system of HAP, and photosynthesis in HAP, complex biochemical processes occur in the bio-

plateau filter converting organic and mineral impurities present in the water, with the biomass of the HAP absorbing dissolved salts from the water. Then, the water is filtered from top to bottom through the layers of the filter media (3, 4), collected evenly over the filtration area by the lower drainage (6), and removed for further use.

During the flow of water through the layers of the filter media in the root zone of the bio-plateau filter plants, there is a constant accumulation of a film of active sludge, microscopic algae, dead root hairs of the HAP, suspended mineral and organic impurities causing clogging (colmatation) of the filter media layers and drainages. The hydraulic resistance of the filtering layers increases, suffusion processes begin to occur, which leads to a reduction in the productivity of the facility and deterioration in the quality of the purified water.

To prevent this process, a portion of the polluted water is withdrawn from the upper filter layer of the bio-plateau filter using the middle drainage (5), ensuring constant regeneration of the upper layers of the filter media and root system of the HAP in the bio-plateau filter. Initially, the polluted circulation-regeneration waters are sent for additional purification in the bio-flotation reactor-clarifier (9), where bioreagents for coagulation and sorption of suspensions and removal of dissolved salts are also supplied, as well as compressed air for flotation of suspensions and saturation of water with oxygen and electrochemically synthesized chlorine

dioxide. The formed flotation sludge and sediment are periodically removed from the reactor-clarifier (9).

Further purification of clarified water from suspensions occurs by oxidation of water impurities using the unit for electrochemical synthesis of chlorine dioxide in the diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholytic cathode, as well as on the polystyrene foam filter (10) with combined zeolite and floating filtration media. The filter media of the filter is periodically washed as it clogs in a hydro-automatic ("unmanned service") mode using a special valve-free siphon device (11) designed for self-regeneration of the filter media. The wash waters are collected in the tank (15) and then sent for treatment to the bio-flotation reactor-clarifier (9) together with the circulation-regeneration waters. If necessary, probiotic solutions, enzymes, and suspensions of effective microorganisms (EM) can be dosed into the purified circulation-regeneration waters after the polystyrene foam filter.

After purification in the bio-flotation reactor-clarifier (9) and in the self-washing polystyrene foam filter (10), the circulation-regeneration waters are mixed with the flow of source brackish water and supplied to the "head" of the bio-plateau filter (1).

Thus, circulation-regeneration waters continuously circulate during the day through the upper layer of the filter media of the bio-plateau filter (3), repeatedly washing the root system of the HAP, ensuring their constant rinsing and allowing automatic stabilization of

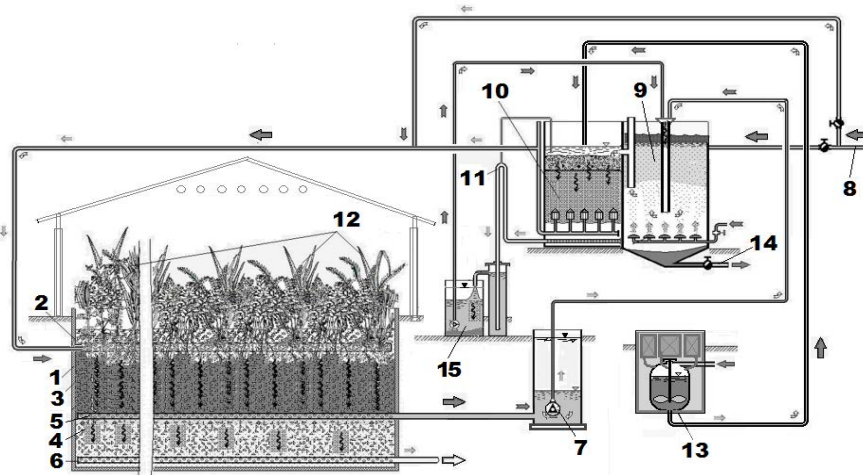


Fig. 5. Principal scheme "green" technology of a filtration-regeneration hydroponic bio-plateau filter (FRBGT) for complex purification and desalination of mineralized waters with intensification of water treatment using chlorine dioxide synthesized electrochemically in a diaphragm electrolyzer with an ampholytic cathode.

- 1 – bio-plateau filter body, 2 – upper drainage for water supply into the bio-plateau filter, 3 – upper layer of the filter media, 4 – lower layer of the filter media, 5 – middle drainage for collection and removal of circulation-regeneration waters, 6 – lower drainage for collection and removal of purified water, 7 – circulation-regeneration water pump, 8 – collector for supplying source mineralized (brackish) water for treatment, 9 – flotation reactor-clarifier, 10 – self-washing polystyrene foam filter with floating filtration media, 11 – device for hydro-automatic washing of the filter, 12 – higher aquatic plants (HAP), 13 – reagent facility including a unit for electrochemical synthesis of chlorine dioxide in a diaphragm electrolyzer with an inert membrane and complex ampholytic cathode, 14 – sludge disposal, 15 – tank for accumulation of filter wash waters after hydro-automatic washing.

the purification and desalination process of brackish water in the bio-plateau filter by the FRBGT technology, using electrochemically synthesized chlorine dioxide in the diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholytic cathode for oxidation of water impurities and water disinfection processes. The electrolyzer can be powered by solar power plants (autonomous unit based on solar modular power stations).

Depending on the degree of pollution and mineralization of the source water, the complex block of FRBGT facilities with higher aquatic plants can operate under some combined variants according to the specified operating modes of the purification and phyto-desalination system. With relatively high concentrations of pollutants and mineral salts, the entire flow of source water can be directly supplied to the bio-flotation reactor-clarifier (9) and the self-washing polystyrene foam filter (10) for preliminary purification and desalination before the bio-plateau filter along with circulation-regeneration waters. With relatively medium pollution concentrations, the source water flow can be divided into two streams, one directed directly to the bio-plateau filter and the other mixed with circulation-regeneration waters and purified in the reactor-clarifier and the self-washing polystyrene foam filter. The flow ratios are determined by parameters such as pollutant concentration, water supply regime for purification, requirements for quality of purified and desalinated water, design of the FRBGT bio-plateau filter, and the chlorine dioxide electrochemical synthesis unit in the diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholytic cathode.

The operation modes of the FRBGT bio-plateau filter facilities are also determined by the types of bioreagents-enzymes, activated natural suspensions, effective enzymes EM, and probiotic enzymes which will be dosed or synthesized using the reagent facility (13). This allows regulating water properties or changing them in the necessary direction for the consumer of purified water, as well as purifying and disinfecting water in any climatic conditions and on an industrial scale. In particular, with bioreagents and probiotics, especially toxic impurities (heavy metals, complex industrial organic impurities, surfactants, TNT, antibiotic residues, GMO products, medicines, pesticides, and chemical fertilizers) can be removed, and water conditioning can be performed, etc.

The FRBGT bio-plateau filter combined with the chlorine dioxide electrochemical synthesis unit in a diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholytic cathode can be part of a general comprehensive physicochemical technological water purification scheme on a large industrial scale. In this case, the bio-plateau filter can be placed at the beginning or the end of the overall technological purification scheme of polluted water. If the source water contains high concentrations of easily oxidizable organic and mineral impurities and requires deep mineralization reduction, the bio-plateau filter is preferably placed at the beginning of the technological scheme. This allows

removing the main mass of organic and especially toxic mineral and organic impurities on the bio-plateau filter and reducing salt concentration, while the next stage achieves deep purification and desalination of clarified and preliminarily purified water. Placement of the bio-plateau filter combined with the chlorine dioxide electrochemical synthesis unit in the diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholytic cathode at the end of the water treatment technological scheme allows deep purification of water from organic and inorganic impurities and restoration of its natural properties due to contact with higher aquatic plants, natural suspensions, and ensures multistage disinfection of water by HAP and chlorine dioxide.

Calculations considering the existing degree of desalination of brackish water on bio-plateau filters show that individual use of the FRBGT in combination with the chlorine dioxide electrochemical synthesis unit in a diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholytic cathode can achieve overall demineralization (desalination) of brackish water with an initial salt concentration of 2500–3500 mg/dm³ up to 67% with ensuring the required degree of recirculation and filtration treatment of regeneration waters.

Conclusions 2.

The analysis of the possibility of phyto-desalination of mineralized waters in filtration-regeneration bioplato-filters of the FRBGT type in combination with the unit of electrochemical synthesis of chlorine dioxide in a diaphragm electrolyzer with an inert membrane and a complex ampholytic cathode shows:

1. The bioplato-filter based on FRBGT technology using chlorine dioxide can be used for hydroautomated (“unmanned”) purification and concomitant membrane-free phyto-desalination of mineralized (brackish) waters under any climatic conditions. Phyto-desalination of mineralized (brackish) waters in the FRBGT is carried out by salt extraction by HAP in the bioplato-filters and treatment of circulation-regeneration waters using activated “green” coagulants, magnetite, metal hydroxides without salt “tails,” suspensions of natural minerals with additional electrochemical activation of bioreagents and EM probiotic enzymes with chlorine dioxide. Higher aquatic plants also help restore the natural properties of water by enabling biological utilization (decarbonization) of carbon dioxide from water and air and promoting oxygen synthesis.

2. The unit for treatment and purification of circulation-regeneration waters of bioplato-filters should include, as a complex, the unit of electrochemical synthesis of chlorine dioxide in a diaphragm electrolyzer with an inert membrane and a complex ampholytic cathode, as well as a bioflotation reactor-clarifier for introduction of additional bioreagents and a self-cleaning complex polystyrene foam filter-clarifier with dosing of enzymes, EM bioreagents, and probiotics into clarified water, which allows intensification of salt extraction (water desalination) by HAP of the bioplato-filter, oxidation of multicomponent impurities,

and ensures a constant increase of green biomass of HAP in the bioplato-filters, utilization of greenhouse gases (carbon dioxide, hydrogen sulfide, and methane), as well as synthesis of useful phytoaerosols.

3. Calculations show that during individual use of FRBGT, the total demineralization (desalination) of brackish water with an initial total salt concentration of 2500–3500 mg/dm³ can reach 40–60%, provided the necessary degree of recirculation of regeneration waters of the bioplato-filter and depending on the design of the FRBGT bioplato-filter in combination with the self-cleaning filter and the unit of electrochemical synthesis of chlorine dioxide in the diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholytic cathode.

4. The next stage of work and research is the modeling of water treatment processes, complex purification, and concomitant phyto-desalination of brackish water using FRBGT technology in combination with the unit of electrochemical synthesis of chlorine dioxide in a diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholytic cathode, and determination of the main parameters of functioning of the technological

scheme structures depending on the degree of water recirculation, design of the FRBGT, as well as the design of the unit for electrochemical synthesis of chlorine dioxide in the diaphragm electrolyzer (Filipchuk electrolyzer) with inert membrane and complex ampholytic cathode and concentrations of contaminant components and impurities in the feed water.

5. It is necessary to continue research on defining the conditions of use of stations and block-modular installations for water treatment, complex purification, and concomitant phyto-desalination of brackish water using FRBGT technology with renewable natural resources and solar energy in combination with the unit of electrochemical synthesis of chlorine dioxide in a diaphragm electrolyzer with inert membrane and complex ampholytic cathode with integrated elements of artificial intelligence (AI) systems.

Economic analysis suggests that implementing the described system can yield annual savings of €51,000 to €150,000 at a daily output of 700–1300 m³, achieved through reduced consumption of reagents, energy, and labor resources [2–3].

References

1. Міхалева, М. С., & Світлик, І. В. Можливості використання електрохімічних технологій для модифікування властивостей та контролю якості води. *Technology Audit and Production Reserves*, 2014, 3(1(17)), 31–33. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2014.25279>
2. [2] Патент на корисну модель № 119008. Діафрагмовий електролізер Філіпчука для активації води. Опубліковано 11.09.2017, Бюлетень № 17.
3. Бондар О.І., Курилюк О.М., Філіпчук В.Л. та ін. Патент на корисну модель № 158685. Інтегрований фільтр очищення води за Сулимою-Курилюком. Опубліковано 05.03.2025, Бюлетень № 10.
4. [4] Бондар О.І., Курилюк О.М., Курилюк М.С., Філіпчук В.Л. та ін. Синергетичний комплекс очищення води AQUA-U-ELION. Патент № 95617, Бюлетень № 24 – 2014.
5. Бондар О.І., Філіпчук В.Л., Курилюк О.М., Курилюк М.С., Почтар О.В. Очищення води у фільтраційно-регенераційних фільтрах Біоплато. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*, (2(74)), с. 193–204 – 2016.

УДК 502.51(282.247.324)(477.51):581.9

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.2>

ФЛОРИСТИЧНА ТА ФІТОЦЕНОТИЧНА СТРУКТУРА ВОДНИХ І ПРИБЕРЕЖНО-ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ МАЛИХ РІЧОК ПОНИЗЗЯ ДЕСНИ В МЕЖАХ ЧЕРНІГІВСЬКОГО ПОЛІССЯ

Івусь Т.І., Карпенко Ю.О.

Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка

вул. Гетьмана Полуботка, 53, 14000, м. Чернігів

tanya-ivus@ukr.net, yuch2011@i.ua

Водні та прибережно-водні екосистеми малих річок відіграють важливу роль у функціонуванні природного середовища, зокрема як стабілізатори гідрологічного режиму, осередки біорізноманіття та постачальники екосистемних послуг. У межах Чернігівського Полісся ці річки є характерними елементами ландшафту, що формують своєрідні природні комплекси з розвиненою водною та гідрофільною флорою і рослинністю. Однак останніми десятиліттями їхня екологічна структура зазнає істотних змін, зумовлених як глобальними кліматичними процесами, так і локальними чинниками, такими як гідротехнічні втручання, сільськогосподарська діяльність і урбанізація. У результаті відбуваються суттєві трансформації рослинного покриву, зменшення площ типових фітоценозів, поява синантропних видів і зміна біотичних зв'язків.

Незважаючи на визнану екологічну важливість водної флори, вивчення її структурної організації в межах малих річок пониззя Десни залишається фрагментарним. Більшість наукових праць фокусуються переважно на інвентаризації видового складу, тоді як питання просторового розміщення угруповань, домінування певних таксонів, взаємозв'язків між фіторізноманіттям і фізико-хімічними умовами середовища потребують більш поглибленого аналізу. В цьому контексті важливим є також дослідження прибережних угруповань, які формують буферні зони між водою та сушею й мають виняткове значення для стабілізації екосистеми в цілому. Наявність у таких ектопах рідкісних, зникаючих або ресурсно-цінних видів підкреслює необхідність постійного наукового моніторингу та перегляду підходів до охорони відповідних біотопів.

Актуальність вивчення флористичної та фітоценотичної структури екосистем малих річок Чернігівського Полісся також обумовлена потребою у формуванні базових наукових даних для подальших прикладних досліджень. Такі дані є основою для моделювання сценаріїв природокористування, розробки локальних стратегій екологічного менеджменту, а також забезпечують наукове підґрунтя для створення елементів Смарагдової мережі, екологічних коридорів місцевих екомереж й об'єктів природно-заповідного фонду. Вивчення рослинного покриву з урахуванням екологічних і геоботанічних характеристик дозволяє краще зрозуміти процеси деградації середовища, а також виявити ділянки з високим ступенем природності, які потребують пріоритетної охорони або відновлення.

Враховуючи вищезазначене, постає завдання системного аналізу флори та фітоценозів у межах малих річок пониззя Десни, що є типовим прикладом недостатньо вивченого, але екологічно значущого комплексу екосистем регіону. Саме ця мета визначає логіку подальшого дослідження, результати якого сприятимуть як науковому осмисленню рослинного різноманіття, так і практичній реалізації заходів з його збереження. *Ключові слова:* малі річки, Чернігівське Полісся, прибережно-водні екосистеми, флора, водна рослинність, рослинні угруповання, деградація екосистем, екологічний моніторинг, біорізноманіття.

Floristic and phytocenotic structure of aquatic and coastal-aquatic ecosystems of small rivers lower town of Desna within the borders of Chernihiv Polissia. Ivus T., Karpenko Yu.

Aquatic and coastal aquatic ecosystems of small rivers play an important role in the functioning of the natural environment, in particular as stabilizers of the hydrological regime, centers of biodiversity and providers of ecosystem services. Within the Chernihiv Polissia, these rivers are characteristic elements of the landscape, forming unique natural complexes with developed aquatic and hydrophilic flora and vegetation. However in recent decades, their ecological structure has undergone significant changes caused by both global climatic processes and local factors such as hydraulic interventions, agricultural activity and urbanization. As a result significant transformations of plant cover occur, the area of typical phytocenoses decreases, the appearance of synanthropic species and changes in biotic relationships. Despite the recognized ecological importance of aquatic flora the study of its structural organization within the small rivers of the lower Desna River remains fragmentary. Most scientific works focus mainly on the inventory of species composition, while the issues of spatial distribution of communities, dominance of certain taxa, relationships between phytodiversity and physicochemical environmental conditions require more in-depth analysis. In this context it is also important to study coastal communities, which form buffer zones between water and land and are of exceptional importance for stabilizing the ecosystem as a whole. The presence of rare, endangered or resource-valuable species in such ecotopes emphasizes the need for constant scientific monitoring and revision of approaches to the protection of the relevant biotopes.

The relevance of studying the floristic and phytocenotic structure of ecosystems of small rivers of Chernihiv Polissia is also due to the need to form basic scientific data for further applied research. Such data are the basis for modeling scenarios of nature use, developing local strategies of environmental management, and also provide a scientific basis for creating elements of the Emerald Network, ecological corridors of local eco-networks and objects of the nature reserve fund. The study of vegetation cover taking into account ecological and geobotanical characteristics allows us to better understand the processes of environmental degradation, as well as identify areas with a high degree of naturalness that require priority protection or restoration.

Taking into account the above, the task of systematic analysis of flora and phytocenoses within the small rivers of the lower Desna River, which is a typical example of an insufficiently studied, but ecologically significant complex of ecosystems of the region, arises. It is this goal that determines the logic of further research, the results of which will contribute to both the scientific understanding of plant diversity and the practical implementation of measures to preserve it. *Key words:* small rivers, Chernihiv Polissia, coastal aquatic ecosystems, flora, aquatic vegetation, plant communities, ecosystem degradation, ecological monitoring, biodiversity.

Постановка проблеми. В умовах зміни клімату та інтенсифікації антропогенного впливу малі річки Чернігівського Полісся зазнають значних трансформацій, що впливає на флористичне різноманіття водних і прибережно-водних екосистем. Ці території, попри свою екологічну значимість, залишаються недостатньо дослідженими у фітоценотичному аспекті. Малі річки, які є важливою складовою водозбірною басейну Десни, значною мірою визначають якість води у більших водотоках. Малі річки є одним із важливих компонентів навколишнього середовища, оптимальний екологічний стан та збалансоване функціонування якого забезпечують гомеостаз середніх та великих річок, що утворюють басейни [1]. Їх деградація призводить до втрати численних біотичних компонентів, в тому числі фіторізноманіття. Наявність численних видів із високою екологічною пластичністю, а також ресурсно-цінних та рідкісних таксонів потребує системного моніторингу та аналізу структури рослинного покриву. Оскільки більшість малих річок не входить до мережі державного екологічного моніторингу, існує потреба в розробці та апробації методик комплексного оцінювання їхнього стану, в тому числі через вивчення флористичної та фітоценотичної структури. Крім того, брак актуальної інформації про рослинні угруповання ускладнює екологічне планування, створення природоохоронних об'єктів і розробку заходів сталого управління водними ресурсами у межах басейну річки Десни.

Актуальність дослідження. Малі річки становлять основу гідрологічної мережі України та відіграють ключову роль у підтриманні біорізноманіття, зокрема у межах Чернігівського Полісся. Вони функціонують як осередки збереження водної флори, зокрема макрофітів, які формують угруповання з важливими екосистемними функціями (очищення води, фільтрація, детоксикація, укріплення берегів тощо). У контексті зміни клімату, активної меліорації та забудови прибережних зон знижується природна саморегуляція водних екосистем, що негативно впливає на їхню екологічну стійкість. Вплив людської діяльності на річкові екосистеми переважно проявляється через внесення додаткових речовин, включаючи токсичні та шкідливі, у середовище екосистем. Деякі з цих речовин поглинаються екосистемою, що призводить до її евтрофікації, тоді як інші видаляються з неї. Додатково через вирубку лісів, видалення чагарників та оранку земель зросло надходження біогенних елементів у більшість річкових екосистем. Внаслідок цього зросли обсяги невідновлюваного споживання води, зменшилися природні стоки й енергетичний потенціал річок [2].

З позиції наукового вивчення процесів і явищ природно-антропогенного походження малі річки є унікальним полігоном наукових досліджень [3]. Дослідження біоценотичної структури малих річок пониззя Десни дозволяє не лише ідентифікувати екологічно цінні території, а й встановити рівень їхньої деградації або стабільності. Крім того, флора цих екосистем включає значну кількість видів із лікувальним, кормовим, естетичним і рекреаційним значенням, а отже дослідження матиме як ресурсну, так і соціально-культурну цінність.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження флористичної та фітоценотичної структури водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни безпосередньо пов'язане із завданнями національної стратегії збереження біорізноманіття, імплементації положень базової Водної рамкової директиви Європейського Союзу, ключовими напрямками Європейського зеленого курсу та програмами охорони навколишнього природного середовища, безпосередньо «Програма охорони навколишнього природного середовища Чернігівської області на 2021–2027 роки» затверджена рішенням 21-ї сесії Чернігівської обласної ради VII скликання від 18.12.2019 № 4-21/VII зі змінами» [4,5,6,7,8]. Практична цінність полягає у створенні основи для прикладних досліджень, таких як інвентаризація гідрофільних рослин, моніторинг поширення інвазійних видів, планування природоохоронних заходів. Результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування, природоохоронними установами, фермерськими господарствами та освітніми закладами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Флористичне багатство Чернігівського Полісся вивчалось у роботах Лукаша О.В. та Андрієнко Т.Л. (2014) [9], в яких досліджено ботанічно цінні рослинні угруповання Полісся, серед яких значна частина представлена водно-болотними фітоценозами, що є референтними у порівняльному аналізі для регіону Чернігівщини, у публікації Івусь Т.І. (2020) [10] акцентовано увагу на екобіоморфологічній структурі флори річки Золотинка, де представлено систематичну характеристику водних та прибережно-водних видів, охарактеризовано їх соціологічну значущість, а також вказано на важливість збереження оселищ із домінуванням рідкісних та лікарських таксонів. Робота демонструє високий рівень збереженості природних біоценозів, а також слугує базисом для порівняння з іншими малими річками регіону.

Дослідження Клименка О.М. (2020) висвітлює індикаторну роль вищої водної рослинності у визначенні екологічного стану річкових гідро-екосистем, що є особливо актуальним у контексті виявлення антропогенних порушень та оптимізації природоохоронного менеджменту [11]. Дослідження Яковенка О.І. (2022) про флору лесових «островів» Чернігівського Полісся вказує на специфіку зростання видів у водно-лісових межових біотопах, що дозволяє краще розуміти екотональні процеси в регіоні [12].

Окрему увагу заслуговують праці Мехед О.Б. та Карпенка Ю.О. (2024), які розглядають прибережно-водну рослинність річки Снов як елемент рекреаційного середовища, а також дослідження Кирієнко С.В. і Мехед О.Б. (2023), де проведено аналіз водних фітоценозів північної частини Чернігівської області [13,14].

Проте більшість існуючих публікацій зосереджені на описі флористичних списків без докладного аналізу просторово-структурної організації фітоценозів. Окремі праці висвітлюють загальні тенден-

ції деградації екосистем, однак конкретні локальні дослідження, які поєднують флористичний, ценотичний й екологічний підходи в межах малих річок Чернігівського Полісся, залишаються поодинокими.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність загальних оглядів флори регіону, відсутні повні дані щодо систематичної структури водних і прибережно-водних угруповань саме малих річок пониззя Десни. Потребують уточнення межі поширення певних угруповань, їхній склад і проєктивне покриття, сезонна динаміка та вплив антропогенних факторів на стабільність фітоценозів. Важливим залишається питання формування індикаторних груп рослин, які б дозволяли оцінити якісний стан середовища на основі геоботанічних спостережень. Відсутня інтеграція флористичних даних у геоінформаційні системи, що обмежує використання таких матеріалів у просторовому плануванні та екологічному прогнозуванні.

Новизна. У межах дослідження вперше систематизовано флористичну структуру та охарактеризовано фітоценози прибережно-водної та водної рослинності малих річок пониззя Десни. Виявлено 136 видів вищих рослин, що належать до 68 родів та 41 родини, зокрема родин *Cyperaceae*, *Poaceae*, *Potamogetonaceae*, *Lamiaceae*. Виокремлено типові угруповання: *Phragmiteta australis*, *Glycerieta maxima*, *Lemneta minoris*, *Potametum natantis* та інші. Проведено аналіз систематичної структури флори, з урахуванням екологічних груп, що дозволяє відстежити трансформаційні зміни екосистем в умовах антропогенного тиску.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Результати дослідження становлять методичну основу для розробки локальних програм екологічного моніторингу, зокрема в контексті оцінки стану фітоскладової малих річок. Розроблені методичні підходи можуть бути адаптовані до інших регіонів Полісся та Лісостепу. Наукова цінність полягає у можливості використання зібраної інформації при створенні електронних ботанічних баз даних, визначенні фітоіндикаторів деградації водних об'єктів. Матеріали дослідження мають міждисциплінарне значення і можуть бути використані в геоecології, ландшафтній екології, біоіндикації, природоохоронному плануванні та в освітньому процесі.

Виклад основного матеріалу. Флора водних і прибережно-водних екосистем пониззя Десни вирізняється значним ступенем таксономічного різноманіття, що відображає як багатство регіонального фіторізноманіття Полісся в цілому, так і своєрідність і складність екологічних умов формування фітоценозів. Систематичний аналіз флори дозволяє не лише уточнити ареали окремих видів, а й виокремити родини, які є діагностичними або домінантними для певних типів угруповань, що є важливим для подальших фітоіндикаційних досліджень.

У межах досліджуваного регіону, що належить до Любецько-Чернігівського та Дніпровсько-Нижньодеснянського фізико-географічних районів, виявлено 136 видів вищих рослин, які представлені 68 родами та 41 родиною, що належать до 3 відді-

лів (*Equisetophyta*, *Polypodiophyta*, *Magnoliophyta*) та 2 класів (*Liliopsida* і *Magnoliopsida*). Найбільше видове багатство відзначено в родинях *Cyperaceae*, *Poaceae*, *Juncaceae*, *Asteraceae*, *Potamogetonaceae* та *Lamiaceae*.

Таксономічна структура флори має такі показники: *Liliopsida*: 13 родин, серед яких домінують *Poaceae* (7 родів, 11 видів), *Cyperaceae* (3;12), *Potamogetonaceae* (1;8), *Juncaceae* (1;10), *Lemnaceae*, *Hydrocharitaceae*, *Alismataceae* та інші; *Magnoliopsida*: 25 родин – *Apiaceae* (5 родів; 5 видів), *Lamiaceae* (4;6), *Polygonaceae* (3;6), *Scrophulariaceae*, *Asteraceae*, *Primulaceae*, *Onagraceae*, *Lythraceae* тощо; Відділи *Equisetophyta* та *Polypodiophyta* представлені менш чисельно, але відіграють важливу екологічну роль у формуванні мезотрофних і евтрофних прибережних угруповань.

Таке різноманіття є наслідком як природних умов (висока зволоженість, багатство типів ґрунтів, евтрофі болота), так і специфіки гідрологічного режиму малих річок, які мають слабкий ухил і часто формують заболочені заплави. Водночас це підвищує їхню вразливість до антропогенних чинників: зменшення стоку, забруднення, порушення водоохоронних смуг.

Угруповання малих річок Чернігівського Полісся демонструють високу структурну різноманітність, що зумовлено поєднанням гідрологічних, фітоценотичних і кліматичних чинників. Особливості фізико-географічного положення території – мішані ліси, евтрофні болота та заболочені тераси – створюють умови для розвитку як типової евтрофної рослинності, так і специфічних гідрофітних угруповань з високою часткою домінантів.

У прибережних зонах водойм спостерігається висока щільність рослинного покриву, зокрема 70–80 % проєктивного покриття формують такі формації домінантних угруповань, як: *Phragmiteta australis*, *Glycerieta maxima*, *Typheta angustifoliae* і *Typheta latifoliae*, *Cariceta acutae*, *Phalaroideta arundinaceae*.

Вони відіграють ключову роль у формуванні стабільних прибережно-водних екосистем, забезпечуючи укріплення берегів, фільтрацію стоку та створення умов для відновлення мікробіотичних процесів у прибережній зоні.

У якості співдомінантних та асектаторних видів у складі цих угруповань найчастіше зустрічаються: *Potamogeton natans* L., *Rumex hydrolapathum* L., *Scirpus sylvaticus* L., *Mentha aquatica* L., *Hydrocharis morsus-ranae* L., *Lycopus europaeus* L., *Alisma plantago-aquatica* L., *Juncus effusus* L., *Stratiotes aloides* L., *Caltha palustris* L., *Solanum dulcamara* L. та інші.

Окрему групу утворюють угруповання з переважанням вільноплаваючих макрофітів, зокрема угруповання формацій: *Lemneta minoris*, *Lemneta trisulcae*, *Nymphaeeta albae*, *Nuphareta lutea*. Вони мають менше флористичне і ценотичне різноманіття, що пов'язано з невеликими площами відкритих водойм та локальним характером таких біотопів.

Наявність малопоширених видів у складі водних і прибережно-водних фітоценозів (*Stratiotes aloides* L., *Hydrocharis morsus-ranae* L.) вказує на потенційно високий природоохоронний статус деяких

ділянок. Це також створює можливості для вивчення трансформацій природних та антропогенно порушених угруповань, які можуть відрізнятися складом, щільністю та стабільністю в часі.

Таким чином, фітоценотична структура екосистем малих річок пониззя Десни засвідчує потребу в довготривалому моніторингу задля відстеження динаміки змін, спричинених кліматичними або антропогенними факторами.

Цей підхід дозволяє інтегрувати ботанічні та екологічні дані у практику природоохоронного планування на локальному та регіональному рівнях.

Головні висновки.

Дослідження флористичної та фітоценотичної структури водних і прибережно-водних екосистем малих річок пониззя Десни в межах Чернігівського Полісся засвідчило високу видову та структурну різноманітність рослинного покриву, що відображає унікальність природних умов регіону, з переважанням представників родини *Cyperaceae*, *Poaceae* та *Potamogetonaceae*. Виокремлено типові домінантні угруповання, зокрема *Phragmiteta australis*, *Lemneta minoris*, *Potametum natantis*, які відіграють ключову роль у формуванні стабільних прибережно-водних екосистем. Водночас встановлено ознаки деградації фітоценозів, що зумовлені антропогенним тиском і кліматичними змінами. Наявність індикаторних видів дозволяє оцінювати екологічний стан водних об'єктів,

що має практичне значення для розробки програм моніторингу, збереження біорізноманіття, створення об'єктів природно-заповідного фонду та формування локальних стратегій сталого природокористування.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути застосовані для розробки та впровадження програм локального екологічного моніторингу водних об'єктів Чернігівського Полісся, зокрема в частині оцінки стану малих річок у контексті сталого природокористування. Дані можуть використовуватись при обґрунтуванні створення об'єктів природно-заповідного фонду, зокрема гідрологічних та ботанічних природоохоронних територій місцевого значення.

Флористичні відомості є основою для інвентаризації ресурсно цінних, лікарських та рідкісних видів, що важливо для розвитку екотуризму та місцевих рекреаційних стратегій. Використання зібраного матеріалу у формуванні електронних ботанічних баз даних дозволить створити просторові моделі оцінки екологічного стану території за допомогою геоінформаційних систем.

Крім того, результати можуть бути інтегровані в навчальні програми для підготовки фахівців різних освітніх програм, зокрема для екологів, біологів, географів, а також слугувати основою для міждисциплінарних досліджень у галузі геоєкології, ландшафтного планування та біоіндикації.

Література

1. Сердюк С.М., Луцьова О.В., Агєєва О.Ф., Кам'янська В.О. Малі річки України: геоєкологічний огляд проблем. *Вісник Донецького гірничого інституту*. 2017. № 1. С. 101-106.
2. Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І., Замула І., Демчук Л. Аналіз стану та моніторинг поверхневих водних об'єктів Чернігівської області. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2024. Вип. 1(144). С. 84-91. DOI: 10.32782/1995-0519.2024.1.11
3. Царик Л.П., Царик П.Л., Вітенко І.М., Царик В.Л. З історії сучасних досліджень геоєкологічних проблем малих річок Західного Поділля. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*. 2023. 54(1). С. 4-12. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.23.1.1>
4. Хільчевський В.К. Сучасна характеристика поверхневих водних об'єктів України: водотоки та водойми. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. № 1. С. 59. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.1>
5. Хімко Р.В., Мережко О.І., Бабко Р.В. Малі річки – дослідження, охорона, відновлення. Київ: Інститут екології, 2003. 378 с.
6. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. Київ: Твій формат. 2006. 240 с. URL: <http://dbuwr.com.ua/docs/Waterdirect.pdf> (дата звернення: 10.05.2025)
7. Водна стратегія України на період до 2050 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 р. № 1134-р.. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 10.05.2025)
8. Програма охорони навколишнього природного середовища Чернігівської області на 2021–2027 роки: рішення 21-ї сесії Чернігівської обласної ради VII скликання від 18.12.2019 № 4-21/VII зі змінами. URL: <https://eco.cg.gov.ua/index.php?id=33874&tp=1&prg=> (дата звернення: 10.05.2025)
9. Лукаш О.В., Андрієнко Т.Л. Ботанічно цінні рослинні угруповання Полісся. Чернігів: Десна Поліграф, 2014. 156 с.
10. Івусь Т.І. Систематична, екобіоморфологічна структура та соціологічна цінність флори водних і прибережно-водних екосистем річки Золотинка (Чернігівська область). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Біологія*. 2020. Вип. 1–2(79). С. 12–17. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.20.1-2.2>
11. Клименко О.М. Вища водна рослинність як індикатор екологічного стану гідроекосистеми (на прикладі річки Вижівка). *Вісник НУВГП. Сільськогосподарські науки*. 2020. №2(90). С. 72–82.
12. Яковенко О.І. Вища водяна рослинність лісових «островів» Чернігівського Полісся. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2022. Вип. 87. С. 23–31. <http://dx.doi.org/10.30970/vlubs.2022.87.02>
13. Мехед О.Б., Карпенко Ю.О. Прибережно-водна рослинність заплави річки Снов як компонент рекреаційно-реабілітаційного середовища. *Вісник Черкаського університету. Серія Біологічні науки*. 2024. Вип. 1. С. 112–120. <https://doi.org/10.31651/2076-5835-2018-1-2024-1-112-120>
14. Мехед О.Б., Кірієнко С.В. Водні та прибережно-водні фітоценози гідрологічної мережі північних регіонів Чернігівщини. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Біологія*. 2023. Вип. 54. С. 99–103. <https://doi.org/10.32782/1998-6475.2023.54.99-103>

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАБОРУ ПРОБ ВОДИ ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ВОДОЙМ

Поліщук М.М., Ролік О.І.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, 03056 м. Київ

borchiv@ukr.net, arolick@gmail.com

Серед операцій екологічного моніторингу водойм важливу роль має процес забору проб води для подальшого лабораторного аналізу. Вказаний процес реалізують за відповідними методиками та державними стандартами, основною метою яких є забезпечення об'єктивності взяття проб води, що передбачає виконання останньої операції на різних об'єктах глибин водойм з урахуванням швидкості течії, тиску та часу заповнення батометра – пристрою для забору проб води. У якості транспортних засобів використовують як надводні плаваючі засоби, так і безпілотні літальні апарати, останні більш привабливі з точки зору забезпечення екологічної чистоти. Однак жодна з відомих методик не надає можливість моделювання процесу забору проб води з визначенням основних технічних характеристик даного процесу. Вирішенню цього завдання й присвячена запропонована стаття, в якій надана не тільки принципова нова конструкція батометру, встановленого на квадрокоптері, а й аналітичні залежності точного розрахунку глибини його занурення завдяки встановленню на приводі спускання енкодера – пристрою для обчислення кількості обертів тросової лебідки, а також визначення часу заповнення батометра водою та траєкторії його переміщення з урахуванням швидкості течії та тиску на різних об'єктах глибин водойм. Також в статті наведені графоаналітичні залежності у вигляді діаграм взаємного зв'язку означених вище параметрів та аналіз результатів моделювання. Досліджено процеси занурення та наповнення пристрою для забору проб води з урахуванням співвідношення його ваги та сили Архімеда, що протидіє зануренню батометра, надані відповідні аналітичні залежності. Головною мотивацією проведених досліджень є підвищення об'єктивності забору проб води та забезпечення можливості прогнозування означеного процесу. В остаточному підсумку розроблена вперше аналітична модель процесу забору проб води надасть можливість науковцям та інженерам в сфері моніторингу екологічного стану різноманітних водойм створювати аналогічне обладнання залежно від інших виробничих завдань. *Ключові слова:* відбір проб води, моніторинг водойм, батометри, квадрокоптер, моделювання процесів.

Modeling the process of water sampling for ecological monitoring of water bodies. Polishchuk M., Rolik O.

Among the operations of ecological monitoring of water bodies, the process of taking water samples for subsequent laboratory analysis plays an important role. This process is implemented according to the relevant methods and state standards, the main purpose of which is to ensure the objectivity of water sampling, which involves performing the last operation at different depths of water bodies, taking into account the flow rate, pressure and filling time of the bathometer – a device for taking water samples. Both surface floating vehicles and unmanned aerial vehicles are used as vehicles, the latter being more attractive from the point of view of ensuring environmental cleanliness. However, none of the known methods provides the possibility of modeling the process of taking water samples with the determination of the main technical characteristics of this process. The proposed article is devoted to solving this problem, in which not only a fundamentally new design of a bathometer mounted on a quadcopter is provided, but also analytical dependencies for the accurate calculation of its immersion depth due to the installation of an encoder on the descent drive – a device for calculating the number of revolutions of a cable winch, as well as determining the time of filling the bathometer with water and the trajectory of its movement, taking into account the flow rate and pressure at different depths of water bodies. The article also presents graph-analytical dependencies in the form of diagrams of the mutual connection of the above-mentioned parameters and an analysis of the modeling results. The processes of immersion and filling of the device for taking water samples are investigated, taking into account the ratio of its weight and the Archimedes force that counteracts the immersion of the bathometer, and the corresponding analytical dependencies are provided. The main motivation for the conducted research is to increase the objectivity of water sampling and ensure the possibility of predicting the specified process. Ultimately, the first-ever developed analytical model of the water sampling process will enable scientists and engineers in the field of monitoring the ecological state of various water bodies to create similar equipment depending on other production tasks. *Key words:* water sampling, reservoir monitoring, bathometer, quadcopter, process modeling.

Постановка проблеми. Для забезпечення об'єктивності взяття проб води та можливості прогнозування даного процесу не достатньо застосування різноманітних транспортних засобів та ефективних конструкцій батометрів, необхідно мати у своєму розпорядженні аналітичну модель сукупності операцій, що складають процес забору проб води з метою екологічного моніторингу стану різноманітних водойм – річок, озер, водосховищ тощо. Відсутність аналітичної моделі, яка б пов'язувала технічні пара-

метри вказаного процесу, а саме: розрахунку глибини занурення батометра, часу заповнення водою та траєкторії його переміщення з урахуванням швидкості течії та тиску на різних об'єктах глибин водойм, перешкоджає прогнозуванню процесу забору проб води та забезпеченню його об'єктивності.

Актуальність дослідження. Не дивлячись на різноманіття методик взяття проб води, і навіть підкріплених відповідними стандартами, на сьогоднішній стан відсутня математична модель, яка б

об'єднувала всі технічні параметри означеного процесу. Причому, вказана аналітична модель повинна об'єднувати як технічні характеристики пристроїв для забору проб води, так і властивості тої чи іншої водойми, а саме глибин, швидкості течії та змінного тиску на різних об'єктах водойми. Необхідність вирішення означених завдань підтверджує актуальність досліджень в даній галузі.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана відповідно до науково-технічної теми «Інтелектуальні високопродуктивні технології управління технічними системами». Державний реєстраційний номер роботи – 0121U110810, дата реєстрації 26.04.2021р. Дослідження проведені на базі лабораторії Інформаційних технологій та системи управління IT-інфраструктурами кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З метою уточнення напрямку досліджень та вибору інструментарію побудови аналітичної моделі слід розглянути найбільш суттєві досягнення в даній галузі. В роботах [1, 2] відмічено, що відбір проб води для аналізу (як хімічного, так і бактеріологічного) проводиться згідно з розробленими Державними стандартами. Викладено ряд вимог і рекомендацій, що мають загальний характер, інші стосуються конкретного виду аналізів та типу джерел. Але в даних роботах відсутнє моделювання процесу забору проб води. Власне методики відбору проб води для бактеріологічного і санітарно-хімічного дослідження достатньо ретельно викладені в роботах [3, 4], але також без надання аналітичної моделі вказаного процесу. Оригінальна конструкція пристрою для забору проб води – батометра, представлена в роботі [5], де для підвищення об'єктивності забору проб води пропонується використання безпілотного літального апарату, тобто дрону. Більш розлого відбір проб води, процедура, ціль, методи та опис обладнання надані в статті [6]. Кінематичний та динамічний аналіз руху батометра, встановленого на Кардановому підвісі, викладено в публікації [7], де надається можливість дослідити процес орієнтації пристрою для забору проб води. Дослідження [8] підтверджують доцільність застосування дронів для збору гідрохімічних даних із прісноводних середовищ для біологічного й фізико-хімічного відбору проб води.

Не аби який інтерес викликає застосування методу, так званої, ортогональної мозаїки, яка створюється безпілотним літальним апаратом [9] для оцінки кількості зібраної дощової води. З метою поліпшення якості води для землеробства в дослідженнях [10] запропоновано використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу якості води в зрошувальних каналах. Однак у розглянутих роботах відсутні аналітичні моделі власне про-

цесу забору проб води. На відміну від попередніх досліджень в роботі [11] наведені аналітичні залежності, що пов'язують такі параметри забору проб води як довжина, ширина і швидкість потоку води, а також температура та тиск водного потоку, але без дослідження процесу занурення пристрою для забору води, тобто батометра, та його наповнення. Методична робота [12] надає можливість систематизувати процеси збору, збереження зразків води та їх польовий аналіз. Таким чином, власне завдання моделювання процесу забору проб води для екологічного моніторингу стану різноманітних водойм залишається актуальною.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Серед різноманіття методик забору проб води відсутні пропозиції щодо побудови аналітичної моделі в сукупності технічних параметрів пристроїв для забору проб води та поточних характеристик на різних горизонтах глибин водойм. Також відсутні графоаналітичні залежності, наприклад, у вигляді графіків чи діаграм, глибини та швидкості занурення батометра від часу та траєкторії його руху на різних горизонтах глибин водойм, що вкрай необхідно для прогнозування та забезпечення об'єктивності взяття проб води.

Новизна. До аспекту інженерної новизни відноситься принципово нова конструкція батометра із сервоприводами заслінок отворів для забору проб води, а також спосіб точного вимірювання глибини занурення батометра у водойму. Наукову новизну досліджень складають вперше отриманні аналітичні залежності траєкторії руху, швидкості та часу заповнення батометра залежно від швидкості течії, тиску та глибини на різних об'єктах водойми, кінематична та динамічна моделі функціонування пристрою для забору проб води та графоаналітичні залежності, що отримані в результаті моделювання процесу відбору проб води.

Методологічне або загальнонаукове значення. Вперше запропонована математична модель у вигляді сукупності аналітичних та графічних залежностей параметрів пристрою для забору проб води та характеристик потоку водойми надає можливість дослідникам і інженерам здійснювати моделювання та прогнозування процесу забору проб води, а також реалізовувати синтез аналогічного технологічного оснащення дронів для екологічного моніторингу водойм відповідно до інших виробничих завдань.

Викладення основного матеріалу. Спочатку розглянемо принципово нову конструкцію [5] та алгоритм функціонування пристрою для забору проб, що полегшить розуміння нижче наданої математичної моделі.

Конструкція пристрою для забору проб. На рис. 1 надано загальний вигляд дрону для забору проб води. На нижній частині квадрокоптера встанов-

лену лебідку, яка має привід у вигляді електричного двигуна з енкодером для обрахування кількості обертів лебідки, а значить і величини заглиблення у воду батометра для забору проб води. Принципово нова конструкція технологічного оснащення дрону, повздовжній переріз якого показано на рис. 2, містить дві коаксіальні циліндричні камери, що по торцям закриті кришками з ущільненням. В цих кришках виконані отвори для забору води, відкриття і закриття яких здійснюється 3-х пелюстковими заслінками з приводом від електродвигунів. На квадрокоптері встановлено лебідку з барабаном, що має привід від електродвигуна з енкодером – пристроєм для перетворення кута обороту барабана в електричний сигнал, наприклад, якщо розрядність енкодера складає 360 імпульсів на один оберт вала двигуна, то це означає, що будемо отримувати 1 імпульс на 1 градус обороту барабана лебідки.



Рис. 1. Дрон для забору проб води

На барабані лебідки в кілька шарів намотано трос, що з'єднаний з батометром – ємністю для забору порції води для подальшого лабораторного аналізу. Намотка троса на барабан в кілька шарів передбачає такі параметри (див. рис. 2): d – діаметр по осі витка троса на барабані; D_1 – діаметр вала барабана; s – крок намотки витків троса; n – кількість обертів барабану лебідки, що вимірюється енкодером.

Власне батометр має зовнішній циліндр та внутрішній герметичний циліндр, що закріплено на стійці. На торцях зовнішнього циліндра з обох боків виконано по три отвори діаметром d_2 для забору проб води. Ці отвори відкриваються і закриваються заслінками, що мають кутовий привід повороту на 45 град. від сервоприводів. Пробка служить для сливу води з батометра в лабораторії.

Дрон прилітає на точку водойми для забору проби води і після включення двигуна лебідки опускають батометр у воду. При цьому обчислення величини L

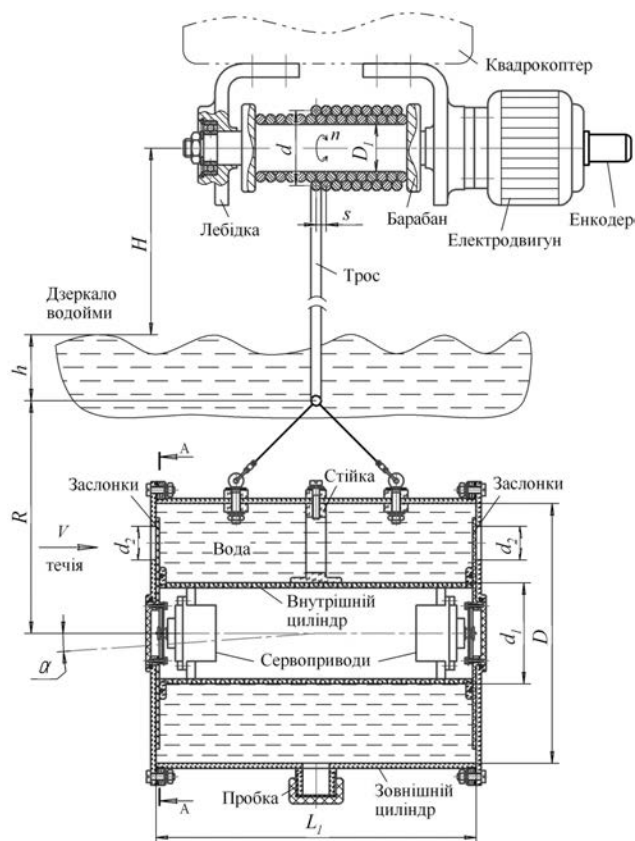


Рис. 2. Конструкція технологічного оснащення дрону (див. перетин А-А на рис. 1)

опускання батометру у воду здійснюють за формулою $L = H + h = H + n\sqrt{s^2 + (\pi d)^2} + R$, де H – висота зависання пристрою над поверхнею води (див. рис. 2); h – величина заглиблення батометра до відкриття його кришок; n – кількість обертів барабану лебідки; s – крок намотки витків троса; d – діаметр по осі витка троса на барабані; π – математична константа; R – відстань від осі симетрії батометра до точки його кріплення до троса.

Після досягнення заданої глибини, яку визначають за вказаною формулою, включають сервоприводи, які повертають заслінки на певний кут (наприклад, на 45 град.) і тим самим відкривають отвори d_2 (по три штуки з кожної сторони). За певний час t (який визначено далі) батометр заповнюється водою, після чого здійснюють реверс сервоприводів і заслінки закривають отвори d_2 , далі батометр підіймають у вихідне положення і доставляють в лабораторію.

Математична модель процесу забору проб води. Математична модель відображає параметричний синтез процесу занурення батометра у водойму і містить вперше отримані аналітичні залежності траєкторії руху, швидкості та часу заповнення батометра залежно від швидкості течії, тиску та глибини на різних об'єктах водойми.

Процес занурення батометра. Для занурення у рідину батометра масою m , що має форму круго-

вого циліндра діаметром D і довжиною L_1 , повинна виконуватись умова: вага батометра $G = mg$ має бути більшою за силу Архімеда, що виштовхує батометр, $G_A = \rho g \frac{\pi D^2}{4} L_1$ (де ρ – густина рідини, для води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $g = 9.8 \text{ м/с}^2$ – прискорення земного тяжіння). Надалі, уважаємо, що умова виконується, тобто

$$G > G_A. \quad (1)$$

Батометр кріпиться до троса і, змінюючи натяг троса, можна регулювати процес занурення приладу до необхідної глибини, але при цьому час занурення буде значно більший, ніж при нульовому зусиллі у тросі, коли занурення відбувається під дією власної ваги батометра. Виберемо початок системи координат на поверхні водойми. Вісь Oy направимо вертикально вниз, а вісь Ox у напрямку течії водойми. Відлік ординати будемо проводити від поверхні водойми до нижнього краю циліндра (рис. 3, а).

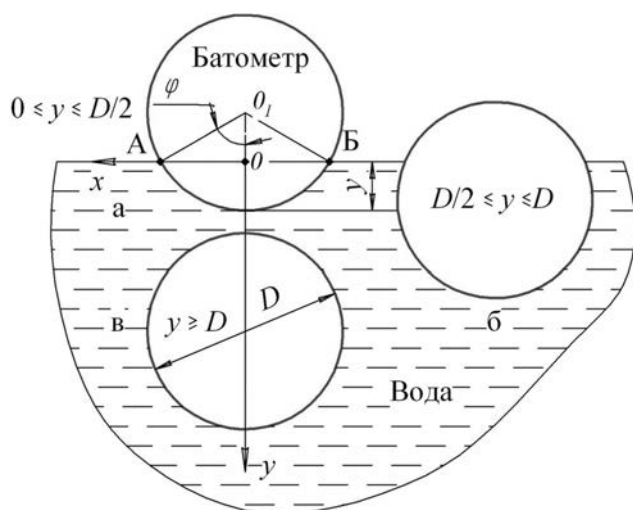


Рис. 3. Етапи занурення батометра у водойму

Під час руху на тіло (тобто батометр) будуть діяти три вертикальні сили: сила власної ваги батометра, сила Архімеда, що виштовхує батометр, і сила R_f опору середовища, яка залежить від квадрату швидкості u^2 занурення, густини рідини ρ і площі S_y характерного перерізу перпендикулярного до вісі Oy , а саме $R_f = k\rho S_y u^2$, де k – безрозмірний коефіцієнт, який визначається з експерименту.

Розглянемо три етапи занурення. Першому етапу руху відповідає положення батометра, що показано на рис.3 (а), коли $0 \leq y \leq D/2$. Диференціальне рівняння руху тіла, тобто батометра, матиме вигляд

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - \rho g V_y - k\rho S_y u^2, \quad (2)$$

де V_y – об'єм витісненої рідини; S_y – площа характерного перерізу; k – безрозмірний коефіцієнт, який визначається з експерименту, $k = \frac{(mg - \rho g V)}{u^2 \rho S_y}$; $u = \frac{dy}{dt}$ – швидкість занурення тіла; ρ – густина рідини; об'єм батометра $V = \frac{\pi D^2}{4} L_1$. З рис.3 (а) видно, що $OO_1 = D/2 - y$,

$$\text{тоді } OA = OB = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - y\right)^2};$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{OO_1}{D/2}\right) = \arccos\left(\frac{D-2y}{D}\right), \text{ а також:}$$

$$V_y = \left(\varphi \left(\frac{D}{2}\right)^2 - \frac{1}{2} 2OA \times OO_1\right) L_1, \quad (3)$$

$$S_y = 2OA \times L_1 = 2L_1 \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - \left(\frac{D}{2} - y\right)^2}. \quad (4)$$

Диференціальне рівняння (2) можна розв'язувати числовими методами при початкових умовах $t=0, u=0, y=0$. Наприкінці першого етапу $t=t_1, u=u_1, y=D/2$.

На другому етапі (рис. 3, б) ордината змінюється у межах $D/2 \leq y \leq D$. Запишемо диференціальне рівняння руху тіла на другому етапі

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - \rho g V_y - k\rho S_o u^2, \quad (5)$$

де $S_o = DL_1$, а V_y обчислюється за тією ж формулою (3) тільки при інших значеннях y .

Диференціальне рівняння (5) також розв'язується числовими методами при початкових умовах $t=t_1, u=u_1, y=D/2$. Наприкінці другого етапу $t=t_2, u=u_2, y=D$.

На третьому етапі (рис. 3, в) ордината $y \geq D$, тобто батометр повністю занурений у рідину. Запишемо диференціальне рівняння руху тіла на третьому етапі

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - \rho g V - k\rho S_o u^2, \quad (6)$$

$$\text{де } V = \frac{\pi D^2}{4} L_1.$$

Диференціальне рівняння (6) розв'яжемо аналітично при початкових умовах $t=t_2, u=u_2, y=D$. Ураховуємо, що $\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{du}{dt}$, підставляємо в рівняння (6), відокремлюємо змінні і інтегруємо

$$\int_{t_2}^t dt = \int_{u_2}^u \frac{m du}{mg - \rho g V - k\rho S_o u^2}. \quad (7)$$

Після інтегрування (7) одержимо рівність

$$t = t_2 + \frac{m}{2\sqrt{g(m - \rho V)k\rho S}} \ln\left(\frac{q_1(u)q_2(u_2)}{q_1(u_2)q_2(u)}\right), \quad (8)$$

де позначено:

$$q_1(u) = \sqrt{g(m - \rho V)} + \sqrt{k\rho S} u; \quad q_2(u) = \sqrt{g(m - \rho V)} - \sqrt{k\rho S} u.$$

З іншого боку $\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{du}{dt} = u \frac{du}{dy}$. Знову підставляємо в диференціальне рівняння (6), відокремлюємо змінні і інтегруємо

$$\int_D^y dy = \int_{u_2}^u \frac{m u du}{mg - \rho g V - k\rho S_o u^2}. \quad (9)$$

Після інтегрування отримаємо рівність

$$y - D = -\frac{m}{2k\rho S_o} \ln \left(\frac{mg - \rho gV - k\rho S_o u^2}{mg - \rho gV - k\rho S_o u_2^2} \right). \quad (10)$$

Потенціюємо рівність (10) і розв'яжемо її відносно швидкості

$$u = \sqrt{\frac{1}{k\rho S_o} (mg - \rho gV - (mg - \rho gV - k\rho S_o u_2^2)e^{-q(y)})}, \quad (11)$$

де $q(y) = 2k\rho S_o(y - D) / m$.

Водойма має швидкість течії v_1 , а тому батометр буде переміщатись і у напрямку вісі Ox , а саме $x = v_1 t$. Розрахунки проводились при таких значеннях величин: $m = 2 \text{ кг}$, $D = 0.12 \text{ м}$, $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $g = 9.8 \text{ м/с}^2$, $L_1 = 0.1 \text{ м}$, $H = 1 \text{ м}$, $v_1 = 3 \text{ м/с}$, $d_1 = 0.4D$, $d_2 = 0.02 \text{ м}$.

Як видно з наведених нижче графіків безрозмірний коефіцієнт k , який враховує співвідношення густини рідини, швидкості занурення та об'єму батометра (див. формулу (2)), суттєво впливає на залежності глибини, швидкості занурення та переміщення батометра від часу. На графіках рис. 4, 5, 6 пунктирні лінії відповідають значенню $k = 0.001$, суцільні лінії – значенню $k = 0.2$, штрих-пунктирні – значенню $k = 0.3$.

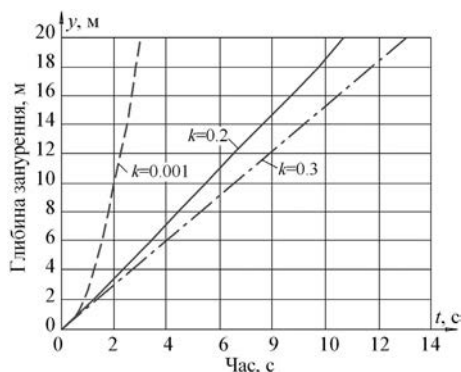


Рис. 4. Залежність глибини занурення батометру від часу

Так з графіку рис. 4 видно, що при досить малих значеннях вказаного коефіцієнту процес занурення батометру значно пришвидшується і, навпаки, при збільшенні – суттєво уповільнюється.

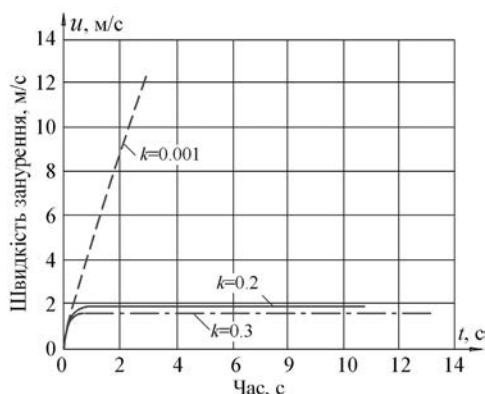


Рис. 5. Залежність швидкості занурення батометру від часу

На цьому графіку (рис. 5) видно, що при співвідношеннях густини рідини, швидкості занурення та об'єму батометра, коли $k = 0.2 \dots 0.3$, швидкість занурення батометра стабілізується, що вкрай важливо для програмування приводу лебідки, на тросі якої встановлено батометр.

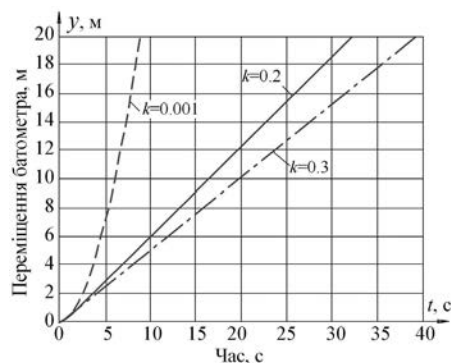


Рис. 6. Траєкторія руху батометра

І нарешті, графік рис. 6 ілюструє залежність переміщення батометра від часу, а саме: при малих значеннях вказаного коефіцієнту переміщення батометру значно пришвидшується і, навпаки, при збільшенні – суттєво уповільнюється.

Досить часто вважають, що сила опору рідини пропорційна першій степені швидкості тіла, тобто $R_1 = k_1 \rho S_o u$ (тільки тут коефіцієнт k_1 має розмірність м/с), причому $k_1 = \frac{(mg - \rho gV)}{u \rho S_o}$. Тоді диференціальне рівняння для третього етапу мало б вигляд

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u. \quad (12)$$

Розв'язавши рівняння (12), отримаємо залежності для часу t заповнення батометра та його переміщення y :

$$t = t_2 - \frac{m}{k_1 \rho S_o} \ln \left(\frac{mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u}{mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u_2} \right). \quad (13)$$

$$y = D + \frac{m}{(k_1 \rho S_o)} (u_2 - u) + \frac{mg - \rho gV}{(k_1 \rho S_o)^2} \ln \left(\frac{mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u_2}{mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u} \right). \quad (14)$$

З рівності (13) знаходимо швидкість руху батометра як функцію часу

$$u = \frac{1}{k_1 \rho S_o} (mg - \rho gV - (mg - \rho gV - k_1 \rho S_o u_2) e^{-q_4}), \quad (15)$$

$$\text{де } q_4 = \frac{k_1 \rho S_o (t - t_2)}{m}.$$

На графіках (рис. 7, 8, 9) пунктирні лінії відповідають значенню $k_1 = 0.001 \text{ м/с}$, суцільні лінії – значенню $k_1 = 0.2 \text{ м/с}$, штрих-пунктирні – значенню $k_1 = 0.3 \text{ м/с}$. Аналогічно вказаним вище ефектам з цих графіків видно наскільки суттєво співвідношення густини рідини, швидкості занурення та об'єму батометра, що враховується означеним коефіцієнтом, впливає на зміни глибини та швидкості занурення батометра, а також на траєкторію його руху. Порівнюючи графіки рис. 4 та рис. 7, становиться очевидним, що при вико-

ристанні рівняння (12) загальний час занурення батометра скорочується з 14 с до 9 с, тобто майже 35%, що суттєво для економії ресурсу автономних енергетичних джерел безпілотних літальних апаратів.

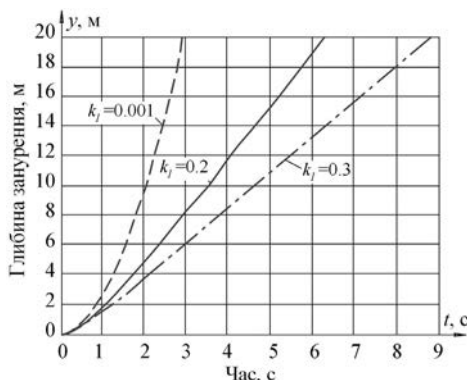


Рис. 7. Залежність глибини занурення батометру від часу

Але стабілізація швидкості занурення батометра, як це ілюструє графік рис. 8, настає значно пізніше, що також слід враховувати при програмуванні приладу лебідки, що опускає батометр у воду.

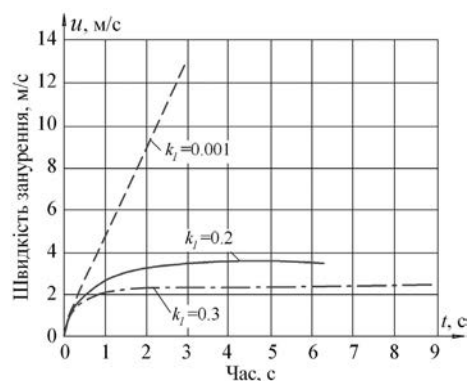


Рис. 8. Залежність швидкості занурення батометра від часу

Аналогічні ефекти спостерігаються на траєкторії руху батометра (рис. 9), тобто при малих значеннях коефіцієнта $k=0.001$ переміщення батометра пришвидшується, а при суттєво більших значеннях $k=0.2 \dots 0.3$ – уповільнюється.

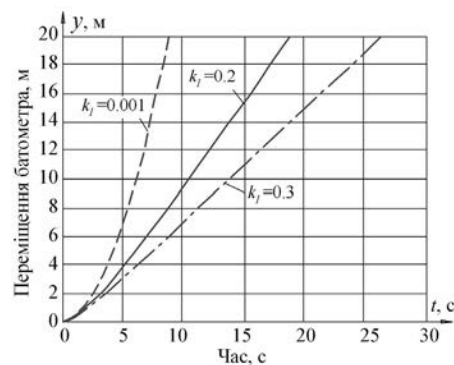


Рис. 9. Траєкторія руху батометра

Необхідна довжина троса, на якому встановлено батометр, залежить і від глибини занурення батометра, і від швидкості течії, а саме:

$$L_{TP} \geq \sqrt{(H + y_{\max})^2 + (v_1 t_{\max})^2}. \quad (16)$$

Час підйому приладу залежить від кутової швидкості ω (рад / с) барабана лебідки (див. рис. 2)

$$t_4 = \frac{2\sqrt{(H + y_{\text{зан.}})^2 + (v_1 t_{\text{зан.}})^2}}{\omega d}. \quad (17)$$

Процес наповнення батометра рідиною. Уважимо, що після досягнення приладом запланованої глибини трос стопориться, щоб течія не зносила прилад далі. Як відомо з гідравліки, розхід Q рідини за одиницю часу через отвір площею S виражається формулою

$$Q = \mu S \sqrt{2 \frac{p_1 - p_2}{\rho}}, \quad (18)$$

де коефіцієнт тертя $\mu = 0.6$, p_1 , p_2 – значення тисків, ρ – густина рідини.

В даному випадку для трьох отворів потрібно врахувати ще тиск течії, тобто $p_1 = v_1^2 \rho + p_a + \gamma p g$, а для інших трьох отворів $p_1 = p_a + \gamma p g$ (p_a – атмосферний тиск). Уважимо, що тиск p_2 зростає від p_a пропорційно заповненому об'єму, а саме:

$$p_2 = p_a + \rho g y \frac{V_1}{V_o}, \quad (19)$$

де V_1 – змінне значення об'єму рідини ($0 \leq V_1 \leq V_o$), $V_o = \frac{\pi(D^2 - d_1^2)}{4} L_1$.

Підставимо вирази для тисків у вираз (18)

$$Q = 3\mu S_1 \sqrt{2} (\sqrt{v_1^2 + \gamma g(1 - V_1/V_o)} + \sqrt{\gamma g(1 - V_1/V_o)}), \quad (20)$$

де $S_1 = \frac{\pi d_1^2}{4}$ – площа одного отвору.

Тоді процес наповнення батометра можна описати диференціальним рівнянням

$$\frac{dV_1}{dt} = 3\mu S_1 \sqrt{2} (\sqrt{v_1^2 + \gamma g(1 - V_1/V_o)} + \sqrt{\gamma g(1 - V_1/V_o)}). \quad (21)$$

Відокремлюємо змінні і інтегруємо

$$\int_0^{V_o} dt = \frac{1}{3\mu S_1 \sqrt{2}} \int_0^{V_o} \frac{dV_1}{\sqrt{v_1^2 + \gamma g(1 - V_1/V_o)} + \sqrt{\gamma g(1 - V_1/V_o)}}. \quad (22)$$

Після інтегрування одержимо час наповнення батометра залежно від швидкості течії і глибини занурення

$$t = \frac{V_o \sqrt{2}}{9\mu S_1 g v_1^2} (\sqrt{(v_1^2 + \gamma g)^3} - v_1^3 - \sqrt{(\gamma g)^3}). \quad (23)$$

На основі формули (23) побудовані графіки на рис. 10, де пунктирна лінія відповідає швидкості течії $v_1 = 1$ м/с; суцільна лінія – $v_1 = 3$ м/с; штрих-пунктирна лінія – $v_1 = 5$ м/с, суцільна чорна – $v_1 = 0.01$ м/с. Як видно з рис. 10 при збільшенні глибини занурення батометра час його наповнення значно зменшується, що пояснюється значно більшим тиском на великих глибинах водою.

У разі наближення швидкості течії до нуля, тобто коли у формулі (23) при $v_1 \rightarrow 0$ і чисельник, і знаменник прямують до нуля, а тому потрібно знаходити границю

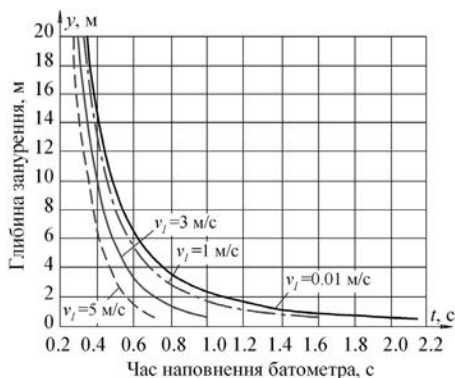


Рис. 10. Залежність часу наповнення батометра від глибини занурення і швидкості течії у водоймі

$$t = \frac{V_0 \sqrt{2}}{9\mu S_1 g y} \lim_{v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\sqrt{(v_1^2 + yg)^3} - v_1^3 - \sqrt{(yg)^3}}{v_1^2} \right).$$

Для знаходження границі використаємо правило Лопітала, згідно якому потрібно взяти похідні по змінній v_i окремо від чисельника і знаменника, тобто

$$t = \frac{V_0 \sqrt{2}}{9\mu S_1 g y} \lim_{v_i \rightarrow 0} \left(\frac{\frac{3}{2} \sqrt{(v_1^2 + yg)} 2v_1 - 3v_1^2}{2v_1} \right).$$

Після скорочення на v_i і підстановки $v_i = 0$ отримаємо формулу для часу заповнення батометра при відсутності течії у водоймі

$$t = \frac{V_0 \sqrt{2}}{6\mu S_1 \sqrt{gy}}.$$

Отже, при заданій глибині занурення сумарний час взяття проб води складається з часу занурення (визначається за графіком рис. 4), часу наповнення (визначається за графіком рис. 10) і часу підйому, що визначається за формулою (17).

Головні висновки. Оснащення батометра заслінками із сервоприводом дозволяє, не тільки здійснювати дистанційне керування відкриттям і закриттям отворів для забору води, а ще й уникнути турбулентності потоку заходу води в батометр і наблизити режим потоку води, що забирається в батометр, до стану близького до ламінарного потоку.

Розроблена математична модель дозволяє здійснювати аналіз і прогнозування процесу забору проб води в сукупності технічних параметрів батометрів та поточних характеристик потоку на різних об'єктах глибини водойм.

Надані графоаналітичні залежності глибини занурення батометра, часу заповнення його водою та траєкторії переміщення з урахуванням швидкості течії та тиску на різних об'єктах глибини водойм забезпечують можливість прогнозування процесу забору проб води та сприяють підвищенню об'єктивності означеного процесу.

Досліджено процеси занурення та наповнення пристрою для забору проб води з урахуванням співвідношення його ваги та сили Архімеда, що протидіє зануренню батометра, надані відповідні аналітичні залежності.

Перспективи використання результатів дослідження. Використання безпілотних літальних апаратів у вигляді квадрокоптерів чи мультикоптерів для виконання операцій екологічного моніторингу є перспективним напрямком, оскільки запобігає забрудненню навколишнього середовища. В остаточному підсумку розроблена вперше аналітична модель процесу забору проб води дозволяє не тільки здійснювати імітаційне моделювання означеного процесу, що сприяє зменшенню собівартості технологічних операцій моніторингу водойм, але й надасть можливість науковцям та інженерам в сфері моніторингу екологічного стану різноманітних водойм створювати аналогічне обладнання залежно від інших виробничих завдань.

Дослідження виконувались у межах проекту Національного фонду досліджень України № 2023.04/0077 «Дрон для забору проб води».

Література

1. Кримець Г. Відбір проб води для аналізу. УкрХімАналіз. Київ, 2018. URL: <https://himanaliz.ua/uk/vidbir-prob-vodi-dlya-analizu/> (дата звернення: 25.01.2025).
2. Опис відбору зразків. Osnova. Дніпро, 2025. URL: <https://chemosnova.com.ua/ua/poslugi/opis-vidbiru-zrazkiv/>
3. Методичні вказівки до самостійної роботи та практичних занять з дисципліни «Санітарно-гігієнічні основи водопостачання та водовідведення» (для студентів 6 курсу денної форми навчання спеціальності 8.17020201 – Охорона праці (за галузями)) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова; уклад.: О. О. Ковальова. – Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 55 с.
4. Quick Guide to Drinking Water Sample Collection. United States Region 8 Laboratory September 2016. Environmental 16194 W. 45th Dr. Protection Agency Golden, CO 80403. 2016, p. 20.
5. Ролік О.І., Поліщук М.М. Дрон для забору проб води. Заявка на видачу патенту України на винахід; МПК В64С 39/02, № а202304700. Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій. Дата реєстрації 05.10.2023, 12 с.
6. Mir Zafarullah. Water sampling, procedure, purpose, techniques and equipments. Pakistan, Aug. 20, 2017, p. 26.
7. Polishchuk M., Rolik O. Improvement of Technological Equipment Drone for Water Sampling: Design and Modeling. FME Transactions, Volume 52, No 2, 2024, pp. 237-245. doi: 10.5937/fme2402237P
8. Heather Lally, Ian O'Connor, Liam Broderick, Mark Broderick, Olaf Jensen and Conor Graham. Assessing the Potential of Drones to Take Water Samples and Physico-chemical Data from Open Lakes. EPA RESEARCH PROGRAMME 2014–2020. Published by the Environmental Protection Agency, Ireland ISBN: 978-1-84095-942-0. P. 40.
9. Harish Puppala; Pranav R. T. Peddinti; Byungmin Kim; Manoj Kumar Arora. Unmanned aerial vehicles for planning rooftop rainwater harvesting systems: a case study from Gurgaon, India. Water Supply (2023) 23 (5): 2014–2030 <https://doi.org/10.2166/ws.2023.105>
10. Tafadzwanashe Mabhaudhi, Tsitsi Bangira, Mbulisi Sibanda, and Olufunke Cofie. Use of drones to monitor water availability and quality in irrigation canals and reservoirs for improving water productivity and enhancing precision agriculture in smallholder farms. Methodological protocol for monitoring water quality and quantity December 2022, <https://www.iwmi.cgiar.org/>
11. Gnanavelu A. Water sampling and preservation techniques. CPCB, Bangalore, 2024, p. 23–25.
12. G.K. Khadse. Collection and Preservation of Samples and Field Analysis Presented at: Training Programme on QAQC in Water Quality Monitoring and Assessment, Oct. 21-22, 2010, 32 p.

УДК 504.064.2

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.4>

АКТУАЛЬНА ДИНАМІКА ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ВОДИ РІЧКИ ДНІПРО В МЕЖАХ ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Шахман І.О., Бистрянцева А.М., Чвартковська А.О.

Херсонський державний університет
вул. Університетська, 27, 73000, м. Херсон
shakhman.i.a@gmail.com

В умовах кліматичних змін та російської військової агресії проблема забезпечення України прісною водою належної якості набула особливої актуальності. Річка Дніпро – стратегічне джерело водопостачання країни – дедалі більше піддається антропогенному навантаженню та деструктивному впливу війни. У той час, коли потреба у воді зростає, її якість та доступність опиняються під загрозою.

Стаття присвячена аналізу динаміки показників якості води річки Дніпро в межах Черкаської області за 2022–2024 роки та перспектив її використання.

Проведений аналіз впливу виробничої діяльності підприємств різних галузей економіки Черкаської області на стан поверхневих водних ресурсів річки Дніпро в межах регіону та визначені основні джерела забруднення поверхневих водних ресурсів басейну р. Дніпро в межах території дослідження.

Виконана обробка даних моніторингу поверхневих вод для поста спостереження р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке водосховище) за 2022–2024 роки за десятьма показниками якості води. Встановлені перевищення середньорічних концентрацій гідрохімічних інгредієнтів відносно гранично допустимих показників за рибогосподарськими нормативами від 1,2 (біологічне споживання кисню, азот амонійний) до 42,5 разів (нітриди), нормативами питних потреб – від 1,2 (азот амонійний) до 61,2 разів (завислі речовини), культурно-побутовими та рекреаційними нормативами – від 1,2 (хімічне споживання кисню, азот амонійний) до 20,4 (завислі речовини).

Результати оцінки якості річкової води за комплексом методик за останні три роки спостережень показують стабільно низьку якість, характеристика якої змінюється залежно від обраної методики за рибогосподарськими нормативами від “дуже брудної” до “катастрофічної”, за нормативами питних потреб – від “помірно забрудненої” до “катастрофічної”, за культурно-побутовими та рекреаційними нормативами – від “чистої” до “катастрофічної”.

Отримані результати демонструють, що якість води річки Дніпро в межах Черкаської області обмежує застосування поверхневих вод для рибогосподарських, питних, культурно-побутових і рекреаційних потреб без попередньої їх підготовки.

Ключові слова: якість води, джерела забруднення, річка Дніпро, Черкаська область, нормативи, гідрохімічні показники.

Contemporary Dynamics of Water Quality Indicators of the Dnipro River within the Cherkasky Region. Shakhman I., Bystriantseva A., Chvartkovska A.

In the context of climate change and russian military aggression, the issue of ensuring Ukraine's supply of high-quality freshwater has become particularly urgent. The Dnipro River, a strategic source of the country's water supply, is increasingly exposed to anthropogenic pressures and the destructive impact of war. At a time when the demand for water is rising, its quality and availability are under serious threat.

The article is devoted to the analysis of the dynamics of water quality indicators of the Dnipro River within the Cherkasky Region during the period 2022–2024 and the potential for its use.

An analysis of the impact of industrial activities from various sectors of the economy in the Cherkasky Region on the state of surface water resources of the Dnipro River within the region was conducted. The main sources of pollution of the surface water resources of the Dnipro River basin within the study area were identified.

Monitoring data on surface water at the observation post on the Dnipro River near the village of Sokyrne (Kremenchuk Reservoir) for the period 2022–2024 were processed for ten water quality indicators. Exceedances of average annual concentrations of hydrochemical components relative to maximum permissible levels were identified: according to fisheries standards – from 1.2 times (biochemical oxygen demand, ammonium nitrogen) to 42.5 times (nitrites); according to drinking water standards – from 1.2 times (ammonium nitrogen) to 61.2 times (suspended solids); and according to cultural, domestic, and recreational standards – from 1.2 times (chemical oxygen demand, ammonium nitrogen) to 20.4 times (suspended solids).

The results of river water quality assessment based on a set of methodologies over the past three years of observations indicate consistently low water quality. The classification varies depending on the methodology applied: according to fisheries standards – from “heavily polluted” to “catastrophic”; according to drinking water standards – from “moderately polluted” to “catastrophic”; and according to cultural, domestic, and recreational standards – from “clean” to “catastrophic”.

The obtained results demonstrate that the water quality of the Dnipro River within the Cherkasky Region limits the use of surface waters for fisheries, drinking, domestic, and recreational purposes without prior cleaning. *Key words:* water quality, sources of pollution, the Dnipro River, the Cherkasky Region, standards, hydrochemical indicators.

Постановка проблеми. Комунальний заклад “Черкаський обласний інформаційно-аналітичний центр медичної статистики”, узагальнюючи оперативні дані про стан здоров'я населення, відзначив зниження показника захворюваності населення Черкаської області у 2023 році порівняно з 2021, 2022 роками, який становив 10329,42 на 10 тис. всього населення регіону за перші 9 місяців

(2021 рік – 12800,0; 2022 – 12730,1, відповідно) [1]. Проте, спеціалісти Державної установи “Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров’я України” за результатами моніторингу систематично фіксують відхилення від гігієнічних вимог за мікробіологічними та санітарно-хімічними показниками [2] і звертають увагу на потенційну небезпеку.

У 2023 році в Черкаській області зменшено обсяг водозабору з поверхневих джерел на 1,5 млн м³ [3] і збільшено водозабір з підземних джерел на 1,4 млн м³, що безумовно сприяє підвищенню якості води питного водопостачання і зменшенню хвороб, пов’язаних з використанням неякісної води. Однак, в регіоні постійно фіксуються перевищення мікробіологічних (ентерококи, загальне мікробне число), санітарно-хімічних показників (амоній, сульфати, хлориди, марганець, залізо загальне, нітрати, сухий залишок, смак і присмак, забарвленість, водневий показник та ін.) в джерелах водопостачання як для питних, так і для інших потреб [2, 3, 4].

Актуальність дослідження. Незважаючи на те, що 58 % водних ресурсів України зосереджено в річках басейну річки Дунай, формування водних ресурсів, які найбільш доступні для широкого використання, в основному, відбувається в басейнах інших річок, серед яких на першому місці – річка Дніпро [5]. Після підриву російськими окупантами греблі Каховської ГЕС і знищення Каховського водосховища збільшено навантаження водопостачання та водовідведення на п’ять водосховищ Дніпровського каскаду, які знаходяться вище за течією. Серед них найбільше водосховище в Україні – Кременчуцьке, воду якого використовують для забезпечення населення, різних секторів економіки, рекреації. Тому, регулярні моніторинг та оцінка якості дніпровської води надзвичайно актуальні.

Зв’язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Водна стратегія України на період до 2050 року є одним з основних документів, направлених на визначення основних засад державної політики щодо управління водними ресурсами на засадах сталого розвитку [6]. Однією з передумов як збалансованого розвитку країни, так і зміцнення здоров’я людини є задовільний стан поверхневих та підземних водних ресурсів. Відповідно до Проєкту Короткого звіту щодо прогресу впровадження Протоколу про воду і здоров’я в Україні у 2022–2024 роках до Конвенції ЄЕК ООН [7, 8] другий національний цільовий показник (НПЦ 2) проголошує “Забезпечення безпечності та якості питної води за хімічним складом, зокрема шляхом зменшення кількості питної води, що не відповідає нормативам за хімічними показниками” [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В переліку найважливіших екологічних проблем загальнодержавного значення Черкаської області фахівці вже не один рік поспіль наводять “порушення

гідрологічного та гідрохімічного режиму малих річок області” [3, 9–11], частина з яких є притоками 2-го порядку р. Дніпро. Зміна якості води поверхневих вод відбувається під антропогенним впливом основних джерел забруднення території дослідження: підприємства ВП “Хлистунівський кар’єр”, КП “Чигирин”, КП “ВОДГЕО”, КП “Водоканал” м. Золотоноша та інші. Зросли кількісні показники використання води як для промислових підприємств: з 25,83 млн м³ (2022 р.) до 31,704 млн м³ (2023 р.), так і в сільському господарстві: з 57,99 млн м³ (2022 р.) до 62,379 млн м³ (2023 р.) [3, 9–11]. Спостерігається різке збільшення обсягів скинутих зворотних вод у поверхневі водні об’єкти без очищення майже в 12 разів: від 0,031 млн м³ у 2022 році до 0,360 млн м³ у 2023 році [3, 9–11], які відповідно призвели до зростання у 2023 році обсягів надходження у річки та водойми таких забруднюючих речовин як завислі речовини, нітрати, нітроти, сульфати, сухий залишок, хлориди, хімічне споживання кисню, залізо, кадмій, мідь, нафтопродукти. Максимальна кількість випадків перевищення гранично допустимих концентрацій (2023 р.) на постах спостереження басейну річки Дніпро в межах Черкаської області: біологічне споживання кисню (БСК₅) в 12 разів, хімічне споживання кисню (ХСК) в 12 разів, завислі речовини в 3 рази, залізо загальне в 3 рази [3, 11].

За даними Черкаського обласного центру з гідрометеорології програми діагностичного моніторингу масивів поверхневих вод басейну р. Дніпро по 7 пунктам спостережень у 2023 році за фізико-хімічними показниками спостерігалися “випадки незадовільного кисневого режиму” (р. Вільшанка), БСК₅=7,4 мгО₂/дм³ (р. Золотоношка), ХСК=124 мгО₂/дм³ (р. Росава), нітроген нітритний 2,64 мгN/дм³ (р. Росава) [3]. Спеціалісти Регіонального офісу водних ресурсів у Черкаській області у 2023 році відзначають перевищення по посту спостереження р. Дніпро – с. Сокирне: БСК₅ в 1,2–1,6 рази, завислим речовинам у грудні в 1,2 рази (за нормативами екологічної безпеки водних об’єктів), ХСК в 2,8 рази, заліза загального в 1,7 рази (гігієнічні нормативи якості води). Порівняно з 2022 роком збільшилися “гідрохімічні показники (азотна група, ХСК, БСК₅, фосфати, фосфор загальний)” [3, 12]. Фахівці Державної екологічної інспекції Центрального округу оприлюднили результати інструментально-лабораторного контролю якості поверхневих вод у 2023 році, відповідно до яких на р. Дніпро (Кременчуцьке водосховище) зафіксовано 26 випадків перевищень нормативів гранично допустимих концентрацій по БСК₅, ХСК, залізу, азоту амонійному, нітратам, АПАР [3, 13].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проаналізовано джерела забруднення поверхневих водних ресурсів в межах Черкаської області. Виконано оцінку якості води для поста спостереження р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке

водосховище) питний в/з м. Черкаси (678 км від гирла) за 2022–2024 роки.

Новизна. Визначено актуальну динаміку показників якості води р. Дніпро в межах Черкаської області за комплексом методик за 2022–2024 роки відповідно до показників діючих нормативів поверхневих водних об'єктів рибогосподарського, питного і культурно-побутового та рекреаційного призначення.

Методологічне або загальнонаукове значення. Визначена необхідність комплексного управління поверхневими водними ресурсами басейнів річок з метою гармонійного поєднання забезпечення соціально-економічних потреб суспільства та охорони водних екосистем.

Викладення основного матеріалу. Аналіз динаміки показників якості води річки Дніпро в межах Черкаської області та оцінка якості річкової води проведена за даними моніторингу поверхневих вод Державного агентства вод за 2022–2024 роки [14].

Початкове оцінювання якості річкової води за індексами забруднення води (ІЗВ та модифікований ІЗВ) за загальноприйнятою методикою [15–18] відповідно до показників всіх нормативів [19] показало погіршення якості води у 2023, 2024 роках за нормативами питних потреб і потреб культурно-побутового та рекреаційного призначення (таблиця 1).

Результати другого етапу дослідження якості води за комбінаторним індексом забруднення води за встановленим алгоритмом [15–18] демонструють стабільно низьку якість від категорії “брудна” (рибогосподарські та культурно-побутові нормативи) до “дуже брудна” (показники питних потреб) за три роки дослідження (таблиця 1).

Третім етапом проведено інтегральне оцінювання якості води за коефіцієнтом забруднення води χ з пріоритетами і без пріоритетів. Показники якості річкової води змінюються при розрахунку без пріоритетів: від малої за нормативами культурно-побутових та рекреаційних вод до катастрофічної для водних об'єктів, призначених для питних потреб; з пріоритетами: якість річкової води змінюється від інтенсивної за нормативами культурно-побутових та рекреаційних потреб до катастрофічної для водних об'єктів, призначених для питних та рибогосподарських потреб (таблиця 1).

Зведені результати оцінювання якості води р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке водосховище) питний в/з м. Черкаси (678 км від гирла) говорять переважно про катастрофічний стан поверхневих водних ресурсів у 2022–2024 роках. Відзначається незначне зниження ступеня забруднення води у 2023, 2024 роках при оцінюванні якості води водних об'єктів, призначених для культурно-побутового та рекреаційного призначення, до категорії “інтенсивна”.

Стійка тенденція низької якості води за період дослідження обумовлюється найбільш високими показниками перевищення відносно нормативних значень по завислим речовинам, нітратам і хімічному споживанню кисню (таблиця 2).

Основні джерела забруднення поверхневих вод в Черкаській області – підприємства промисловості, сільського та комунального господарств у 2023 році використали 118,4 млн м³ свіжої води: на виробничі потреби – 68,2 млн м³, на зрошення – 26,6 млн м³, на питні та санітарно-гігієнічні потреби – 23,5 млн м³. Регіон залишається одним з лідерів по виробництву мінеральних добрив, фармацевтичної продукції, автобусів, тканин. На Черкащині працює 279 підприємств

Таблиця 1

Результати оцінювання якості води за різними методиками р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке водосховище) за нормативами поверхневих вод за 2022–2024 роки

Рік	Якісна оцінка ступеня забруднення				
	Індекс забруднення води (ІЗВ)	Модифікований індекс забруднення води (ІЗВ)	Комбінаторний індекс забруднення води (КІЗ)	Коефіцієнт забруднення вод χ з пріоритетами	Коефіцієнт забруднення вод χ без пріоритетів
рибогосподарського призначення					
2022	дуже брудна	дуже брудна	брудна	інтенсивна	катастрофічна
2023	дуже брудна	дуже брудна	брудна	істотна	катастрофічна
2024	дуже брудна	дуже брудна	брудна	істотна	катастрофічна
питних потреб					
2022	помірно забруднена	забруднена	дуже брудна	катастрофічна	катастрофічна
2023	помірно забруднена	надзвичайно брудна	дуже брудна	катастрофічна	катастрофічна
2024	помірно забруднена	надзвичайно брудна	дуже брудна	інтенсивна	катастрофічна
культурно-побутового та рекреаційного призначення					
2022	чиста	чиста	брудна	припустима	катастрофічна
2023	чиста	забруднена	брудна	мала	інтенсивна
2024	чиста	забруднена	брудна	мала	інтенсивна

Таблиця 2

Перевищення показників забруднюючих речовин відносно нормативних для поста спостереження р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке водосховище) за нормативами поверхневих вод за 2022–2024 роки

Рік	Показники / Норматив ($C_{сер}$ /ГДК)		
	Завислі речовини, мг/дм ³	Нітрити, мг/дм ³	Хімічне споживання кисню, мг/дм ³
рибогосподарського призначення			
2022	0,80	42,5	1,8
2023	0,60	40,0	1,7
2024	0,57	37,5	2,2
питних потреб			
2022	61,2	6,8	7,3
2023	51,6	6,4	6,9
2024	46,0	6,0	8,6
культурно-побутового та рекреаційного призначення			
2022	20,4	1,0	1,2
2023	17,2	1,0	1,2
2024	15,3	0,9	1,4

хімічної промисловості. Найпотужніші з них ПрАТ “Азот” (виробництво добрив і азотних сполук), ТОВ “УКАВІТ САЙЕНС ПАРК” (виробництво пестицидів та іншої агрохімічної продукції) [20]. Обсяги забраної води на зрошення зросли з 18,3 млн м³ у 2021 році до 26,6 млн м³ у 2023 році. Неякісне очищення стічних промислових та комунально-побутових вод, використання в сільському господарстві добрив с азотом призводить до забруднення поверхневих вод солями азотної кислоти, що спричинює не тільки зниження якості води, а й погіршення здоров’я населення.

Головні висновки. Виконана оцінка якості води за комплексом методик для річки Дніпро в межах Черкаської області відповідно до нормативів поверхневих водних об’єктів. Результати дослідження за комбінаторним індексом забруднення води (методика Гідрохімічного інституту) та інтегральним показником (без пріоритетів) демонструють неможли-

вість використання річкової води для потреб різних користувачів без попередньої підготовки. Результати дослідження наголошують, що захист прісних вод – це не лише екологічне завдання, а й ключовий фактор стійкого розвитку держави.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати оцінювання якості води рекомендовано враховувати при управлінні водними ресурсами, при формуванні системи раціонального їх використання та захисту, при організації системи моніторингу за джерелами забруднення поверхневих вод та зменшення масштабів захворювань, пов’язаних з неякісною водою. Наступний етап дослідження передбачає оцінювання якості води р. Дніпро в межах Черкаської області за показниками екологічного стану для визначення здатності водного об’єкту до саморегуляції, самоочищення та самовідновлення.

Література

1. Звіт про стратегічну екологічну оцінку Програми економічного і соціального розвитку Черкаської області на 2024 рік. Департамент регіонального розвитку Черкаської ОДА. Черкаси, 2023. 76 с.
2. Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб. URL: <https://ck.cdc.gov.ua/statistics-and-monitoring/> (дата звернення 24.05.2025).
3. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Черкаській області у 2023 році. Черкаси, 2024. 227 с.
4. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та відновлення в Україні у 2023 році. Київ. 2024. 438 с.
5. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/natsionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-prirodnoho-seredovyshha-v-ukrayini/> (дата звернення: 23.05.2025).
6. Водна стратегія України на період до 2050 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 23.05.2025).
7. Проект Короткого звіту щодо прогресу впровадження Протоколу про воду і здоров’я в Україні у 2022–2024 рр. URL: <https://mepr.gov.ua/proyekt-korotkogo-zvitu-shhodoprogressu-vprovadzhennya-protokolu-pro-vodu-i-zdorov-ya-v-ukrayini-u-2022-2024-rr/> (дата звернення: 23.05.2025).
8. Європейська економічна комісія Організації Об’єднаних Націй (ЄЕК ООН). Офіційний сайт. URL: <https://unece.org/environment-policy/water/protocol-on-water-and-health/about-the-protocol/introduction> (дата звернення: 23.05.2025).
9. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Черкаській області у 2022 році. Черкаси, 2023. 226 с.

10. Екологічний паспорт Черкаської області. Черкаси, 2023. 235 с.
11. Екологічний паспорт Черкаської області. Черкаси, 2024. 244 с.
12. Регіональний офіс водних ресурсів у Черкаській області. Державне агентство водних ресурсів. URL: <https://ckovr.gov.ua/category/plan-upravlin-g-baseynom/> (дата звернення: 20.05.2025).
13. Державна екологічна інспекція Центрального округу. URL: <https://centrreg.dei.gov.ua/post/425> (дата звернення: 21.05.2025).
14. Дані державного моніторингу поверхневих вод. Державне агентство водних ресурсів України. URL: <https://data.gov.ua/dataset/surface-water-monitoring> (дата звернення: 01.01.2025).
15. Шахман І.О., Лобода Н.С. Оцінка якості води у створі р. Інгулець – м. Снігурівка за гідрохімічними показниками. Український гідрометеорологічний журнал. 2016. № 17, С. 123–136.
16. Iryna Shakhman, Anastasiia Bystriantseva Water Quality Assessment of the Surface Water of the Southern Bug River Basin by Complex Indices. *Journal of Ecological Engineering*. Volume 22, Issue 1, P. 195–205.
17. Iryna Shakhman, Anastasiia Bystriantseva Environmental approach to assessment of the response of hydroecosystems to anthropogenic load. New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph / edited by authors. 7th ed. Riga, Latvia: "Baltija Publishing". 2019. P. 281–301.
18. Шахман І.О., Бистрянцева А.М. Оцінювання якості води річки Дніпро в межах Черкаської області. Екологічні науки: науково-практичний журнал. К.: ДЕА, 2023. №2(47). С. 91–95.
19. Клименко М.О., Вознюк Н.М., Вербецька К.Ю. Порівняльний аналіз нормативів якості поверхневих вод. Наукові доповіді НУБіП України. 2012-8 (30). URL: http://nd.nubip.edu.ua/2012_1/12kmo.pdf (дата звернення: 03.03.2023).
20. Компанії хімічної промисловості Черкаської області. URL: (<https://catalog.youcontrol.market/khimichna-promyslovist/cherkaska-oblast/cherkasy>) (дата звернення: 24.05.2025).

ЕКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ТА ЇХ ОЦІНЮВАННЯ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ВИДОБУВНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Герасимчук Л.О., Кириленко Н.П., Валерко Р. А., Пацева І.Г.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир, Україна
gerasim4uk@ukr.net

Розглянуто питання оцінки екологічних ризиків, що виникають у процесі транспортування на видобувних підприємствах. Обґрунтовано актуальність проблеми з огляду на високу частку транспортування в загальному екологічному навантаженні, особливо в умовах відкритих гірничих розробок. Визначено основні джерела ризиків, пов'язані з експлуатацією важкої техніки, зокрема самоскидів, екскаваторів, навантажувачів, а також їх вплив на стан атмосферного повітря, ґрунтів та біорізноманіття. Запропоновано концепцію поетапної оцінки екологічних ризиків транспортної складової, яка ґрунтується на комплексному використанні SWOT- та PEST-аналізів. Проведений SWOT-аналіз дозволив виявити сильні та слабкі сторони, можливості та загрози, що впливають на екологічну безпеку транспортування, та сформувати матрицю стратегій управління ризиками. Застосований для зовнішнього стратегічного аналізу PEST-аналіз допоміг зрозуміти ширший контекст впливу на екологічну безпеку транспортних процесів, обґрунтувати доцільність адаптації підприємства до зовнішніх умов. SWOT- і PEST-аналізи дозволили сформулювати пріоритетні напрямки підвищення екологічної безпеки, зокрема: перехід до екологічно чистих або менш шкідливих видів пального; встановлення мобільних станцій моніторингу викидів і запиленості; організація навчання для персоналу з екологічної безпеки; реалізація програм енергоефективності на рівні транспортного циклу. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення систем екологічного моніторингу, впровадження технологій «зеленої» логістики, залучення інвестицій на засадах екологічної відповідальності, а також адаптації підприємств до нових екологічних стандартів. Запропонована методика має прикладне значення для оптимізації виробничої логістики, зниження витрат на паливо й обслуговування, а також підвищення корпоративної екологічної відповідальності у гірничодобувному секторі. *Ключові слова:* екологічний ризик, екологічна безпека, гірничодобувна діяльність, транспортування, облицювальний камінь, SWOT-аналіз, PEST-аналіз, логістика, екологічний моніторинг, дизельна техніка, пилове забруднення, сталий розвиток, «зелена» логістика, управління ризиками.

Environmental risks and their assessment in the context of sustainable development of mining enterprises. Herasymchuk L., Kyrylenko N., Valerko R., Patseva I.

This article explores the assessment of environmental risks arising from transportation activities at mining enterprises. The relevance of the issue is substantiated based on the significant share of transportation in the overall environmental burden, especially in open-pit mining conditions. The main sources of risk associated with the operation of heavy machinery – including dump trucks, excavators, and loaders – are identified, as well as their impact on air quality, soil conditions, and biodiversity. A step-by-step concept for assessing the environmental risks of the transportation component is proposed, based on the integrated use of SWOT and PEST analyses. The SWOT analysis made it possible to identify strengths and weaknesses, opportunities and threats affecting the environmental safety of transportation, and to develop a matrix of risk management strategies. The PEST analysis, applied for external strategic evaluation, helped to understand the broader context of environmental impacts on transport processes and to justify the need for enterprise adaptation to external conditions. Both SWOT and PEST analyses enabled the formulation of priority directions for enhancing environmental safety, including: transition to cleaner or less harmful fuels; installation of mobile emission and dust monitoring stations; staff training in environmental safety; and implementation of energy efficiency programs at the transportation cycle level. The results of the study can be used to improve environmental monitoring systems, introduce green logistics technologies, attract investment based on environmental responsibility principles, and support enterprise adaptation to new environmental standards. The proposed methodology has practical value for optimizing production logistics, reducing fuel and maintenance costs, and increasing corporate environmental responsibility in the mining sector. *Key words:* environmental risk, environmental safety, mining operations, transportation, dimension stone, SWOT analysis, PEST analysis, logistics, environmental monitoring, diesel machinery, dust pollution, sustainable development, green logistics, risk management.

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтеграції екологічної безпеки в систему сталого розвитку підприємств, особливого значення набуває оцінювання екологічних ризиків, пов'язаних з діяльністю гірничодобувної галузі. Одним з ключових джерел такого ризику є транспортування гірничої маси, технічних вантажів та відходів, яке супроводжує всі етапи видобутку.

Транспортна складова у структурі видобувного процесу має значне екологічне навантаження, адже формує до 45–65% загальної енерговитратності, є джерелом пилу, викидів забруднюючих речовин, шуму, деградації ґрунтів та пошкодження рослинності. Техніка, яка використовується у кар'єрах, часто працює на дизельному паливі, ускладнюючи

дотримання екологічних норм, особливо в умовах складного рельєфу і високої запиленості.

Транспортні процеси мають високий потенціал для управління й оптимізації: вони піддаються кількісному аналізу, легко контролюються за допомогою сучасних моніторингових систем, дозволяють знижувати витрати на паливе та обслуговування, а також створюють передумови для екологічної модернізації. У той же час, підприємства стикаються з рядом викликів – від морально застарілої техніки до посиленого законодавчого та соціального тиску, що потребує впровадження ефективної системи управління екологічними ризиками, в тому числі транспортування, що базується на сучасних інструментах аналізу зокрема, SWOT– та PEST-методах, як основи для формування ефективних рішень у сфері сталого розвитку.

Актуальність дослідження. Проблема екологічної безпеки у гірничодобувній промисловості набула особливої актуальності у зв'язку з глобальними викликами сталого розвитку, змінами клімату, посиленням екологічного законодавства та зростаючими вимогами з боку громадськості. У даному контексті видобувні підприємства становлять особливий інтерес, оскільки їхня діяльність супроводжується інтенсивним використанням природних ресурсів і має суттєвий вплив на довкілля. Транспортна складова є однією з найбільш екологічно навантажених фаз виробничого процесу, у зв'язку з чим розглядаються як перспективна сфера для екологічної оптимізації, оскільки є відносно контрольованими, технічно модернізованими і мають високий потенціал для впровадження цифрових рішень.

Незважаючи на наявність загальних підходів до екологічного моніторингу у видобувній сфері, питання системного аналізу й управління екологічними ризиками транспортування залишається недостатньо опрацьованим на практиці. Більшість підприємств не мають ефективних стратегій ризик-менеджменту саме щодо транспортної інфраструктури, що ускладнює досягнення екологічної відповідності й знижує їхню конкурентоспроможність у контексті зеленого переходу.

Застосування SWOT– та PEST-аналізів для оцінки екологічних ризиків транспортування дає змогу не лише систематизувати чинники впливу, а й обґрунтувати напрями екологічної модернізації, що відповідатимуть засадам сталого розвитку.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на вирішення актуального завдання – підвищення екологічної безпеки гірничодобувних підприємств у контексті сталого розвитку через системну оцінку та управління ризиками, пов'язаними з транспортними процесами. У дослідженні застосовано адаптовані до гірничодобувного виробництва інструменти SWOT– і PEST-аналізу, які дозволяють ідентифікувати ключові фактори впливу, виявити слабкі місця у логістиці та екологічному контролі, а також сформулювати практичні рекомендації щодо зниження рівня екологічного навантаження. Зазначене дає змогу формувати обґрунтовану екологічну стратегію для підприємств, що ведуть видобуток облицовального каменю, з урахуванням економічних і соціальних умов функціонування.

Практична значущість доробку полягає у можливості безпосереднього застосування результатів

дослідження на підприємствах гірничої галузі, впровадженні екологічного моніторингу транспорту, оптимізації маршрутів і вибору екологічно доцільної техніки. Одержані результати можуть бути використані для вдосконалення систем управління охороною довкілля на виробництві, підготовки екологічної звітності та участі підприємств у програмах «зеленого» фінансування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науковій літературі проблематика оцінювання екологічних ризиків, в тому числі й у видобувній галузі, досліджується в контексті сталого природокористування, екологічної безпеки та техногенного навантаження [1-5, 7, 12-14].

У низці попередніх публікацій співавторів обґрунтовано підходи до кількісного аналізу та оптимізації транспортних процесів у гірничій галузі, які створюють підґрунтя для оцінки екологічних ризиків, пов'язаних із транспортуванням: Ковалевич Л. А. та ін. (2021) запропоновані підходи до нормування витрат палива та врахування технічного стану машин, що становлять основу для подальшої оцінки викидів забруднюючих речовин у атмосферу та впливу на довкілля; Кириленко Н. та ін. (2021) вперше запропоновано методіку розрахунку собівартості транспортування блоків у блочному кар'єрі на основі лінійного програмування, а запропонований підхід до оптимізації маршрутів транспортування дозволяє не лише знизити собівартість, а й мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище; Кириленко Н. (2017) зроблено висновки щодо раціонального поєднання техніки для комерційних блоків і відходів, що є релевантним для оцінки загального екологічного навантаження. Окрему увагу в наукових дослідженнях Aгуїте-Jofré та ін. (2021) приділяють використанню сучасних цифрових технологій – GPS-моніторингу, IoT-систем і автоматизованих платформ екологічного контролю. Таким чином, попередній науковий доробок спрямований на дослідження техніко-економічних і логістичних характеристик транспортних процесів у гірничому виробництві, що дозволило у цьому дослідженні зосередитись на їх екологічному аспекті.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна досліджень. Незважаючи на наявність фундаментальних підходів до ідентифікації екологічних ризиків, питання їх комплексної оцінки, що пов'язано із транспортуванням гірничої маси, відходів і технічних вантажів, залишається недостатньо розробленим. Бракує робіт, що поєднують інструменти аналізу для визначення пріоритетних напрямів екологічної модернізації транспортної інфраструктури видобувних підприємств у відповідь на виклики сталого розвитку.

Методологічне значення проведеного дослідження полягає у формуванні комплексного підходу до оцінки та управління екологічними ризиками транспортування в умовах гірничодобувних підприємств, що спеціалізуються на видобутку облицовального каменю. Запропонований аналітичний інструментарій, що поєднує SWOT– та PEST-аналіз, дозволяє: 1) ідентифікувати та систематизувати джерела екологічних ризиків, з урахуванням специфіки транспортного процесу в межах і за межами кар'єру; 2) визначити внутрішні сильні та слабкі сторони, які впливають на ефективність екологічного менеджменту підприєм-

ства; 3) оцінити зовнішні фактори впливу (політичні, економічні, соціальні та технологічні), що є актуальними в умовах трансформації екологічної політики; 4) розробити стратегічні сценарії, які забезпечують адаптацію підприємств до нових екологічних викликів та сприяють інтеграції принципів сталого розвитку у виробничу логістику; 5) закласти підґрунтя для подальших досліджень, включаючи сценарний аналіз, оцінку ефективності екомодернізації транспорту та моніторингу на основі цифрових технологій.

Таким чином, методологія, представлена у дослідженні, може бути адаптована для інших гірничодобувних підприємств, а також використовуватись у розробці екологічних політик, стандартів корпоративної відповідальності та механізмів «зеленого» фінансування.

Виклад основного матеріалу. Екологічний ризик у контексті гірничодобувної діяльності являє собою ймовірність виникнення негативних змін у стані навколишнього природного середовища внаслідок впливу виробничих процесів. В умовах відкритих гірничих виробок значна частка цих ризиків пов'язана саме з транспортуванням гірничої маси, відходів, технічних вантажів, тощо, а також безпосереднім процесом видобутку (рис. 1). Наведені екологічні ризики можуть бути локальними (обмежені територією кар'єру) або поширюватися за межі видобувної ділянки.

Підприємства з видобутку є потенційно небезпечними з екологічної точки зору, тому їхня діяльність вимагає системного підходу до оцінки, мінімізації та управління ризиками, а також постійного екологічного моніторингу й адаптації до нових екологічних стандартів.

На кар'єрах блочного каменю транспортування здійснюється із залученням великогабаритної техніки, що працює в умовах складного рельєфу, високого рівня запиленості та значного навантаження. Серед технологічного транспорту використовуються кар'єрні само-

скиди (КрАЗ, БелАЗ, CAT, Volvo), колісні навантажувачі (CAT, Volvo, Komatsu), стрілові крани, гусеничні екскаватори. А основними екологічними аспектами при роботі такої техніки є: високий рівень викидів при згорянні дизельного пального; утворення пилу під час руху по ґрунтовим дорогам; механічне пошкодження ґрунту, рослинності; потреба у великій кількості мастильних матеріалів.

Наведемо концепцію оцінки екологічних ризиків на прикладі транспортної складової гірничих підприємств, яка повинна базуватись на поетапному аналізі (рис. 2).

У системі управління екологічними ризиками підприємств видобутку корисних копалин ефективне виявлення і систематизація факторів ризику є основою для формування обґрунтованих рішень.

На сьогодні застосовують безліч методів оцінки ризиків: від класичного підходу (як добуток ймовірності та серйозності наслідків) до експертних методів (метод Делфі, опитування, анкетування) та сценарного аналізу. Одним з таких методів є застосування SWOT- та PEST-аналізів для виявлення чинників впливу, адже ідентифікація екологічних загроз на етапі аналізу кар'єрних процесів транспортування є ключовим компонентом системи управління ризиками. Мета SWOT-аналізу екологічної безпеки транспортування в кар'єрах – виявлення сильних і слабких сторін, а також зовнішніх можливостей і загроз для підвищення екологічної безпеки транспортного процесу на підприємствах видобутку облицювального каменю (табл. 1). SWOT-аналіз свідчить, що екологічна безпека транспортування в кар'єрах має певні внутрішні переваги, однак стримується рядом технологічних та управлінських недоліків. Потенціал до покращення значний – за умови цільового інвестування, впрова-

Таблиця 1

**SWOT-аналіз (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)
екологічних ризиків транспортування в кар'єрних умовах**

S (Strengths) – Сильні сторони	W (Weaknesses) – Слабкі сторони
– досвідчені оператори транспорту та механізмів – наявна внутрішня логістика на підприємстві – використання спеціалізованої кар'єрної техніки – наявність маршрутів, оптимізованих для зменшення витрат – наявність базових екологічних заходів (полив доріг, огороження маршрутів) – можливість оперативного ремонту й обслуговування транспорту на місці – можливість реконструкції внутрішньокар'єрних доріг	– застарілий автопарк (високі викиди, низька ефективність) – високий рівень експлуатаційного зносу транспорту – відсутність екологічного моніторингу викидів транспорту – висока пилоутворюваність на дорогах – недостатнє використання екологічно безпечних технологій – недостатній облік кумулятивного впливу пилу, шуму та вібрацій – низький рівень автоматизації оцінки екологічного навантаження
O (Opportunities) – Можливості	T (Threats) – Загрози
– впровадження GPS-моніторингу, EMS та FMS-систем – модернізація транспорту на альтернативне паливо (газ, електрика) – участь у програмах з енергоефективності – отримання «зелених» сертифікатів або ESG-рейтингів – розробка стратегічного партнерства з виробниками екотехніки – можливість участі у пілотних проєктах «зеленої» логістики – залучення інвестицій на умовах «зеленого фінансування» (зелені облігації, гранти)	– посилення екологічного законодавства і штрафних санкцій – соціальний тиск громад і місцевої влади – зростання вартості пального і технічного обслуговування – кліматичні зміни, що впливають на стійкість транспортної інфраструктури кар'єру – аварійні ситуації, пов'язані з розливами ПММ – втрата біорізноманіття через пилові впливи та шумове забруднення – високі витрати на утилізацію та рекультивацию в разі порушення нормативів

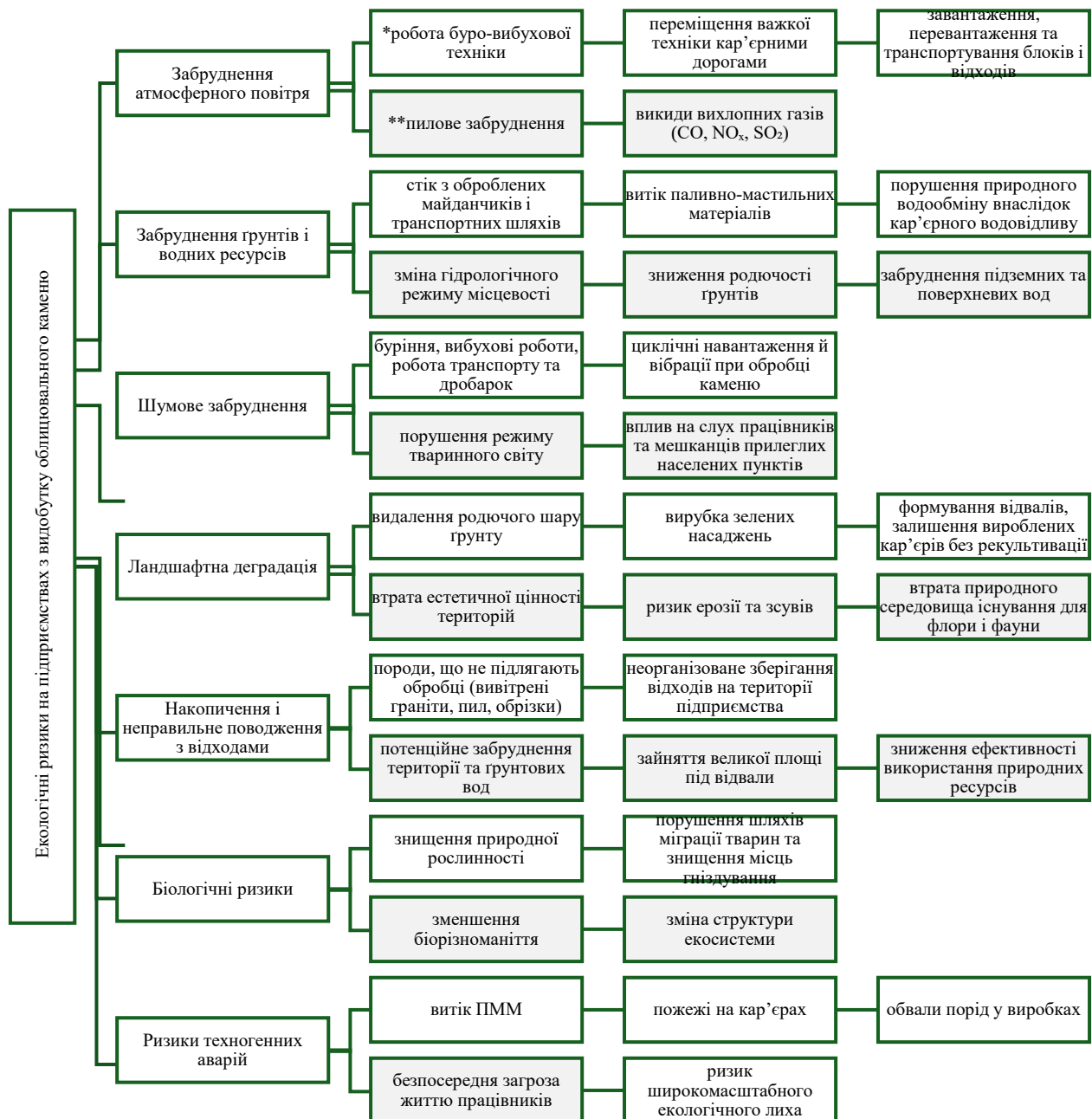


Рис. 1. Екологічні ризики на підприємствах з видобутку облицювального каменю

Примітка: *джерела ризику; **наслідки ризику.

дження цифрових рішень та оновлення транспортного парку.

SWOT-аналіз не є самостійним інструментом кількісного аналізу, проте визначає пріоритети подальшого аналізу, формує основу для сценарного аналізу (як реагувати на певні загрози чи використовувати можливості), допомагає виявити внутрішні резерви, які можна мобілізувати для покращення екологічного стану. На основі проведеного SWOT-аналізу розроблена матриця стратегій SWOT (SO, WO, ST, WT) для оцінки та управління екологічними

ризиками транспортування в кар'єрних умовах на підприємствах з видобутку облицювального каменю (табл. 2).

Крім того, SWOT-аналіз є вихідною базою для побудови PEST-аналізу, що орієнтований на зовнішнє середовище, що впливає на екологічні ризики транспортування в кар'єрі (табл. 3).

Отримані результати дозволяють сформувати моделі управління екологічними ризиками транспортування в кар'єрах, яка враховує баланс між можливостями підприємства та зовнішніми викликами.



Рис. 2. Концепція оцінки екологічних ризиків на прикладі транспортної складової гірничих підприємств

Головні висновки. Транспортна складова в межах підприємств з видобутку є вагомим джерелом екологічного навантаження та має значний потенціал для оптимізації та зниження ризиків завдяки використанню сучасних технологій та управлінських рішень. Поєднання

SWOT– та PEST-аналізів дозволило комплексно оцінити внутрішні резерви підприємств і зовнішні виклики, що впливають на екологічну безпеку транспортування. Розроблена матриця стратегій SWOT є основою для побудови цільових сценаріїв екологічної модернізації транспортного процесу, з урахуванням фінансово-економічних аспектів і соціально-екологічних пріоритетів. Отримані результати свідчать про необхідність оновлення технічного парку та впровадження альтернативних видів пального, автоматизації екологічного моніторингу транспорту (через GPS, EMS, FMS-системи), активізації взаємодії з органами влади та місцевими громадами, залучення інвестицій у «зелену» логістику та екологічно безпечні інфраструктурні рішення, підвищення кваліфікації персоналу з питань екологічної безпеки. Таким чином, запропонований методологічний підхід до оцінки та управління екологічними ризиками може бути використаний як ефективний інструмент впровадження інновацій та формування сталих рішень у гірничодобувному секторі.

Перспективи подальших досліджень вбачаємо у розробці моделі управління екологічними ризиками транспортування в кар'єрних умовах.

Таблиця 2

Матриця стратегій SWOT (SO, WO, ST, WT) для оцінки та управління екологічними ризиками транспортування в кар'єрних умовах

SO-стратегії (використання сильних сторін для реалізації можливостей)		WO-стратегії (подолання слабких сторін через використання можливостей)	
SO1	Використання досвіду операторів та внутрішньої логістики для впровадження систем моніторингу транспорту (GPS/EMS/FMS)	WO1	Заміна застарілого транспорту на екологічно безпечні аналоги через залучення «зеленого» фінансування
SO2	Опора на наявну спецтехніку і маршрути для ефективного переходу на альтернативне паливо	WO2	Автоматизація екологічного моніторингу викидів (EMS та FMS-системи)
SO3	Реалізація програм енергоефективності завдяки наявним ремонтним базам і техобслуговуванню	WO3	Участь у програмах енергоефективності для компенсації високого енергоспоживання і зносу транспорту
SO4	Використання базових екозаходів для підвищення ESG-рейтингів і отримання зелених сертифікатів	WO4	Партнерство з екотехнічними компаніями для впровадження безпильових рішень
SO5	Реконструкція внутрішньокар'єрних доріг у рамках «зелених» пілотних проєктів або співпраці з виробниками екотехніки	WO5	Розробка внутрішньої аналітичної системи для обліку кумулятивного впливу та зменшення екологічного навантаження
ST-стратегії (використання сильних сторін для мінімізації загроз)		WT-стратегії (мінімізація слабких сторін і нейтралізація загроз)	
ST1	Мобілізація досвідчених кадрів для впровадження програм дотримання нових екологічних нормативів	WT1	Модернізація автопарку з навчанням персоналу для відповідності екостандартам
ST2	Оптимізація маршрутів для скорочення витрат на паливо у відповідь на зростання цін	WT2	Зниження шуму та пилу шляхом впровадження закритих транспортних технологій або асфальтування частин доріг
ST3	Застосування внутрішньої логістики та оперативного ремонту для швидкого реагування на аварійні ситуації	WT3	Розробка програми локального реагування на ПММ-аварії з урахуванням слабкої інфраструктури контролю
ST4	Розробка систем поливу й огороження доріг для мінімізації впливу пилу та збереження біорізноманіття	WT4	Застосування мобільних постів моніторингу на маршрутах, де відсутня стаціонарна система контролю
ST5	Використання існуючої логістичної бази для адаптації до змін кліматичних умов (грунтова стійкість, зливи тощо)	WT5	Використання грантових ресурсів для розробки інноваційних систем зниження кумулятивного впливу транспорту

**PEST-аналіз (Political, Economic, Social, Technological) зовнішнього середовища,
що впливає на екологічні ризики транспортування в кар'єрі**

Р – Політичні чинники	Е – Економічні чинники
• регуляторна політика у сфері охорони довкілля (регулювання викидів та шуму, ОВД-процедури) • державні програми з екомодернізації транспорту • підтримка екоініціатив • геополітична нестабільність та військові дії, що впливає на постачання ПММ або техніки.	• вартість впровадження екологічних технологій • податкові пільги для підприємств, що впроваджують природоохоронні заходи • паливна криза • економічна доцільність модернізації транспортної системи.
С – Соціальні чинники	Т – Технологічні чинники
• громадський тиск на підприємства за екологічне забруднення • підвищення екологічної обізнаності населення. • імідж компаній • рівень підготовки фахівців з екобезпеки на місцях.	• інновації в транспорті (доступність електротранспорту або гібридних машин) • розвиток систем дистанційного моніторингу (GPS, сенсори викидів). • інновації в пилоподавленні та шумозахисті • екологічний аудит у реальному часі

Література

1. Валерко Р., Герасимчук Л. Оцінка ризику, пов'язаного з надходженням заліза з питною водою, для здоров'я населення Житомирської області. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2021. № 3. С. 10–16. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2021-3-2>.
2. Валерко Р.А., Герасимчук Л.О., Касумова В.Ю. Оцінка потенційного ризику для здоров'я сільського населення внаслідок споживання питної води. Таврійський науковий вісник. 2022. № 125. С. 218–224. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.125.30>.
3. 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>.
4. Герасимчук Л., Валерко Р., Розгон В., Маліновська В. 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. Кириленко Н., Шамрай В., Ковалевич Л., Лебля М., Махно А. Обґрунтування транспортних робіт в умовах блочного кар'єру. Геоінженерія. 2021. № 5. С. 14–23. DOI: 10.20535/2707-2096.5.2021.230667.
6. Ковалевич Л. А., Левицький В. Г., Білобров Д. М., Кириленко Н. П., Шамрай В. І. Динаміка споживання паливно-мастильних матеріалів самоскидами на Омелянівському родовищі гранітів. Технічна інженерія. 2021. № 1(87). С. 142–148. DOI: 10.26642/ten-2021-1(87)-142-148.
7. Мельник-Шамрай В. В., Шамрай В. І., Пацева І. Г., Ігнатюк Р. М. Оцінка впливу гірничо-видобувної галузі на довкілля: система управління відходами. Екологічні науки. 2024. № 4 (55). С.164–168. DOI: 10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.26.
8. Aguirre-Jofré H., Eyre M., Valerio S., Vogt D. Low-cost internet of things (IoT) for monitoring and optimising mining small-scale trucks and surface mining shovels. Automation in Construction. 2021. Vol. 131. P. 1–30. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103918.
9. Korobiichuk V., Iskov S., Leonets I., Davydova I., Kalchuk S. Determination of the seismic effect of a mass explosion on the earthquake resistance of ledges of block products. IOP Conference. Series «Earth and Environmental Science». 2024. Vol. 1319 (012005). 10 p. DOI: 10.1088/1755-1315/1319/1/012005.
10. Kyrlyenko N. Substantiation of the wheel loader employment at dimension stone quarries in Ukraine. Italian Journal of Engineering Geology and Environment. 2017. P. 57–62. DOI: 10.4408/IJEGE.2017-02.S-06.
11. Kyrlyenko N., Rasputna T. Ukrainian dimension stone industry: Problems and solutions. Geoingegneria Ambientale e Mineraria. 2018. Vol. 153, no. 1. P. 5–12.
12. Polishchuk D., Panasiuk A., Davydova I., Bondarchuk V. Researching the optimal combination of UAV equipment for performing surveying measurements and software for processing the results. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 5th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters. 2024. Vol. 1415, no. 1. DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012029.
13. Shamrai V., Leonets I., Melnyk-Shamrai V., Patseva I., Naumov Y. Reuse of stone working enterprise slurry in geopolymer and concrete products. Mining of Mineral Deposits. 2024. Vol. 18, no. 4. P. 10–17. DOI: 10.33271/mining18.04.010.
14. Valerko R., Herasymchuk L., Pitsil A., Palkevich J. GIS-based assessment of risk for drinking water contamination to children's health in rural settlements. Ekológia (Bratislava). 2022. Vol. 41 (4). pp. 312–321. DOI: <https://doi.org/10.2478/eko-2022-0032>.

ЕФЕКТИВНА ДОЗА ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД ВИКИДІВ ^{131}I З АЕС

Григор'єва Л.І., Григор'єв К.В.

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

вул. 68 Десантників, 10, 54003, Миколаїв

ludmila.grygorieva@chmnu.edu.ua, kossss.iop@gmail.com

При нормальній роботі АЕС технологічний потік радіонуклідів надходить у довкілля з вентиляційних труб блоків і з водоскидних каналів. Основна маса викидної активності приходить на радіоактивні благородні гази та ^{131}I : потужність викиду їх у 10^5 разів перевищує потужність викиду довгоживучих аерозолів. Радіоактивні ізотопи йоду є леткими, тому у випадку розгерметизації ядерного реактора відбувається «залповий» викид їх у довкілля, який припиняється дуже швидко після припинення реакції поділу. Надалі вони випадають з атмосфери на поверхню ґрунту та рослинності, де їхня активність, завдяки коротким періодам напіврозпаду, зменшується фактично відповідно до закону радіоактивного розпаду. Радіоактивні ізотопи йоду, зокрема ^{131}I , відносять до основних радіаційних загроз для здоров'я людини через високий ризик опромінення населення внаслідок аварійних ситуацій на об'єктах ядерно-енергетичного комплексу. Разом з цим Україна є регіоном, в якому склалась несприятлива медико-соціальна ситуація, пов'язана природно зумовленим дефіцитом йоду в біосфері. Тому актуальність дослідження зумовлена необхідністю визначення рівнів ефективної дози опромінення для населення, яке мешкає в умовах йододефіциту та одночасно підвернене хронічному впливу викидів радіойоду з АЕС. За результатами радіоекологічних досліджень та моделювання встановлено, що ^{131}I складає до 63% і 29% внеску у середню ефективну дозу при інгаляційному та пероральному надходженні радіонуклідів до організму людини відповідно. Об'ємну активність ^{131}I у повітрі, ефективні дози від ^{131}I визначено, як функції фактору метеорологічного розбавлення, який розраховано для 16 румбів напрямків вітру. Ефективна доза від перорального надходження ^{131}I до людини для територій радіусом 2500 м навколо ПАЕС становить від 10 до 40 мкЗв/рік. Середня індивідуальна ефективна доза від надходження до людини харчовим шляхом суміші радіонуклідів, включаючи ^{131}I , складає від 2 до 9 мкЗв/рік. Для територій, розташованих у 30^м зоні навколо ПАЕС, величина середньої індивідуальної дози знижується до одиниць $\text{n}10^{-6}$ Зв, а для територій поза цієї зоною – до $\text{n}10^{-8}$ Зв. *Ключові слова:* газоаерозольні викиди АЕС, ^{131}I , фактор метеорологічного розбавлення, ефективна доза.

Effective dose of ionizing radiation from ^{131}I releases from NPPs. Grygorieva L., Grygoriev K.

During normal NPP operation, the process flow of radionuclides enters the environment from the ventilation pipes of the units and from the spillways. The bulk of the release activity is accounted for by radioactive noble gases and ^{131}I : their release rate is 105 times higher than that of long-lived aerosols. Radioactive isotopes of iodine are volatile, so in the event of a nuclear reactor depressurization, they are released into the environment in a “volley”, which stops very quickly after the fission reaction stops. Subsequently, they fall out of the atmosphere onto the surface of soil and vegetation, where their activity decreases due to short half-lives in accordance with the law of radioactive decay. Subsequently, they fall out of the atmosphere onto the surface of soil and vegetation, where their activity decreases due to short half-lives in accordance with the law of radioactive decay. Radioactive isotopes of iodine, in particular ^{131}I , are considered to be the main radiation threats to human health due to the high risk of exposure of the population as a result of accidents at nuclear power facilities. At the same time, Ukraine is a region with an unfavorable medical and social situation associated with a naturally occurring iodine deficiency in the biosphere. Therefore, the relevance of the study is due to the need to determine the levels of effective radiation dose for the population living in conditions of iodine deficiency and at the same time exposed to chronic exposure to radioiodine emissions from NPPs.

Based on the results of radioecological studies and modeling, it was found that ^{131}I contributes up to 63% and 29% to the average effective dose from inhalation and oral intake of radionuclides to the human body, respectively. The volumetric activity of ^{131}I in the air and effective doses from ^{131}I were determined as functions of the meteorological dilution factor calculated for 16 wind directions. The effective dose from ^{131}I ingestion to humans for the territories with a radius of 2500 m around the PANPP is from 10 to 40 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. The average individual effective dose from ingestion of a mixture of radionuclides, including ^{131}I , is 2 to 9 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. For the territories located within the 30 km zone around the PANPP, the average individual dose is reduced to units of $\text{n}10^{-6}$ Sv, and for the territories outside this zone - to $\text{n}10^{-8}$ Sv. *Key words:* NPP gas and aerosol emissions, ^{131}I , meteorological dilution factor, effective dose.

Постановка проблеми. При нормальній роботі АЕС технологічний потік радіонуклідів надходить у довкілля з вентиляційних труб блоків і з водоскидних каналів. Основна маса викидної активності приходить на радіоактивні благородні гази та ^{131}I : потужність викиду їх у 10^5 разів перевищує потужність викиду довгоживучих аерозолів. Радіоактивні ізотопи йоду є леткими, тому у випадку розгерметизації ядерного реактора відбувається «залповий» викид їх у довкілля, який припиняється дуже швидко

після припинення реакції поділу. Надалі вони випадають з атмосфери на поверхню ґрунту та рослинності, де їхня активність, завдяки коротким періодам напіврозпаду, зменшується фактично відповідно до закону радіоактивного розпаду. Радіоактивні ізотопи йоду, зокрема ^{131}I , відносять до основних радіаційних загроз для здоров'я людини через високий ризик опромінення населення внаслідок аварійних ситуацій на об'єктах ядерно-енергетичного комплексу. Разом з цим Україна є регіоном, в якому склалась

несприятлива медико-соціальна ситуація, пов'язана природно зумовленим дефіцитом йоду в біосфері. Дві третини території України належать до регіонів природного йододефіциту. Більшість українців проживають у місцях, де відчувається нестача йоду в ґрунті, воді, місцевих продуктах харчування. Замість належних за нормами Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) 150 мікрограмів (мкг) йоду на день переважна більшість населення отримує з їжею та водою лише 40-50 мкг йоду на добу, а споживання менш ніж 80 мкг вважається абсолютно недостатнім.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю визначення рівнів ефективної дози опромінення для населення, яке мешкає в умовах йододефіциту та одночасно підвержене хронічному впливу викидів радіоїоду з АЕС.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження сприяє розробці нових методів контролю за дозовим навантаженням на населення з прилеглих до АЕС територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах ризику розвитку йододефіцитних захворювань живе майже 70% населення України і, при цьому, практично у всіх без винятку регіонах. Південь і Схід України традиційно відносили до регіонів з низьким рівнем ендемії [5, 6], але окремі дослідження в останні десятиріччя свідчили про наявність тенденції до зростання поширеності дифузного нетоксичного зобу серед дорослого і дитячого населення цих територій [4]. Дослідження Інституту ендокринології та обміну речовин АМН України, хоча і не були масштабними, але дали підстави до засвідчення середнього ступенів йододефіциту в окремих місцевостях цих промислових регіонів [5]. Проблематичність цього питання для південних і східних регіонів країни пов'язана з тим, що до загальновідомих причин виникнення йододефіциту (нестача йоду у ґрунті, воді, рослинах, продуктах харчування) додається причина, яка пов'язана зі значним техногенним навантаженням і забрудненістю довкілля токсичними речовинами. Це може призводити як до безпосереднього порушення засвоєння щитовидною залозою йоду, так і внаслідок зв'язування йоду у недоступну для кореневої системи рослин сполуку – до зменшення його вмісту у м'ясо-молочній продукції [6].

Також відомо, що при аварії на АЕС, можливе опромінення внаслідок проходження радіоактивної хмари і інгаляційного надходження радіоактивних аерозолів та газів безпосередньо з радіоактивної хмари. Є результати досліджень щодо викиди радіоїоду відносяться до раннього радіоактивного викиду, тобто радіоактивного викиду, який вимагає впровадження заходів щодо захисту населення за межами майданчика АЕС, але не має достатньо часу для їх виконання» [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Недостатньо вивченими залишаються питання формування дозового навантаження на населення з прилеглих до АЕС територій. Так, зокрема, не вивченою є тема дозового навантаження на населення від радіоактивного йоду (^{131}I) при хронічному його надходженні через радіоактивні викиди АЕС в умовах нормальної експлуатації.

Новизна. Із залученням даних наукової літератури представлено оцінки ефективної дози опромінення людини від газоаерозольних викидів ^{131}I з АЕС. Змодельовано зміни дозового навантаження від ^{131}I з відстанню від АЕС.

Методологічне або загальнонаукове значення. Використано результати гамма-спектрометричних і радіохімічних досліджень проб ґрунту, продуктів харчування, виконаних раніше авторами [5]. Використано дані ЛЗД ПАЕС щодо річних об'ємів газоаерозольних викидів АЕС [7] та дані [8], застосовано методику МАГАТЕ з оцінки розсіювання домішок у повітрі на основі гаусової моделі розповсюдження домішок в атмосферному повітрі. При визначенні дифузійних властивостей повітряного середовища району ПУ АЕС використані дані багаторічних спостережень метеостанції м. Вознесенська та метеостанції ПУ АЕС. Оцінка випадіння радіонуклідів здійснена за розою вітрів для відстані (2500 м), на якій розташований найближчий до АЕС населений пункт. Визначення ефективної дози опромінення людини здійснено за моделями МКРЗ [1, 2].

Викладення основного матеріалу. Аналіз структури газоаерозольних викидів ПАЕС, проведений за даними [7, 8] свідчили, що у загальному радіонуклідному складі газоаерозольних викидів АЕС (не враховуючи викидів тритію) викиди ^{131}I складають до 49% (рис. 1).

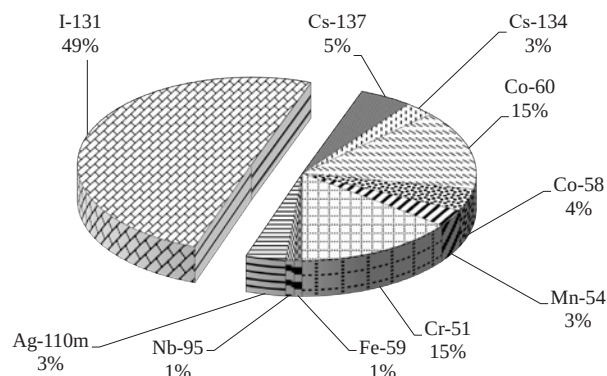


Рис. 1. ^{131}I у радіонуклідному складі газоаерозольних викидів ПАЕС

Середньорічні значення викидів ^{131}I у повітря знаходилися в межах 78 - 400 Бк/с, при середньому значенні 286 ± 46 Бк/с. Середня величина фактору метеорологіч-

ного розбавлення для територій на відстані 2500 м (найближчий населений пункт) при середньорічній швидкості вітру $v=3.5$ м/с склала $(0,61 \pm 0,16) \cdot 10^{-7}$ с/м³, що повністю підтверджує отримані раніше нами значення $(0,59 \pm 0,26) \cdot 10^{-7}$ с/м³ [5]. Об'ємна активність ^{131}I у приземному шарі території радіусом 2500 м навколо ПАЕС склала величини з діапазону $(7 - 470) \cdot 10^{-7}$ Бк/м³. Як видно, для ^{131}I отримано діапазон значень, нижні і верхні границі якого відрізняються на два порядки. Це, на нашу думку, пояснюється сприятливими для цих місць метеорологічними умовами та суттєвою змінами об'ємів викидів з вентиляційної труби АЕ під час проведення ремонтних робіт обладнання блоків АЕС.

На основі цих даних розраховано значення середньої індивідуальної ефективної дози при інгаляційному надходженні суміші радіонуклідів до людини, які змінювалися в діапазоні $(10 - 250) \cdot 10^{-12}$ Зв/рік. Структуру цієї дози за внесками радіонуклідів наведено на рис. 2: ^{131}I – 63%, ^{60}Co – 17%, $^{110\text{m}}\text{Ag}$ – 7%, ^{137}Cs – 6%, ^{134}Cs – 5%, ^3H – 1%, на усі інші – в цілому 1%.

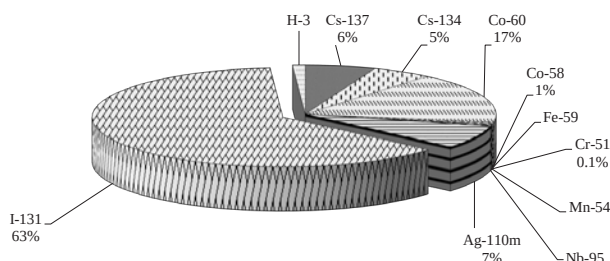


Рис. 2. Структура середньої індивідуальної ефективної дози від інгаляційного надходження суміші радіонуклідів

Визначення дози зовнішнього опромінення людини в результаті осадження радіоїоду на поверхні ґрунту здійснено для трьох варіантів: при максимальному ($13,5 \cdot 10^{12}$ Бк/рік), середньому ($2,96 \cdot 10^{12}$ Бк/рік) та мінімальному ($0,2 \cdot 10^{12}$ Бк/рік) значенні викиду ^{131}I з ПАЕС та при коефіцієнті осадження йоду $2 \cdot 10^{-2}$. Розрахунки свідчили, що доза зовнішнього опромінення людини від радіоїоду становила: за максимальним значенням 5,7 мкЗв/рік, мінімальним – 0,1 мкЗв/рік, середнім – 1,0 мкЗв/рік. Величина фактору осадження радіоїоду на поверхні ґрунту знаходився в діапазоні $4,8 - 18,0 \cdot 10^{-10}$ с/м².

Для розрахунку величини ефективної дози внутрішнього опромінення людини від радіонуклідів, що потрапляють до людини за міграційним ланцюгом “газоаерозольні викиди АЕС – атмосферне повітря – ґрунт (листя рослин) – сільськогосподарські рослини, молоко, м’ясо – людина”, визначення їх вмісту у продукції сільськогосподарського виробництва здійснено за середньорічними даними газоаерозольних викидів ПАЕС за 1984 – 2017 рр. [8], гаусовою моделлю розповсюдження домішок у повітрі та використовуючи відому модель перенесення радіонуклідів у рослини

через кореневий і стебловий шляхи в результаті осідання викидних домішок на поверхні ґрунту і рослинах. Визначена величина середньої індивідуальної ефективної дози від надходження до людини харчовим шляхом суміші радіонуклідів (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{95}Nb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{131}I , ^3H), яка склала $6,9 \pm 1,6$ мкЗв/рік при розкиді від 2 до 9 мкЗв/рік. Структуру цієї дози наведено на рис. 3.

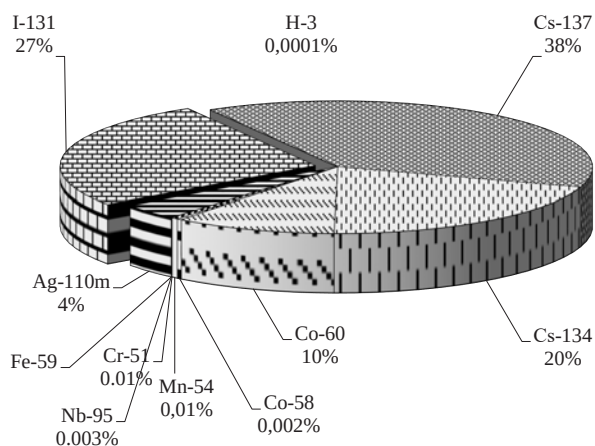


Рис. 3. Структура середньої індивідуальної ефективної дози від перорального надходження радіонуклідів

З рисунку 3 видно, що основний внесок у формування цієї дози, крім ^{131}I (29%), надавали ^{137}Cs , ^{134}Cs (60%). Розрахунки свідчили, що ефективна доза від перорального надходження ^{131}I до людини для територій радіусом 2500 м навколо ПАЕС становить від 10 до 40 мкЗв/рік.

Через те, що об'ємна активність ^{131}I у повітрі, а також ефективна доза опромінення людини від інгаляційного і перорального надходження ^{131}I є функціями фактору метеорологічного розбавлення, неважко визначити ці величини доз для територій, розташованих на інших відстанях від АЕС. На рис. 4 відображено результати розрахунку величини середньої індивідуальної ефективної дози ^{131}I для населення, що мешкає на іншій відстані від ПАЕС.

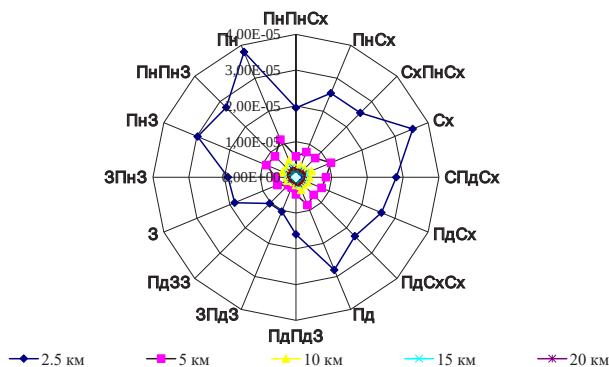


Рис. 4. Кругова діаграма ефективної дози від ^{131}I для територій, які віддалені від ПАЕС на відстань від 2,5 км до 150 км (для 16 румбів напрямку вітру)

Як видно з рис. 4, для територій, розташованих у 30^и км зоні навколо ПАЕС, величина середньої індивідуальної дози знижується до одиниць $n \cdot 10^{-6}$ Зв, а для територій поза цієї зоною – до $n \cdot 10^{-8}$ Зв.

Головні висновки

1. ^{131}I складає до 49% у радіонуклідному складі газоаерозольних викидів.

2. Об'ємна активність ^{131}I у приземному шарі території радіусом 2500 м навколо ПАЕС склала величини з діапазону $(7 - 470) \cdot 10^{-7}$ Бк/м³.

3. ^{131}I складає до 63% і 29% внеску у середню ефективну дозу від інгаляційного та від перорального надходження радіонуклідів відповідно.

4. Ефективна доза від перорального надходження ^{131}I до людини для територій радіусом 2500 м навколо ПАЕС становить від 10 до 40 мкЗв/рік.

5. Середня індивідуальна ефективна доза від надходження до людини харчовим шляхом суміші радіонуклідів (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{95}Nb , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{131}I , ^3H) складає $6,9 \pm 1,6$ мкЗв/рік при розкиді від 2 до 9 мкЗв/рік.

6. Для територій, розташованих у 30^и км зоні навколо ПАЕС, величина середньої індивідуальної дози знижується до одиниць $n \cdot 10^{-6}$ Зв, а для територій поза цієї зоною – до $n \cdot 10^{-8}$ Зв.

Перспективи подальших досліджень.

Проведення досліджень з визначення рівнів вмісту стабільного йоду в ґрунті та в рослинах, щоб оцінити надходження стабільного йоду до людини через їжу та питну воду для територій, яка підлягає впливу газоаерозольних викидів Південноукраїнської АЕС на предмет розповсюдженості і рівня йододефіциту з розробленням відповідних контрзаходів.

Література

1. ICRP Publication 66. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. – Oxford: Pergamon Press, 1994. – 482 p.
2. ICRP Publication 67. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 2. Ingestion Dose Coefficients. – Oxford: Pergamon Press, 1993. – 166 p.
3. Богорад В. І., Сlepченко О. Ю., Литвинська Т. В., Бєлих Д. О., Калита І. А., Полудненко В. А. Радіаційні аспекти захисту населення на етапі раннього викиду в разі важкої аварії на АЕС. *Ядерна та радіаційна безпека*. 3 (87). 2020. С. 62 – 73.
4. Ганжа О. Б., Рябенко Н. М., Липська А. І., Родіонова Н. К., Талько В. В. Гематологічні та цитогенетичні ефекти у потомків лабораторних щурів, опромінених інкорпорованим ^{131}I . *Ядерна фізика та енергетика*. 20 (2019). С. 178 -186.
5. Григор'єва Л.І. Дозове навантаження від ^{131}I газоаерозольних викидів АЕС у світі проблеми йодного дефіциту населення півдня України. *Техногенна безпека*. 2016, Т. 187, №175 (2012). С. 47-53.
6. Дрозд І.П., Сова О. А., Липська А.І. Моделювання аварійного викиду ^{131}I . Процеси дозоутворення. *Ядерна фізика та енергетика*. 2015. Т. 16. № 2. С. 157 – 163.
7. Радіаційна обстановка в районі розташування ЮУАЕС за 2014–2018 рр. : звіти лабораторії зовнішньої дозиметрії ЮУАЕС. 2019. 124 с.
8. Южно-Українська АЕС. Енергоблок №3 : звіт з періодичної переоцінки безпеки. Фактор безпеки №14. Вплив на навколишнє середовище. Київ. 2019. 158 с.

КОНСТРУКТИВНІ ПАРАМЕТРИ ФОРСУНОК ЗІ СПІВУДАРНИМИ СТРУМЕНЯМИ ДЛЯ МОКРОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ

Кожемякін Г.Б.

Запорізький національний університет
вул. Університетська, 66, 69011, м. Запоріжжя
kgb04@ukr.net

При очищенні газів промислових виробництв, які викидаються в атмосферу перевага надається системам очищення газів, які є простими у виготовленні та експлуатації, а їхня робота не вимагає великих енерговитрат. Водночас вони не повинні потребувати значних капітальних вкладень. Сучасне газоочисне обладнання не завжди відповідає цим вимогам. Згідно з цим, для очищення низьконапірних газових потоків найдоцільніше зазвичай використовувати частину газоходу природної витяжки як газоочисний апарат. Найбільше відповідають вимогам та умовам експлуатації установки мокрого очищення газу, де газовий потік обробляється плоскими водяними струменями. Вони є компактними, мають низький гідравлічний опір. Однак, ці апарати мають певні недоліки: недостатній ступінь очищення газів, нерівномірне зрошення газового потоку, неможливість використання на оборотній рідині, що містить шлам, через абразивний знос диспергуючих елементів, а також високе споживання зрошуючої рідини. З метою зменшення витрат рідини на очищення, диспергуючі пристрої зазвичай працюють на оборотній рідині, яка містить шлам. Це, у свою чергу, спричиняє їхнє інтенсивне абразивне зношування. Зменшити знос можна, використовуючи метод диспергування рідини за допомогою співударних струменів. Існуючі конструкції форсунок зі співударними струменями забезпечують достатній рівень диспергування рідини, рівномірне зрошення газового потоку та формування плоского факела розпилу. Розглянуто основні конструктивні параметри форсунок зі співударними струменями для створення полого конічного факелу диспергованої рідини при застосуванні їх в мокрій очистці газів. Досліджено вплив геометричних параметрів форсунок на кут розкриття полого конічного факелу розпиленої рідини. Отримана математична модель взаємозв'язку кута розкриття полого конічного факелу розпиленої рідини з конструктивними характеристиками сопел форсунки. *Ключові слова:* низьконапірний газовий потік, мокре очищення газів, форсунка зі співударними струменями, полий конічний факел розпиленої рідини, конструктивні параметри форсунок.

Design parameters of nozzles with impact jets for wet gas purification. Kozhemiakin G.

When cleaning industrial gases emitted into the atmosphere, preference is given to gas cleaning systems that are simple to manufacture and operate, and their operation does not require large energy costs. At the same time, they should not require significant capital investments. Modern gas cleaning equipment does not always meet these requirements. Accordingly, for cleaning low-pressure gas flows, it is usually most expedient to use a part of the natural exhaust gas duct as a gas cleaning device. The wet gas cleaning unit, where the gas flow is treated with flat water jets, best meets the requirements and operating conditions. They are compact and have low hydraulic resistance. However, these devices have certain disadvantages: insufficient degree of gas cleaning, uneven irrigation of the gas flow, inability to use on a circulating fluid containing sludge due to abrasive wear of the dispersing elements, as well as high consumption of the irrigation fluid. In order to reduce the consumption of liquid for cleaning, dispersing devices usually operate on a circulating liquid containing sludge. This, in turn, causes their intensive abrasive wear. Wear can be reduced by using the method of dispersing liquid using co-impact jets. Existing designs of nozzles with co-impact jets provide a sufficient level of liquid dispersion, uniform irrigation of the gas flow and the formation of a flat spray flame. The main design parameters of nozzles with co-impact jets for creating a hollow conical spray flame of dispersed liquid when used in wet gas cleaning are considered. The influence of the geometric parameters of the nozzles on the opening angle of the hollow conical spray flame of the sprayed liquid is investigated. A mathematical model of the relationship between the opening angle of the hollow conical spray flame of the sprayed liquid and the design characteristics of the nozzle nozzles is obtained. *Key words:* low-pressure gas flow, wet gas cleaning, impingement jet nozzle, hollow conical spray nozzle, nozzle design parameters.

Актуальність дослідження. Несприятливий екологічний стан атмосфери у багатьох промислових центрах України потребує оснащення джерел викидів шкідливих речовин високоефективними газоочисними апаратами, оскільки можливості суто технологічних заходів, що забезпечують скорочення викидів безпосередньо від технологічних агрегатів, в багатьох випадках, або вичерпані або обмежені.

Значна частина шкідливих речовин викидаються в атмосферу з низьконапірними газовими потоками. Кількість таких газів може досягати до 25% загального обсягу промислових газоподібних викидів в атмосферу. Але через досить високий гідравліч-

ний опір більшості газоочисних апаратів (до 1000 Па і більше) вони неприйнятні для таких умов або вимагають установки додаткового тягодуттєвого обладнання, що не завжди можливе через дефіцит виробничих площ.

Виходячи з цього, для очищення низьконапірних газових потоків як газоочисних апаратів найбільше доцільно, як правило, використовувати частину газоходу природної витяжки.

Постановка проблеми. Найбільш повно відповідають зазначеним вище вимогам та умовам експлуатації апарати мокрого очищення газу [1], в яких газовий потік перекривається плоскими водяними

струменями. Вони компактні, мають низький гідравлічний опір. Однак мають ряд недоліків, а саме: не завжди достатній ступінь очищення газів, нерівномірність зрошення газового потоку, неможливість експлуатації на оборотній рідині, що містить шлам, через абразивний знос диспергуючих пристроїв, велика витрата зрошуючої рідини

Одним з основних вузлів в апаратах мокрого очищення газів є форсунки для розпилювання рідини. Для досягнення найбільшої ефективності очищення їх конструкція повинна забезпечувати достатню ступінь диспергування рідини і рівномірність зрошення газового потоку.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. В процесі створення засобів для мокрого очищення газових потоків, що відповідають сучасним вимогам, була розроблена форсунка зі співударними струменями [2]. Вона дозволила отримати порожнистий конічний факел розпиленої рідини, який має хороші перспективи для створення високоефективних газоочисних апаратів із зменшеним краплевиносом. Перевагою розробленої форсунки, як показали наступні її випробування і результати експлуатації в промислових умовах, є простота виготовлення і використання, стійкість до абразивного зносу, можливість отримання кута розкриття в межах від 30° до 180°.

Постановка проблеми. Отримати порожнистий конічний факел розпиленої рідини, представляється можливим, як показали попередні дослідження, при використанні у форсунці сопел з отворами різного діаметру. Причому, діаметр отвору верхнього сопла не має бути менше діаметру нижнього сопла і, крім того, вихідний отвір верхнього сопла може бути виконаний з розточуванням. Для забезпечення ефективних режимів експлуатації апаратів було необхідно визначити оптимальні геометричні параметри форсунок. Для цього проведені дослідження для визначення залежності кута розкриття порожнистого факела рідини, що розпилювалася, від геометричних параметрів форсунки зі співударними струменями.

Виклад основного матеріалу. Схема процесу зіткнення струменів рідини в форсунці зі співударними зображена на рис. 1.

Імпульс маси рідини, що витікає з верхнього отвору, – $m_1 v_1$, а з нижнього – $m_2 v_2$. При розширенні діаметру отвору верхнього насадка розточуванням під кутом ϕ діаметр кінця отвору складе:

$$d_1' = d_1 + 2l \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (1)$$

При цьому швидкість на виході з отвору:

$$v_1 = \frac{v}{1 + 2 \frac{l}{d_1} \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad (2)$$

Різниця кількості руху мас співударних струменів:

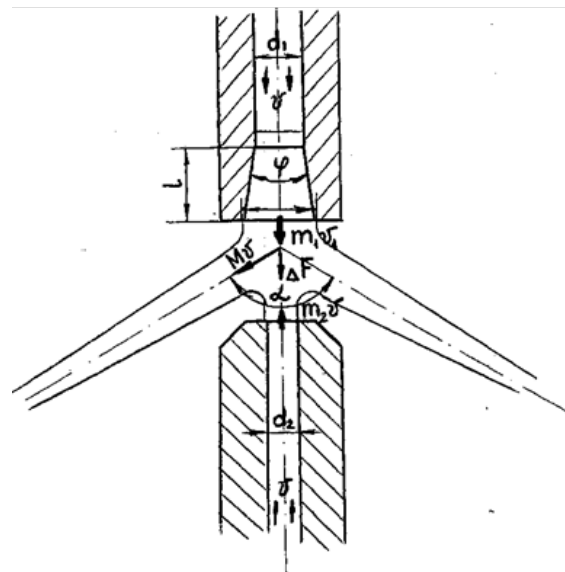


Рис. 1. Схема процесу зіткнення струменів рідини

$$\Delta F = m_1 v_1 - m_2 v_2 = \rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2 \right] \quad (3)$$

Згідно із законом збереження імпульсів :

$$\Delta F = Mv \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4)$$

Прирівнюємо вирази (2.3) і (2.4) :

$$\rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2 \right] = Mv \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (5)$$

Виразення для кількості руху рідини, що розтікається, :

$$Mv = \rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 + d_2^2 \right] \quad (6)$$

Підставляємо виразення (6) в (5) :

$$\rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2 \right] = \rho v^2 \left[\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 + d_2^2 \right] \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (7)$$

Перетворюючи, отримуємо:

$$\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2}{\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 + d_2^2} \quad (8)$$

Виразення для кута розкриття факелу:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 - d_2^2}{\left(1 + \frac{2l}{d_1} \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \right)^4 d_1^2 + d_2^2} \quad (9)$$

Якщо розточування відсутнє, вираження (9) набирає вигляду:

$$\alpha = 2 \arccos \frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2 + d_2^2} \quad (10)$$

Лабораторні дослідження проводилися на експериментальній установці, зображеній на рис. 2.

При зіткненні струменів утворюється порожнистий конічний факел розпиленої рідини 7, який перекриває переріз бака. Бак виконаний з оргскла. Кут розкриття факела визначався за допомогою транспортиру, нанесеного на стінку бака. Зрошувальна рідина подавалась по трубопроводу 1, тиск і витрата якої визначались по манометрах 4 і витратомірах 5 і регулювалися вентилями. Діаметри сопел 2, 3 змінювалися в межах 3-14 мм, розточування виконувалося під кутом 0-35°.

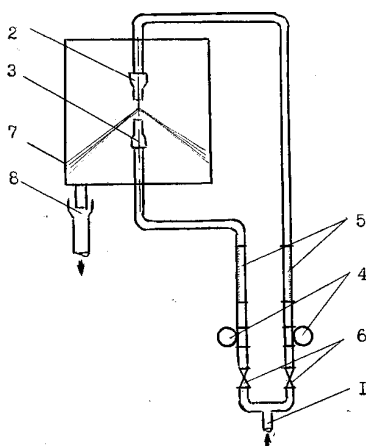


Рис. 2. Експериментальна установка для дослідження залежності кута розкриття факела від геометричних параметрів форсунки

Конструкція форсунки для проведення досліджень представлена на рис. 3.

Результати досліджень в графічному виді представлені на рис. 4.

Справедливість залежності (9), що отримана теоретично, перевірена з використанням експериментальних даних [3]. Результати перевірки показали адекватність математичної моделі експериментальним даним. Теоретичні розрахунки співпадають з даними досліджень зі ступенем вірогідності $\alpha=0.9$. Максимальне середньоквадратичне відхилення $\sigma=4.7$. Погрішність не перевищує 7 %.

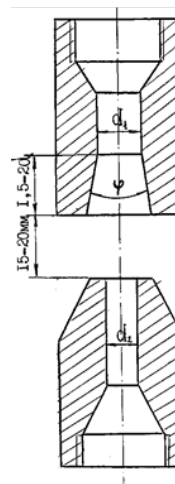


Рис. 3. Форсунка з співударними струменями

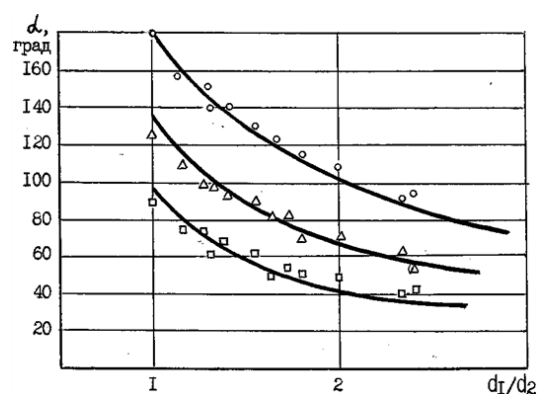


Рис. 4. Залежність кута розкриття факела розпиленої рідини від співвідношення діаметрів сопел при куті розточування ф: ○ – 0°; Δ – 15°; □ – 30°

Висновки. В результаті проведених досліджень визначені оптимальні параметри форсунки. Так відношення діаметрів отворів сопел повинне знаходитися в межах 1–3. При збільшенні цього відношення відбувається руйнування стійкого факела розпиленої рідини. Кут розточування не повинен перевищувати 30°. При більшому куті розточування відбувається відрив струменя від стінки у верхньому соплі і порушується стійкість факела. Глибина розточування знаходиться в межах 1,5–2 d. При меншій глибині струмінь рідини не устигає стабілізуватися після розширення, а при більшій точка розкриття факела знаходиться поблизу верхнього сопла і факел руйнується об його стінки.

Література

1. S. Mukherjee, H. Siddiqi, P. Maiti, P. Parmar, B.C. Meikap. A comprehensive analysis of removal of hazardous dust particulates from chemical and process industries off gases by advanced wet scrubbing techniques – A review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Amsterdam: Elsevier, 2024. Volume 91. A. 105406.
2. Розпилювач: заявка на пат. Україна 95062927 МПК В05В3/02; заявл. 21.06.1995; опубл. 30.04.1998, Бюл. № 2.
3. Чисельні методи: Навчальний посібник. / Волонтир Л.О., Зелінська О.В., Потапова Н.А., Чіков І.А., Вінницький національний аграрний університет. – Вінниця: ВНАУ, 2020 – 322 с.

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ

Халмурадов Б.Д., Пронь О.В.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ

oleksandr.pron@npp.kai.edu.ua

У статті розглянуто актуальну проблему та особливості створення математичної моделі для раціонального вибору електрогенераторів з урахуванням екологічної складової, це особливо набуває важливого значення в умовах енергетичної кризи, яка спричинена в Україні. Війна в нашій державі призвела до знищення значної частини енергогенеруючої інфраструктури. Зростає потреба в автономних джерелах живлення та змушує населення та бізнес активно впроваджувати електрогенератори в побут, а це в свою чергу, супроводжується збільшенням обсягів шкідливих викидів в атмосферу. Автори у дослідженні акцентують увагу на необхідності насамперед поєднання економічної доцільності та екологічної безпеки при виборі генераторного обладнання.

Запропонована математична модель базується на багатокритеріальній оптимізації, що дозволяє одночасно мінімізувати вартість, викиди CO₂, NO_x, SO₂, CO, PM та VOC а також забезпечити необхідну потужність і дотримання бюджетних обмежень. Модель включає вхідні дані, цільові функції та обмеження, що відображають екологічні нормативи, бюджетні та технічні вимоги, які забезпечують раціональний вибір електрогенераторів під конкретне завдання.

В статті виділений характерний алгоритм побудови та впровадження математичної моделі, який складається з етапів збір даних, визначення обмежень, розв'язання оптимізаційної задачі та аналізу результатів. Практична реалізація дослідження дасть можливість значно знизити екологічне навантаження при збереженні економічної ефективності та підкреслює важливість інтеграції екологічних критеріїв у процес прийняття рішень щодо раціонального вибору електрогенераторів.

Запропонована в дослідженні математична модель має значне прикладне та методологічне значення її можна застосовувати в приватному секторі, в державному управлінні, в різних приватних підприємствах та ін. для прийняття екологічно відповідальних рішень. Отримані результати дослідження можуть слугувати основою для формування політики у сфері енергоефективності та охорони довкілля в умовах децентралізації енергопостачання. *Ключові слова:* сталий розвиток, екологічна безпека, викиди, технологічні прилади, математична модель, багатокритеріальна оптимізація, критична інфраструктура, стійкість, загроза, об'єкти.

Features of creating a mathematical model for the optimal selection of electric generators taking into account the environmental component. Khalmuradov B., Pron O.

The article considers the current problem and features of creating a mathematical model for the rational selection of electric generators taking into account the environmental component, which is especially important in the context of the energy crisis that has arisen in Ukraine. The war in our country has led to the destruction of a significant part of the energy-generating infrastructure. The need for autonomous power sources is growing and forces the population and business to actively introduce electric generators into everyday life, and this, in turn, is accompanied by an increase in the volume of harmful emissions into the atmosphere. The authors of the study emphasize the need, first of all, to combine economic feasibility and environmental safety when choosing generator equipment. The proposed mathematical model is based on multi-criteria optimization, which allows you to simultaneously minimize the cost, CO₂, NO_x, SO₂, CO, PM and VOC emissions, as well as ensure the necessary capacity and compliance with budget constraints. The model includes input data, objective functions and constraints that reflect environmental standards, budgetary and technical requirements that ensure a rational choice of power generators for a specific task.

The article highlights a characteristic algorithm for building and implementing a mathematical model, which consists of the stages of data collection, definition of constraints, solution of the optimization problem and analysis of results. The practical implementation of the study will make it possible to significantly reduce the environmental load while maintaining economic efficiency and emphasizes the importance of integrating environmental criteria into the decision-making process regarding the rational choice of power generators.

The mathematical model proposed in the study has significant applied and methodological significance; it can be used in the private sector, in public administration, in various private enterprises, etc. for making environmentally responsible decisions. The results of the study can serve as the basis for forming a policy in the field of energy efficiency and environmental protection in the context of decentralization of energy supply. *Key words:* sustainable development, environmental safety, emissions, technological devices, mathematical model, multi-criteria optimization, critical infrastructure, resilience, threat, objects.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день Україна знаходиться в скрутному становищі. Майже 70% усієї української генерації зруйновано, пошкоджено або перебуває під окупацією [1]. За даними джерела [2] найбільших втрат зазнали генеруючі потужності регіонів, наближених до зони бойових дій, а також великі генеруючі об'єкти які знаходяться на Прикарпатті та Поділлі (рис. 1). 25.11.2024 р.

Війна в нашій державі зумовлює населення та бізнес активно впроваджувати електрогенератори в побут. Бойові дії призводять до катастрофічних наслідків в усіх сферах життя нашої держави.

Дані джерела [3] вказують, що на початок 2024 року була випущено понад 400 ракет та безпілотників, які були спрямовані на електростанції та високовольтні мережі передачі. Кілька концен-

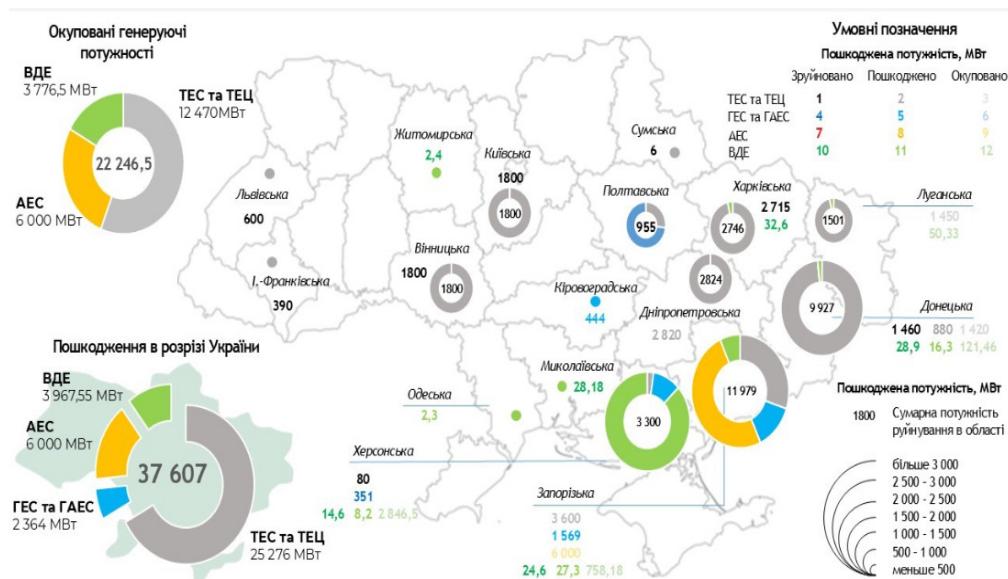


Рис. 1. Мапа витрат енергосистеми України станом на 25.11.2024 р. [2].

трованих хвиль атак вразили цивільну енергетичну інфраструктуру у березні, квітні та знову у серпні. В результаті наша держава зіткнулася з серйозним скороченням генеруючих потужностей: замість 18 ГВт (які необхідні для задоволення споживання в морозні зимові дні -10°C), було доступно в кращому випадку лише 12-13 ГВт. За температури -10°C в державі буде проноз відключення електроенергії до 10-12 годин на день, і цей прогноз навіть не враховує нові атаки, які створюють величезні додаткові ризики [3].

До вторгнення 2022 року українська енергосистема була з'єднана з білоруською та російською мережами [4]. В день вторгнення наша держава відключилася від даних мереж та провела планове випробовування роботи в «ізолюваному режимі». Разом з Молдовою запросили екстрену синхронізацію, яка була проведена в короткі терміни завдяки надзвичайним зусиллям залучених європейських операторів систем передачі (TSO) та Укренерго, координованих Європейською мережею операторів систем передачі електроенергії (ENTSO-E) за сильної підтримки Європейської Комісії. [4].

Відтоді інтеграція з європейською системою є пріоритетом. Торгівля розпочалася в червні 2022 року, при цьому ліміти торгівлі поступово збільшується. У червні 2024 року загальний імпорт України становив близько 2 ГВт протягом кількох годин щодня.

Незважаючи на це, літній дефіцит електроенергії призвів до щоденних відключень електроенергії, порушуючи життя та бізнес, а також посилюючи соціальні та гуманітарні ризики [4]. Протягом червня та липня, навіть з урахуванням імпорту електроенергії, розрив між пропозицією та попитом

коливався від 0,8 ГВт до 2,3 ГВт – останнє еквівалентно піковому попиту в Словенії. Це призвело до поступових відключень електроенергії по всій країні. Більшість громадян солідарно стикалися з цими щоденними відключеннями електроенергії, але обмежена доступність залежних від електроенергії об'єктів, таких як ліфти та водопостачання, ускладнювала повсякденне життя. Закінчення планового технічного обслуговування атомних електростанцій полегшило ситуацію в серпні, але це було до нещодавньої активізації атак [4].

Тобто всі ці причини призвели до того, що електрогенератори стали частиною повсякденного життя українців, допомагаючи пережити складні часи через відсутність електроенергії.

Звичайно використання генераторів може призвести до серйозних екологічних проблем, оскільки генератори викидають в атмосферу велику кількість шкідливих речовин [5]. Тому дуже важливим етапом є вибір раціонального електрогенератора, за допомогою математичного моделювання.

Актуальність дослідження. Не раціональний вибір електрогенератора призводить як до економічних так і екологічних втрат. Шкідливі викиди електрогенераторів можуть мати негативний вплив на навколишнє середовище та здоров'я населення. комплексного дослідження в Забезпечення екологічної безпеки роботи електрогенераторів на селітебній території є складним завданням, яке вимагає комплексного вирішення.

Актуальність даного дослідження спрямоване на розробку науково обґрунтованого підходу, який дозволить оптимізувати вибір електрогенератора з урахуванням економічної ефективності, потрібної

потужності та мінімізації негативного впливу на довкілля.

Результати дослідження сприятимуть впровадженню екологічно орієнтованих рішень у сфері вибору електрогенераторів, що матиме значний вплив на покращення стану повітря на селітебних територіях, зниження рівня шумового забруднення та підвищення загальної енергоефективності впроваджуваного електрогенератора.

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останніми роками науковці присвячують свої роботи дослідженням з математичного моделювання в різних галузях економіки. Наукові дослідження з розробки математичних моделей та методів моделювання електроенергетики в ринкових умовах виконуються в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова НАН України [6] та в Інституті математики НАН України [7]. Дослідження присвячені математичному моделюванню електроенергетичних систем в умовах ринку висвітлені в роботі [8]

Значна увага приділяється також прогнозуванню попиту, оптимізації розвитку генеруючих потужностей та мереж, моделюванню теплових процесів та дослідженню Smart Grid систем [9-11].

Але питанням досліджень та особливостям створення математичної моделі для раціонального вибору генераторів з урахуванням екологічної складової, зокрема і методичних підходів, у публікаціях українських науковців не висвітлюються. Натомість багато українських та міжнародних теоретичних напрацювань свідчать про активне створення необхідної теоретичної основи для розроблення уніфікованих підходів для вирішення даної проблеми

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою статті є дослідження питань особливостей створення математичної моделі для раціонального вибору електрогенераторів з урахуванням екологічної складової,

Новизна. Запропонована математична модель базується на багатокритеріальній оптимізації, що дозволяє одночасно мінімізувати вартість, викиди CO_2 , NO_x , SO_2 , CO , PM та VOC а також забезпечити необхідну потужність і дотримання бюджетних обмежень. Модель включає вхідні дані, цільові функції та обмеження, що відображають екологічні нормативи, бюджетні та технічні вимоги, які забезпечують раціональний вибір електрогенераторів під конкретне завдання.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення полягає у дослідженні особливостей створення математичної моделі для раціонального вибору електрогенераторів на основі поєднання економічних, екологічних та енергетичних параметрів. Запропонована математична модель може бути використана не лише в наукових дослі-

дженнях, а й у практичній діяльності підприємств, державних установ та приватних споживачів, які потребують ефективних рішень для автономного енергозабезпечення.

Викладення основного матеріалу. Наукове дослідження присвячено дослідженню особливостей створення математичної моделі для раціонального вибору електрогенераторів з урахуванням екологічної складової.

Математичні моделі є важливим інструментом для аналізу та вирішення складних проблем у різних галузях науки та техніки. Математичні моделі дозволяють аналізувати існуючі дані та робити прогнози щодо майбутніх подій. Це особливо важливо в економіці, екології, медицині та інших галузях, де точні прогнози можуть допомогти приймати обґрунтовані рішення. За ствердженням Джерела [12] «дотепер не існує універсального алгоритму для побудови будь-яких моделей. Але існує загальна логіка побудови моделей, де кожна конкретна модель для своєї побудови вимагає індивідуального підходу» [12].

Науковці в своїй праці [13] зазначають, що задача математичного моделювання включає в себе три основних елемента: а) незалежні керовані змінні, значення яких визначають певний план дій; б) обмеження, які повинні задовольняти змінні; в) цільова функція, яка підлягає оптимізації [13].

В роботі запропонована математична модель базується на багатокритеріальній оптимізації, що забезпечує врахування економічних, екологічних та технічних аспектів при виборі генераторів. Автори в своїх працях [14-15] також вказують, що багатокритеріальним завданням більшість критеріїв, що характеризують альтернативні варіанти, мають різну розмірність, природу та питомі вагові характеристики. Та методом згортання векторного критерію який враховує відносну важливість окремих критеріїв оптимальності за допомогою побудови скалярної функції яка є узагальненим критерієм щодо векторного критерію та вирішення однокритеріального завдання оптимізації [15].

Для формалізації математичної моделі було визначено ключові параметри, цільові функції, обмеження та змінні. Та виписані основні елементи моделі, які склали в себе параметри системи, бінарні змінні, глобальні параметри системи.

1. До параметрів системи відносяться:

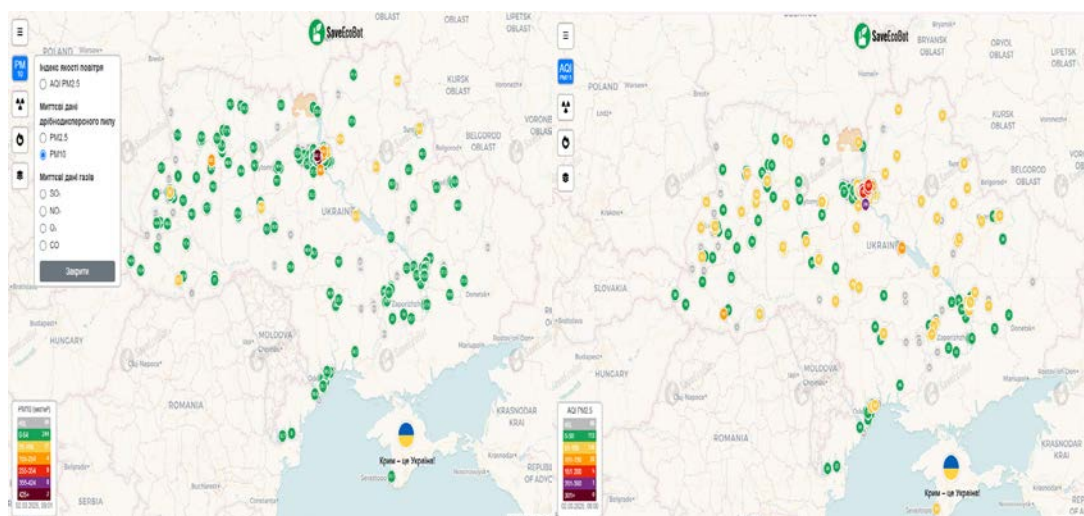
– P_i – потужність i -го генератора, Вт. Це показник, який характеризує, скільки енергії може забезпечити генератор. Важливо враховувати сумісність з потребами системи та загальну потужність, необхідну для задоволення енергетичного попиту.

– C_i – вартість i -го генератора, грн. Це сукупна вартість придбання, монтажу та, за необхідності, обслуговування генератора. Зазвичай цей параметр оцінюється для визначення економічної ефективності вибору.

– L_i – рівень шуму i -го генератора (дБ) – даний показник визначає акустичний вплив.

Індекс якості повітря	PM _{2.5}	PM ₁₀
Добрий	0	0
Задовільний	12	54
Шкідливий для групи ризику	35	154
Шкідливий	55	254
Дуже шкідливий	150	354
Небезпечний	250	424

Рис. 2. Індекс якості повітря [16]



а)

б)

Рис. 3. Мапа України на тверді частинки пилу: а) PM₁₀; б) PM_{2.5} [18]

– E_{CO_2i} – кількість викидів CO_2 від i -го генератора, г/кВт·год. Показник відображає вуглецевий слід генератора. Зменшення цього показника позитивно впливає для зниження глобального впливу на зміну клімату.

– E_{NO_xi} – кількість викидів NO_x від i -го генератора, г/кВт·год. Цей показник оцінює рівень викидів оксидів азоту, що впливає на утворення смогу та кислотних дощів.

– E_{SO_2i} – кількість викидів SO_2 від i -го генератора, г/кВт·год. Відображає рівень викидів діоксиду сірки, даний показник впливає на кислотність атмосфери та стан здоров'я населення.

– E_{COi} – кількість викидів CO від i -го генератора (г/кВт·год). CO – це токсичний газ, який утворюється внаслідок неповного згоряння палива. Високий рівень викидів може призвести до серйозного впливу на здоров'я людини, зокрема отруєння та ускладнення дихання.

– E_{PMi} – кількість викидів PM від i -го генератора (г/кВт·год). Джерело [16] вказує що «Particulate matter (PM) це мікроскопічні тверді частинки. Фактично – це все в повітрі, що не є газом, і складається з вели-

чезного різноманіття хімічних сполук та матеріалів, деякі з яких можуть бути токсичними. Через невеликий розмір багатьох частинок, що утворюють PM , деякі з цих токсинів через дихання можуть потрапляти в кров і транспортуватися по всьому тілу, осідаючи в серці, мозку та інших органах» [17].

Іншими словами можна трактувати так PM – це дрібні частинки твердих речовин та рідин (аерозолів), що виділяються внаслідок спалювання палива. Вони можуть бути видимими (дим) або невидимими. До основних забрудників відносяться тверді частинки пилу (PM_{10} і $PM_{2.5}$) [16-17]. Нашою державою встановлений допустимий індекс якості повітря, який представлений на рис 2.

Загалом із $PM_{2.5}$ пов'язано 3% смертей від захворювань серцево-судинної та дихальної системи і 5% смертей від раку легенів. [16].

Попри війну в нашій державі існує SaveEcoBot [18] єдина в Україні екологічна система. Вона поєднує дані про забруднення, забруднювачів та інструменти захисту довкілля. На рис 3. Представлена мапа якості повітря України.

– E_{VOC_i} кількість викидів VOC від i -го генератора (г/кВт·год).

– n – загальна кількість доступних генераторів, шт. Це кількість варіантів генераторів, доступних для аналізу та вибору.

2. Бінарні змінні:

– x_i – бінарна змінна, яка дорівнює 1, якщо i -й генератор обраний, і 0, якщо не обраний.

3. Глобальні параметри системи:

– $P_{required}$ – необхідна загальна потужність, Вт

– C_{budget} – доступний бюджет, грн

– $E_{CO_2,limit}$, $E_{NO_x,limit}$, $E_{SO_2,limit}$, $E_{CO,limit}$, $E_{PM,limit}$, $E_{VOC,limit}$ – допустимі рівні викидів CO_2 , NO_x , SO_2 , CO , PM , VOC .

– L_{limit} – допустимий рівень шуму (дБ) залежить від екологічних стандартів

Для досягнення раціонального вибору генераторів рекомендуємо застосовувати такі цільові функції:

Мінімізація загальної вартості:

$$\min \sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i, \quad (1)$$

Мінімізація загальних викидів CO_2 , NO_x , NO_x , CO , PM , VOC

$$\min \sum_{i=1}^n E_{CO_2,i} \cdot x_i, \quad (2)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{NO_x,i} \cdot x_i, \quad (3)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{SO_2,i} \cdot x_i, \quad (4)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{CO,i} \cdot x_i, \quad (5)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{PM,i} \cdot x_i, \quad (6)$$

$$\min \sum_{i=1}^n E_{VOC,i} \cdot x_i, \quad (7)$$

Мінімізація загального рівня шуму:

$$\min \sum_{i=1}^n L_i \cdot x_i, \quad (8)$$

Максимізація загальної потужності – ця функція дозволяє забезпечити максимальну доступну потужність в межах вибраного набору генераторів та висвітлена наступною формулою:

$$\max \sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i, \quad (9)$$

Обмеження:

Для забезпечення необхідної потужності будемо використовувати наступну формулу:

$$\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i \geq P_{required}, \quad (10)$$

Дане обмеження гарантує, що обрані генератори забезпечать потрібний рівень енергії.

Аналізуючи потужності генераторів, слід зазначити, що їхній діапазон становить від 0,2 до 2500 кВт. Натомість бензинові генератори здебільшого є малопотужними (0,2-16 кВт) ніж дизельні та газові. [19]. Для визначення необхідної потужності генератора перш за все визначається об'єкт де буде використовуватися генератор. Потім наявну кількість приладів та обладнання на об'єкті (активні та індуктивні). При розрахунку потужності для активних приладів – достатньо підсумувати їхню потужність та додати 15-20% резерву. Індуктивні прилади – потребують значно більшої стартової потужності через високий пусковий струм. Тому його номінальна потужність повинна перевищувати сумарну робочу потужність підключених пристроїв приблизно втричі [19].

Наступним етапом потрібно врахувати кліматичні фактори, які значно впливають на потужність генераторних установок. А саме: підвищена вологість, температура, висота над рівнем моря це ті показники, які негативно впливають на вихідну потужність генератора і їх обов'язково потрібно враховувати [19].

Бюджетне обмеження:

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i \leq C_{budget}, \quad (11)$$

Обмеження на викиди

Для викидів CO_2 від i -го генератора (г/кВт·год)

$$\sum_{i=1}^n E_{CO_2,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (12)$$

Для викидів NO_x від i -го генератора (г/кВт·год)

$$\sum_{i=1}^n E_{NO_x,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (13)$$

Для викидів SO_2 від i -го генератора (г/кВт·год)

$$\sum_{i=1}^n E_{SO_2,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (14)$$

Для викидів CO від i -го генератора (г/кВт·год)

$$\sum_{i=1}^n E_{CO,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (15)$$

Для викидів VOC від i -го генератора (г/кВт·год):

$$\sum_{i=1}^n E_{VOC,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (16)$$

Для викидів РМ від i -го генератора (г/кВт·год).

$$\sum_{i=1}^n E_{PM,i} \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (17)$$

Для рівня шуму:

$$\sum_{i=1}^n L_i \cdot x_i \leq E_{limit}, \quad (18)$$

Бінарність змінних:

$$x_i \in \{0,1\}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (19)$$

Бінарні змінні широко застосовуються в задачах дискретної оптимізації, дозволяючи математично моделювати вибір «включення» або «виключення» певних елементів системи. Вони дозволяють чітко визначати, які елементи системи активні, що спрощує врахування різних обмежень, таких як бюджет чи екологічні норми. Згідно з матеріалами компанії FICO, бінарні змінні моделюють дискретні рішення, наприклад, «так/ні» або «відкрити/закрити» [20].

У контексті цієї моделі визначає, чи обраний конкретний генератор. Бінарність змінних забезпечує можливість чіткого врахування обмежень, таких як бюджет, необхідна потужність або рівні викидів.

Аналіз наукових публікацій дає змогу зробити висновок, що використання бінарних змінних є основою для багатьох інженерних та екологічних моделей, що потребують ефективного управління ресурсами.

Розроблений алгоритм роботи математичної моделі дає можливість чітко сформулювати етапи роботи та представлений на рис.4.

Перший етап – це збір даних – в якому необхідно зібрати інформацію про доступні електрогенератори, їх потужність, вартість, рівні викидів і т.д.

Другий етап. На цьому етапі проводимо визначення обмежень, тобто на основі технічних, економічних і екологічних вимог задаються параметри $P_{required}$, C_{budget} , $E_{CO2,limit}$, $E_{NOx,limit}$, $E_{SO2,limit}$, $E_{CO,limit}$, $E_{VOC,limit}$, $E_{PM,limit}$.

Третій етап. Безпосередньо саме розв'язання оптимізаційної задачі за допомогою методів лінійного програмування або спеціалізованих програмних пакетів де визначається оптимальний набір генераторів.

Четвертий етап – це етап аналізу результатів. На цьому етапі результати перевіряються на відповідність вимогам та аналізується чутливість моделі до зміни параметрів.

Головні висновки. Таким чином дослідження підтверджують, що запропонована математична модель забезпечує комплексний підхід до оптимізації вибору генераторів, враховуючи комплексно як екологічні так і економічні критерії. Застосування багатокритеріальної оптимізації дозволяє досягти балансу між вартістю та зменшенням негативного впливу електрогенераторів.

Переваги запропонованої математичної моделі полягають у її гнучкості та здатності адаптуватися до різних умов. Завдяки введенню бінарних змінних та обмежень її можна застосовувати до широкого спектра завдань (від вибору обладнання для невеликих автономних систем до оптимізації великих енергетичних проектів).

Перспективи використання результатів дослідження. Екологічна складова в запропонованій математичній моделі дозволяє суттєво знизити рівень шкідливих викидів, що є важливим внеском у збереження екології нашої держави і має практичне значення для енергетичної галузі та екологічної інженерії.

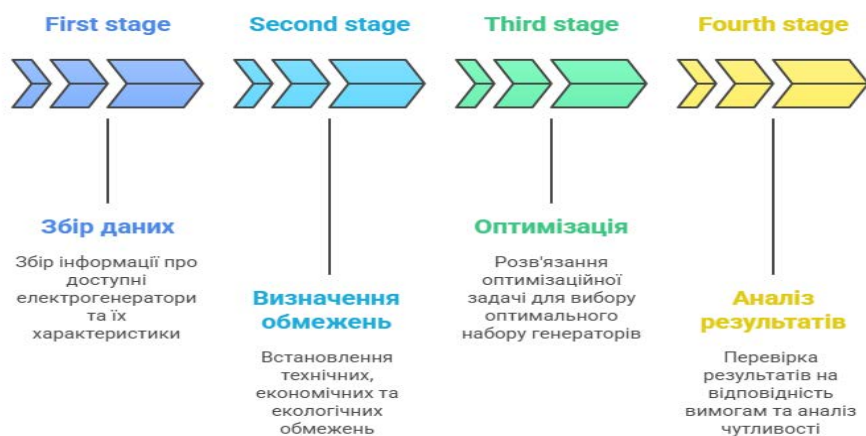


Рис. 4. Алгоритм роботи математичної моделі *

*Розроблено автором за допомогою [21]

Література

1. Війна в 2025: як змінилась енергетика та чому в Україні зростуть тарифи для населення веб-сайт. URL: <https://www.fico.com/fico-xpress-optimization/docs/latest/mipform/dhtml/chap2s1.html><https://brovaryregion.in.ua/%D0%B2%D1%96%D0%B9%D0%BD%D0%B0-%D0%B2-2025-%D1%8F%D0%BA-%D0%B7%D0%BC%D1%96%D0%BD%D0%B8%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%8C-%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0-%D1%82%D0%B0-%D1%87%D0%BE/> (дата звернення:04.04.2025).
2. Енергетична система України: стан на кінець 2024 року та сценарії на 2025 веб-сайт. URL: <https://enerhodzherela.com.ua/analitika/%D0%95%D0%9D%D0%95%D0%A0%D0%93%D0%95%D0%A2%D0%98%D0%A7%D0%9D%D0%90-%D0%A1%D0%98%D0%A1%D0%A2%D0%95%D0%9C%D0%90-%D0%A3%D0%9A%D0%A0%D0%90-%D0%87%D0%9D%D0%98-%D0%A1%D0%A2%D0%90%D0%9D-%D0%9D%D0%90-%D0%9A%D0%86%D0%9D%D0%95%D0%A6%D0%AC-2024-%D0%A0%D0%9E%D0%9A%D0%A3-%D0%A2%D0%90-%D0%A1%D0%A6%D0%95%D0%9D%D0%90%D0%A0%D0%86%D0%87-%D0%9D%D0%90-2025> (дата звернення:04.03.2025).
3. Ukraine's Winter Energy Crisis: Facing the Threat of Missiles and Default 2025. веб-сайт. URL: <https://www.wilsoncenter.org/article/ukraines-winter-energy-crisis-facing-threat-missiles-and-default> (дата звернення:22.05.2025).
4. Енергетична система України під ударом. веб-сайт. URL: <https://www.ica.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter/ukraines-energy-system-under-attack> (дата звернення:22.05.2025).
5. Халмурадов Б. Д., Пронь О. В. Між війною та розвитком: дилема енергетики та житлового будівництва в Україні. *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2024*: зб. матеріалів доп. учасн. XXVI Міжнародної наук-практ. конф. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С.100 -102.
6. The main directions of scientific research, proposed by the Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine for joint work. веб-сайт. URL: <https://ipme.kiev.ua/> (дата звернення:22.05.2025).
7. Інститут математики НАН України (ІМ НАН України) веб-сайт. URL: <https://www.imath.kiev.ua> (дата звернення:22.05.2025).
8. Саух С. Є., Борисенко А. В. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія Київ: «Три К», 2020. 340 с.
9. Моделювання енергоефективних режимів роботи smart grid системи електропостачання з сонячними фотоелектричними станціями веб-сайт. URL: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2019/03/SmartGrid.pdf> (дата звернення:22.05.2025).
10. Баженов В. А. Моделі оптимального розвитку енергосистем: Навчальний посібник.: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 56 с.
11. Саух С.Є. Проблеми математичного моделювання конкурентної рівноваги на ринках електроенергії. *Вісник Національної академії наук України*, 2018, Вип. 40, №4, С. 53 – 67.
12. Пронь С.В. Удосконалення транспортно-технологічного процесу для забезпечення вирощування сільськогосподарських культур: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.01 / Київ. нац. трансп. ун-т. – Київ, 2019. 234 с.
13. Бондарчук В. М., Давидчук С. П. Оптимізаційні методи та моделі. Конспект лекцій для студентів денної та заочної форми навчання. Житомир: ЖДТУ, 2016.- 104 с.
14. Янчук М. Б., Пронь С. В., Федина В. П., Чердніченко К. В. Науково-методичні підходи до управління транспортними ризиками в мультимодальних вантажних перевезеннях. *Бізнес Інформ*. 2021. №2. С. 198–209.
15. Pron S., Soloviova O., Herasymenko I., Borets I., Modeling of the transport and production complex in the growing of agricultural crops, taking into account the aviation component / *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2020. – Vol. 2, No. 3 (104). P. 30-39.
16. Що таке PM2.5 та PM10 веб-сайт. URL: <https://meteopost.com/info/PM/>(дата звернення: 12.02.2025).
17. Як пил PM2,5 впливає на здоров'я людей та як захиститися від забруднення повітря – новини екології. веб-сайт. URL: https://ecopolitic.com.ua/ua/news/nevidima-zagroza-yak-pil-pm2-5-vplivaie-na-zdorov-ya-ljudej/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 04.05.2025).
18. SaveEcoBot веб-сайт. URL: <https://www.saveecobot.com/maps#6/48.487/30.959/pm10> (дата звернення: 04.03.2025).
19. Вибір потужності генератора. веб-сайт. URL: <https://matari.ua/vybir-potuzhnosti-heneratora.html> (дата звернення 02.03.2025)
20. Binary variables. веб-сайт. URL: <https://www.fico.com/fico-xpress-optimization/docs/latest/mipform/dhtml/chap2s1.html> (дата звернення:12.02.2025).
21. App.napkin.ai веб-сайт. URL: <https://www.napkin.ai/> (дата звернення: 22.05.2025).

ENERGY SECURITY AND RENEWABLE ENERGY POTENTIAL OF THE EU AND UKRAINE IN TERMS OF THE RUSSIA'S AGGRESSION

Yakymenko I.¹, Bubliencko N.¹, Salavor O.¹, Nychyk O.¹, Shapovalov Ye.¹, Henshel D.²

¹National University of Food Technologies

Volodymyrska St., 68, 01033, Kyiv

²Indiana University

Indiana Ave, 107S, 47405, Bloomington, USA

iyakymen@gmail.com; 3110nb@gmail.com; saloksamir@ukr.net;

nychik@ukr.net; gws0731512025@gmail.com; dhenshel@iu.edu

Russia's full-scale invasion of Ukraine in February 2022 and the subsequent energy crisis throughout Europe revealed a dangerous dependence of European countries on Russian energy resources. This resulted in a crucial change in energy strategy of the European Union (EU). Following the REPowerEU strategy, the European Union already decreased Russian gas import by two-thirds (from 45% to 15% of total natural gas import) and plans totally refuse Russian energy supplies "well before the end of the decade". The EU strategy on complete replacement of Russian energy supplies and accelerating implementation of renewable sources of energy is challenging right now but crucial for Europe's long-term energy security. The EU's current binding target to achieve 42.5% of renewable energy sources in the total energy mix by 2030 is in line with the European Green Deal strategy and works on the independence of the EU from Russian energy resources.

Ukraine is currently withstanding the worst of the war, including thousands of deaths, millions of refugees, occupied territories, and destroyed infrastructure. National energy security is just one of many challenges facing the country. Following the EU's strategy, Ukraine urgently needs to transform its energy sector in a sustainable manner. Ukraine's current plan to achieve 27% renewables in total energy production by 2030, while less ambitious than the EU's goal, is still a compelling strategy given the country's wartime situation. The country can and should rely heavily on renewable energy sources, including solar and wind generation. Biogas and biomethane production can also play a significant role in replacing natural gas in Ukraine, given the country's vast agricultural potential. Along with a radical increase in energy efficiency, this will transform Ukraine's energy sector into a sustainable and secure one. *Key words:* energy security, sustainable development, renewables, energy resources, Russia's war in Ukraine.

Енергетична безпека та потенціал відновлюваної енергетики ЄС та України в умовах російської агресії. Якименко І.І., Бублієнко Н.О., Салавор О.М., Ничик О.В., Шаповалов Є.Б., Хеншель Д.

Повномасштабне вторгнення Росії в Україну в лютому 2022 року та подальша енергетична криза по всій Європі виявили небезпечну залежність європейських країн від російських енергетичних ресурсів. Російське вторгнення в Україну призвело до кардинальної зміни енергетичної стратегії Європейського Союзу (ЄС). Реалізуючи стратегією REPowerEU, ЄС вже скоротив імпорт російського газу на дві третини (з 45% до 15% загального імпорту газу у ЄС) та планує повністю відмовитися від російських енергетичних поставок «задовго до кінця десятиліття». Стратегія ЄС щодо повного заміщення російських енергетичних поставок та прискорення впровадження відновлюваних джерел енергії є складною на даний момент, але має вирішальне значення для довгострокової енергетичної безпеки Європи. Поточні зобов'язуючі цілі ЄС щодо досягнення 42,5% відновлюваних джерел енергії в загальному енергетичному балансі до 2030 року відповідають стратегії Європейського зеленого курсу та спрямовані на незалежність ЄС від російських енергетичних ресурсів.

Наразі Україна несе основний тягар війни, включаючи тисячі смертей, мільйони біженців, окуповані території та зруйновану інфраструктуру. Національна енергетична безпека – це лише один із багатьох викликів, що стоять перед країною. Дотримуючись стратегії ЄС, Україні терміново потрібно трансформувати свій енергетичний сектор у сталий спосіб. Поточний план України щодо досягнення 27% відновлюваних джерел енергії в загальному виробництві енергії до 2030 року, хоча й менш амбітний, ніж цілі ЄС, але є переконливою стратегією, враховуючи воєнну ситуацію в країні. Країна може і повинна значною мірою покладатися на відновлювані джерела енергії, включаючи сонячну та вітрову генерацію. Виробництво біогазу та біометану також може відігравати значну роль у заміні природного газу в Україні, враховуючи величезний сільськогосподарський потенціал країни. Поряд із суттєвим підвищенням енергоефективності, це перетворить енергетичний сектор України на сталий та безпечний. *Ключові слова:* енергетична безпека, сталий розвиток, відновлювані джерела енергії, енергетичні ресурси, війна Росії в Україні.

Problem statement. Sustainability and environmental issues are important parts of the long-term national energy security strategy, but in times of energy crises the demands for sustainable energy resources may be temporary compromised, at least in the short-term, by urgent demands for the nations in available energy resources [1]. Urgent needs for most European countries

to replace Russian gas and oil forced the nations search other options, including, e.g., returning to coal, which is obviously not the environmentally friendly choice. On the other hand, the energy challenges over Europe due to Russian invasion of Ukraine will accelerate the transition of the EU member states to renewables, and change the situation in the long-term. For example, sig-

nificant part of the REPowerEU strategy of the European Commission for overcoming the EU's dependence on Russian gas envisages renewable sources [2].

In 2023, the EU's natural gas supply already decreased by 7.4% compared with 2022, marking the lowest value since 1995. Moreover, in 2023 brown coal supply decreased by 24.2%, and hard coal supply dropped by 20.4% compared to 2022. Both figures are the lowest recorded since the Eurostat data series began [3].

Meanwhile, Ukraine is becoming an integral part of the EU community, which means Ukraine may and should be a part of energy sector of the EU, sharing all challenges and approaches of the Union for its energy security.

In this article, we analyze the challenges of energy security for the EU and Ukraine due to the Russian war against Ukraine.

Energy sector of the European Union. More than a decade ago, in response to global financial and economic crisis of 2008, the EU strengthened sustainable development approaches through the implementation of Europe 2020 strategy on smart, sustainable and inclusive growth [4]. In terms of this strategy, among other priorities, the EU was determined to reach 20% renewables in the total energy mix of the Union in 2020. The goal was achieved as in 2020 renewable energy represented 22.1% of energy consumed in the Union [5]. Further climate / energy goals of the EU were set in the European Green Deal [6] and in Fit for 55 strategy [7]. Finally, according to the Directive (EU) 2023/2413 (the revised Renewable Energy Directive) [8], the EU binding renewable target for total energy consumption was set as 42.5% by 2030.

While renewables were the EU's priority for many years in terms of global warming, restriction of dependence of the Union on Russian energy supplies also implied. And the EU authorities had strong evidence on the risks of the EU significant dependence on Russia. Yet in 2018, the European Parliament authorized the analytical research on the EU vulnerability in its energy dependence on "authoritarian Russian regime" [9]. The analysis clearly demonstrated that during many years Russia used its energy resources as a powerful tool of its foreign policy for geopolitical motives. The analysis concluded on high risks for the EU member states due to its dependence on Russian natural gas supplies.

For European countries, Russian gas was cheaper than from other sources. It was not only due to geographical reasons, but it was one of Putin's geopolitical tricks. This resulted in more than half share of Russian gas in natural gas imports of many EU member states, e.g., in Germany and Hungary – 57%, in Austria – 64%, in Greece, Slovakia, Latvia and Estonia – about or over 80%, Bulgaria and Finland – 100% [9].

Being ten times weaker compared to the EU in terms of GDP, Russia managed to control the EU energy market significantly [10]. And due to vast energy resources, Putin's regime received significant financial resources for its war crimes. For example, in 2021 Russia's global revenue from fuel sale reached about \$250 billion [11].

But just in a few days after the beginning of the war, the European Commission issued the communication on energy security of the EU member states REPowerEU, increasing the level of demands [2]. The communication had a clear purpose to solve the problem of energy dependence of the EU on Russia as soon as possible. The Commission confirmed that Russia provided about 45% of the EU's total natural gas consumption, 27% of oil imports and 46% of coal imports of the EU.

The communication proposed a detailed list of actions, which could decrease the EU demands in Russian gas by two thirds to the end of the 2022 and totally refuse Russian gas imports by 2030. It is the most radical plan in energy security of the EU that needs coordinated efforts of the EU member states and their partners. Two key strategies of the plan are:

- Diversifying gas supplies via higher LNG and pipeline imports from non-Russian suppliers, higher levels of biomethane and hydrogen;
- Reducing faster the EU dependence on fossil fuels by boosting energy efficiency and increasing the share of renewables.

According to the document, by the end of 2022 the EU was able to replace over 100 bcm of Russian gas, following such measures as:

- LNG diversification – 50 bcm replacement;
- Pipeline import diversification – 10 bcm replacement;
- Increasing wind and solar deployment and green hydrogen production – 20 bcm.

In further response on Russian blackmailing, the European Commission called for energy saving in every member state through the reducing gas consumption by 15%. That was the equivalent of 45 bcm of natural gas saving. As a result of concerted actions of the EU member states, in 2023 the import of Russian natural gas into the EU fell to less than 15%, including LNG [12].

Renewable energy potential of the EU. Share of renewable energy more than doubled between 2004 and 2020 through the EU member states. Sweden had 60% of energy from renewable sources in its gross final consumption of energy in 2020, following by Finland (44%) and Latvia (42%) [5]. The share of energy consumed in the EU during 2022 generated from renewable sources was 23% [13], demonstrating slight growth compared with previous year, but not significant enough to reach the ambitious EU goals for renewables till 2030.

Solid biomass is the largest among renewable energy sources throughout the EU, widely used in electricity generation, industry and residential heating. It represented 40% of the total renewable energy supply in the EU in 2022, followed by wind (15%), hydropower (10%) and liquid biofuels (7%). Solar photovoltaics and heat pumps each represented around 7% of the EU renewable supply. Other significant renewables sources were biogases, renewable waste, geothermal and solar thermal [13].

To be clear, in electricity generation throughout the EU, which is only a part of the total energy mix. And in

2023, renewable energy already accounted 44.7% of all electricity production in the EU, marking an increase of 12.4% compared with 2022 [3].

As for Russian natural gas physical replacement, biomethane is an important renewable alternative with a big potential throughout the EU. Even before the current challenges with Russian energy supplies, some EU member states demonstrated great potential of these renewables. For example, Germany had estimated about 9,700 biogas plants operating as of 2018. That was the highest number of biogas plants in any country in Europe and the world. There was a total installed capacity of 4.8 GW, and about 32,500 GWh of electricity and 17,200 GWh of heat generation in Germany in 2017 using biogas [14].

As for the progress in the field, according to the European Biogas Association [15], in 2022 Europe produced 21 bcm of biogas, including 18 bcm of biogas produced in 27 EU member states. And 20% of biogas produced in Europe in 2022 were upgraded to biomethane. From this 4.2 bcm of biomethane, 3.4 bcm were produced in the EU. Thus, biomethane production doubled in Europe from 2018 to 2022. The fastest growth was demonstrated in France, Italy, and Denmark.

The Hydrogen Strategy for a Climate Neutral Europe was adopted in the EU in 2020 [22] as a part of ambitions of the European Green Deal [6]. The priority is the use of green hydrogen, which is produced due to electricity from renewable sources. The proposed phased approach assumed that in 2020 – 2024, at least 6 GW of electrolyzers should be installed in the EU and up to one million tons of hydrogen will be produced from renewable energy sources.

Energy sector of Ukraine. Before the Russian war against Ukraine, energy production in Ukraine was mostly provided by fossil fuels and nuclear power. In 2020, Ukraine had the following structure of primary energy sources: natural gas – 27.5%, coal – 26.4%, nuclear energy – 23.1%, oil – 16.4%, renewables – 6.6% [16]. Thus there was a significant dependence on natural gas and nuclear energy, and extremely low share of renewables in energy sector of Ukraine.

During the last before-the-war years, Ukraine produced about 20 bcm of natural gas annually. It covered about two thirds of the national demands in natural gas. The rest of gas supplies, about 8-10 bcm, was imported to the country from some EU member states (Slovakia, Hungary, and Poland). But it was mostly Russian gas by the origin. Ukraine also has been 85% dependent on the imports of petroleum products. And the share of oil products produced in Russia or from Russian raw materials in the structure of Ukrainian imports exceeded 80%. Ukraine also remained significantly dependent on the supply of nuclear fuel from Russia, which met more than 50% of needs of Ukrainian nuclear power plants.

Thus, Ukraine shares the challenges of most European countries in its dependence on Russian energy resources. Russian aggression aggravated the situation for Ukraine. The matter is that the Dnipro-Donetsk region of Ukraine

accounts for approximately 90% of national gas production. Now this region is severely affected by the war. According to the national experts, about 70% of gas production facilities in the country currently may be destroyed or out of operation.

Among the advantages of Ukraine in energy sector, there is a potent gas transportation system, which during decades served as the main transport route for Russian gas to Europe. The other important part of energy infrastructure of Ukraine is the largest in Europe underground natural gas storage facilities (more than 30 bcm), which comprise 21% of total European facilities. And while the gas transportation system will lose its significance for Russian gas transport, Ukrainian gas storage facilities may play important role in energy security of both Ukraine and the EU.

Potential of renewable energy production in Ukraine. Paying attention to the low level of renewables in the total energy mix in Ukraine, in 2021 Ukrainian government proposed National Action Plan for the Development of Renewable Energy until 2030 [17]. According to the plan, in 2030, Ukraine should produce 27% of the whole energy mix from renewables. This level is much lower than updated plans in the EU (42.5% as a binding target), and Ukraine does have the potential to reach more.

It is worth to indicate, that in Ukraine about three quarters of renewables are bioresources [16]. Being one of the largest producers of agricultural crops in the world, Ukraine has a huge potential in bioresources, first of all, in form of agricultural residues. Experts of Bioenergy Association of Ukraine (UABIO) calculated that Ukraine has a biomass potential for energy production in a total of 21.7 million tons of oil equivalent (toe) per year. The main components of the energy potential of biomass are by-products and waste of agriculture, and agricultural residues. The largest shares of the potential of agricultural residues fall on the straw of cereal grain crops (36%) and by-products/waste from the production of grain corn – 33% [18].

Moreover, according to the last UABIO assessment [19], transforming available and potential bioresources, Ukraine may produce about 22 bcm of biogas/biomethane per year. Among the most powerful bioresources for biogas production, the UABIO experts name cover crops and harvest residues from agricultural crops. A bit less potential for biogas production in Ukraine was revealed by experts of Ukrainian Technological Company (UTC). Being one of the major industrial companies in biogas technology in the country, UTC assesses potential of Ukraine in biomethane production in up to 15 bcm annually with new facilities installation in a scale of about one bcm of biomethane production per year. This approach is promising for Ukraine. Because this way Ukraine may use natural gas transportation system and natural gas storage facilities.

Biogas production generates a significant amount of useful side product, digestate, which may be used as an

organic fertilizer. Organic waste treatment has additional benefits for the environment. Organic waste deposited in landfills, produces a significant amount of biomethane as a pollutant of the atmospheric air. Methane is a powerful greenhouse gas, 80 times stronger for greenhouse effect / global warming than carbon dioxide. For Ukraine this question is more than relevant as most of municipal waste is still going to the landfills here. On the other side, being treated in the technological process of anaerobic digestion, organic waste will be transformed into valuable energy resource.

Currently, Ukraine has only about 83 biogas plants with total capacity of 140 MW [19]. For comparison, in 2022, Germany, the main biogas producer in Europe, had 9,876 biogas plants with total capacity of about 13 GW (91 TWh) replacing about 10.8% of natural gas by biogas [20]. Ukraine has both significant bioresources for biogas production and sufficient amount of well-educated professionals in the fields of biotechnology and industrial ecology. Under the financial and technological support of European and American partners, Ukraine may fast reach significant progress in biogas / biomethane production.

Ukraine has relatively good climate conditions for wind and solar power generation. Today not only Ukraine has low level of renewables in the national energy mix (about 6.6%), but most renewables (75% of them) are represented by bioresources, mostly solid biofuels [16]. Meanwhile international experts assess the potential of wind power generation in Ukraine in stunning 320 GW [21], which technically may cover the all national energy demands. Of course, this potential should be restored yet through the deoccupation of southern regions of the country. Because the most promising wind power regions are the southern and southeastern parts of Ukraine.

Solar generation also has a high potential in Ukraine. Even though Ukraine is in the lower part of the list of countries according to its photovoltaic power potential, the country is ahead of many European states, including Germany, Austria, Czech Republic and Poland [22].

The National Renewable Energy Action Plan of Ukraine implies the construction of 10 GW of electrolyzers for the production of green hydrogen on the territory of Ukraine, the country can become an integral part of the implementation of the ambitious goals of the European Green Deal [23]. In addition to Ukraine's role as a producer of green hydrogen on the European market, the EU may be also interested in adapting the Ukrainian gas transportation system to supply a mixture of hydrogen and natural gas. As experts note, there is no infrastructure for hydrogen in Eastern Europe. Its creation will take ten or more years. The possibility of using existing gas pipelines for the transfer of hydrogen or hydrogen mixtures requires research and practical tests but are promising.

Nuclear power generation in Ukraine. The important issue for Ukrainian energy sector is the challenge

of nuclear power. Ukraine is the third European country after France and Slovakia with highest share of nuclear power in energy mix. Before the war, Ukraine generated about 55% of its electricity in 15 nuclear reactors. The challenge here is that most nuclear reactors exhausted its operation life (30 years). Meanwhile, Nuclear Energy Agency (NEA) experts concluded that if nuclear utilities implement enhanced ageing management programmes using readily available technical evidence, while performing the necessary repairs and replacements, long-term operation should not face any major generic technical barriers [24].

Nevertheless, Ukraine has a bad historic background being the country affected by the biggest nuclear accident in the world, the Chernobyl (Chernobyl) disaster. See, for example, [25]. So, the country needs both strict international technological control during the operation of its nuclear reactors and research-based decisions on its further operation.

The challenges in energy sector for Ukraine. Energy infrastructure of Ukraine is worn and outdated in general. Almost all power units of thermal power plants have exhausted their park resource, are technologically outdated. The power units of nuclear power plants formally should be decommissioned due to the end of their service life. Electrical networks are experiencing significant deterioration, with some components exhibiting over 70% degradation. All these facilities need to be rebuilt and modernized in nearest years in terms of national energy security.

Due to the war, many national industrial sites, including Azovstal in Mariupol city, one of the largest steel rolling companies in the country, were destroyed or occupied. This situation will result in different consequences for the national energy sector. On one side, Ukraine will need huge energy resources to restore the national economy and to rebuild the country after the war. On the other side, before the war, Ukrainian economy was one of the most energy inefficient in Europe. For example, energy consumption per unit of national GDP in Ukraine was about 3 times higher than average throughout the EU [26]. And the country should use postwar economic recovery for radical technological modernization of all branches of the economy to make it much more energy efficient. In turn, it may significantly reduce the national demands in energy resources, including natural gas.

The war added new risks and challenges in energy security both for Ukraine and for whole Europe, e.g., currently the largest Ukrainian nuclear power plant, the largest in Europe, with 6 nuclear reactors, Zaporizhzhia NPP, is under the control of Russian invaders. Energy infrastructure of Ukraine was significantly affected due to permanent Russian terrorist attacks (see, for example, [27]).

Conclusions. A long-term dependence of most European countries, including Ukraine, on Russian energy resources was a significant risk, which European community should overcome. The EU's strategy on a total replacement of Russian natural gas, acceleration of renew-

ables' installations, and energy saving / energy efficiency strengthen European energy security in middle and long terms, being challenging at the moment. Ukraine being an integral part of European community and defending European democratic values and freedoms, meets huge challenges in all fields of the country's life, including energy security issues. Strong international support is crucial both for Ukrainian victory and for successful postwar recovery of the country. Ukraine itself has a significant potential in energy sector, e.g., developed infrastructure

for natural gas transportation and storage, great potential in biogas / biomethane production, and a significant electricity production due to the nuclear power generation.

Acknowledgment. The authors are grateful to the Armed Forces of Ukraine for the protection. Supported by Erasmus+ projects 101085243-ProEU-ERASMUS-JMO-2022-HEI-TCHRSCH, 101127449-EcoEurope-ERASMUS-JMO-2023-HEI-TCH-RSCH, and 101085755-JM_RE-ERASMUS-JMO-2022-HEI-TCH-RSCH.

References

1. Žuk P., Žuk P. National energy security or acceleration of transition? Energy policy after the war in Ukraine. *Joule*, 2022. 6(4): 709-712.
2. EC, REPowerEU: Joint European Action for More Affordable, Secure and Sustainable Energy. COM(2022)108. Strasbourg, 2022.
3. Eurostat, Renewables take the lead in power generation in 2023, 2024.
4. EC, Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. Brussels, 3.3.2010. COM (2010) 2020., 2010.
5. Eurostat, Renewable energy statistics, 2022.
6. EC, The European Green Deal. COM(2019) 640 final. Brussels, 11.12.2019, 2019.
7. EC Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality. COM(2021)550 final. Brussels 14.7.2021. 2021.
8. EP&CM, Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652, 2023.
9. Korteweg R., Energy as a tool of foreign policy of authoritarian states, in particular Russia. Policy Department for External Relations Directorate General for External Policies of the Union, 2018.
10. Poitiers N., Tagliapietra S., Wolff G.B., Zachmann G. The Kremlin's gas wars. How Europe can protect itself from Russian blackmail. *Foreign Affairs*, 2022. 28.
11. Polak P., Polakova B. Changes in the EU's Geopolitical Position and Energy Doctrine in Light of the Ukraine Invasion. *Society*, 2022: 1-5.
12. EC European Council: Where does the EU's gas come from? 2024.
13. EEA, Share of energy consumption from renewable sources in Europe, 2024.
14. WBA, World Biogas Association. Market report: Germany, 2022.
15. EBA, EBA [European Biogas Association] Statistical Report 2023.
16. Укрстат, Енергетичний баланс України за 2020 рік. Експрес-реліз. 30.11.2021, 2021.
17. КМУ, Проект Національного плану дій щодо розвитку відновлюваної енергетики до 2030 року. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України 2021: Київ.
18. Geletuha G., Zhelezna T., Dragnev S., Ten actions of Ukraine to reject Russian natural gas. Position paper UABIO, Editor 2022.
19. Geletukha G., Biomethane in Ukraine – potential and prospects, market features as a part of common European system, in *Energy Security Project*. 2024, UABIO.
20. GBA, German Biogas Association: Return to Germany's pace is needed – Stagnation instead of expansion in the German biogas sector, 2023.
21. IRENA, Cost-Competitive Renewable Power Generation: Potential across South East Europe, 2017.
22. WB, Global Photovoltaic Power Potential by Country, 2020.
23. Прокопчук С. Воднева стратегія ЄС. Україна повинна використати свій потенціал. Урядовий кур'єр, 2020. 31 липня 2020 р.
24. OECD, Long-Term Operation of Nuclear Power Plants and Decarbonisation Strategies. NEA No. 7524, 2021.
25. Sidorik E., Yakymenko I. A Brief Review on Animal Research and Human Health Effects Following the Chernobyl Accident. *Radiation emergency medicine*, 2013. 2(1): 5-13.
26. BusinessViews, Chart of the day: Ukraine is a global outsider in energy efficiency. Why is that and what should be done?, 2019.
27. Kharchenko V., Kotynsky A., Yakymenko I. Ecocide in Ukraine as a Result of Targeted Russia's War Crimes. *Selected Papers of the VI International Conference on European Dimensions of Sustainable Development*, May 15-17, 2024, 2024: 411-421.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ДЕГРАДОВАНИХ ЗЕМЕЛЬ ЧЕРЕЗ ІННОВАЦІЙНІ ІНСТРУМЕНТИ ЗЕМЛЕУСТРОЮ

Герасимчук О.Л., Шевчук Л.М., Васильєва Л.А., Кагукіна А.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

kgt_gol@ztu.edu.ua, knz_shlm@ztu.edu.ua, knz_vla@ztu.edu.ua, ke_kham@ztu.edu.ua

Актуальність дослідження. Деградація земель в Україні, спричинена інтенсивним використанням та війною, становить загрозу продовольчій безпеці та екологічному балансу, вимагаючи негайних інноваційних рішень у землеустрої та управлінні земельними ресурсами, що є ключовим інструментом для раціонального використання, збереження та відтворення земельного фонду.

Метою статті є ідентифікація та аналіз ефективних сучасних підходів до управління та відновлення деградованих земель. Особлива увага приділяється інтеграції інноваційних інструментів землеустрою з метою збереження та раціонального використання земельних ресурсів.

Методологічна база роботи ґрунтувалася на всебічному теоретичному аналізі актуальної наукової літератури, чинних нормативно-правових актів та існуючих методик землеустрою, що стосуються рекультивативної деградованих земель. Додатково застосовано системний підхід для оцінки впливу інноваційних технологій на ефективність процесів відновлення земель.

Викладення основного матеріалу. Дослідження підкреслює значення землеустрою як комплексного механізму для профілактики деградації та реабілітації ґрунтів. Розглянуто такі інноваційні інструменти оцінки стану деградованих земель, як дистанційне зондування Землі, геоінформаційні системи та моніторинг органічного вуглецю. Запропоновано конкретні інноваційні підходи в землеустрої: регенеративний землеустрій, точне землеробство, біоінженерія та вертикальний землеустрій.

SWOT-аналіз використання інноваційних заходів землеустрою виявив їхні переваги (точність, оперативність, покращена візуалізація) та виклики (вартість, потреба в кваліфікованих кадрах, недосконала нормативно-правова база). Акцентовано увагу на необхідності законодавчої підтримки, програм компенсації, державного моніторингу та інтеграції стейкхолдерів.

Висновки. Застосування сучасних технологій дозволяє реалізовувати передові методи діагностики та управління земельними ресурсами, що сприятиме підвищенню точності даних, ефективному використанню ресурсів та зменшенню впливу на кліматичні зміни, забезпечуючи екологічну стійкість та соціально-економічні вигоди. *Ключові слова:* земельні ресурси, деградовані землі, землеустрій, управління земельними ресурсами, сталий розвиток територій.

Modern approaches to the management and restoration of degraded lands through innovative land management tools.
Herasymchuk O., Shevchuk L., Vasilieva L., Kagukina A.

Relevance of the study. Land degradation in Ukraine, caused by intensive use and war, poses a threat to food security and ecological balance, requiring immediate innovative solutions in land management and land resources management, which is a key tool for the rational use, preservation and reproduction of the land fund.

The purpose of the article is to identify and analyze effective modern approaches to the management and restoration of degraded lands. Special attention is paid to the integration of innovative land management tools for the purpose of preserving and rational use of land resources.

The methodological basis of the work was based on a comprehensive theoretical analysis of the current scientific literature, current regulatory legal acts and existing land management methods related to the reclamation of degraded lands. Additionally, a systematic approach was applied to assess the impact of innovative technologies on the effectiveness of land restoration processes.

Presentation of the main material. The study emphasizes the importance of land management as a comprehensive mechanism for the prevention of soil degradation and rehabilitation. Such innovative tools for assessing the state of degraded lands as remote sensing of the Earth, geographic information systems (GIS) and organic carbon monitoring are considered. Specific innovative approaches in land management are proposed: regenerative land management, precision agriculture, bioengineering and vertical land management.

SWOT analysis of the use of innovative land management measures revealed their advantages (accuracy, efficiency, improved visualization) and challenges (cost, need for qualified personnel, imperfect regulatory framework). Emphasis is placed on the need for legislative support, compensation programs, state monitoring and stakeholder integration.

Conclusions. The use of modern technology allows for the implementation of advanced methods of diagnostics and management of land resources, which will contribute to increasing data accuracy, efficient use of resources and reducing the impact on climate change, ensuring environmental sustainability and socio-economic benefits. *Key words:* land resources, degraded lands, land management, land resources management, sustainable development of territories.

Постановка проблеми. Деградація земель постає глобальною проблемою людства, вирішення якої потребує консолідації зусиль влади, науковців та землекористувачів. Порушення земельних ресурсів чинить негативний вплив на продуктивність екосистем, збереження біорізноманіття та соціально-економічний розвиток регіонів. Коли земля деградує або страждає від посухи, вона втрачає здатність підтримувати життя, що призводить до низки наслідків від неврожаю до міграції та конфліктів [1]. Це є одним із найбільших викликів для сталого розвитку.

Ефективне управління та відновлення деградованих земель потребує комплексного підходу. У зв'язку з цим постає потреба впровадження інноваційних методів землеустрою, які дозволяють не лише оцінити масштаби проблеми, а й мінімізувати її наслідки.

Актуальність дослідження. Інтенсивне використання земельних ресурсів для сільськогосподарського виробництва призвело до зростання кількості розораних земель, що супроводжується виникненням та розвитком деградації ґрунтів. Найвищий показник розораності в Україні [2] зафіксовано у 2019 році на рівні 54,3%. Площа сільськогосподарських земель становила 70,7% від загальної площі (рис. 1).



Рис. 1. Склад земельних ресурсів України станом на 1 січня 2020 року (складено згідно [2])

Впродовж останніх років кількість розораних земель скоротилася майже вдвічі, однак нераціональне використання викликало суттєві порушення складу та структури ґрунту. Ерозія ґрунтів, їх виснаженням, засоленням та зниженням біопродуктивності – основні ознаки деградаційних процесів, які характерні для України. Проте проблема деградації ґрунту є однією з найгостріших екологічних проблем сучасності, яка зачіпає питання світової продовольчої безпеки, економічного розвитку і екологічного балансу.

Ключовим інструментом для забезпечення ефективного управління земельними ресурсами виступає землеустрій, який забезпечує комплексний підхід до управління деградованими землями, створюючи умови для їх раціонального використання, відновлення та охорони.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Інтенсивне господарювання, кліматичні зміни та військові дії на території нашої держави посилюють та пришвидшують перебіг процесів деградації ґрунтового покриву. Аналіз інноваційних методів їх відновлення та впровадження сучасних технологій землеустрою забезпечить підґрунтя для створення ефективних планів раціонального використання земель, рекультивації порушених територій та моніторингу змін. Це сприятиме збереженню продуктивності ґрунтів, екологічному відновленню та підвищенню економічної цінності земельних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження проблем деградації ґрунтів, їх охорони та раціонального використання не втрачають своєї актуальності впродовж багатьох десятиліть. Стрімкі кліматичні зміни, збройні конфлікти створюють нові виклики та ставлять перед науковцями завдання щодо пошуку шляхів оптимізації землекористування та відновлення деградованих ґрунтів. Вітчизняні та зарубіжні науковці в своїх дослідженнях приділили значну увагу вивченню питань деградації ґрунтів, їх охорони, а також засадам землеустрою. Вчені [3, 4] в своїх працях провели аналіз світових тенденцій сталого землекористування, досягнення цілей сталого розвитку та індикаторів деградації земель ЄС. Фахівці [5] розглядають землеустрій на принципах його практичного застосування для збереження та відновлення родючості ґрунтів. Чинники, що впливають на розвиток землеустрою та забезпечення сталого землекористування проаналізовано в працях науковців [6]. Роль землеустрою в територіальному плануванні та раціональному використанні територій досліджено авторами [7, 8]. Експерти [9] окреслили проблеми раціонального використання земель сільськогосподарського призначення, визначили причини їх деградації та запропонували шляхи подолання цих проблем з урахуванням рівня екологічного порушення зазначених територій.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Актуальність проблеми деградації ґрунтів, необхідності їх збереження та відновлення зазначена в численних наукових працях. Однак реалізація практичних рішень щодо управління та відновлення деградованих земель через інноваційні методи землеустрою розкриті недостатньо, що потребує їх подальшого дослідження.

Методологічне або загальнонаукове значення. Метою статті є визначення та аналіз ефективних сучасних підходів до управління та відновлення деградованих земель із застосуванням інноваційних інструментів землеустрою, спрямованих на збереження та раціональне використання земельних ресурсів. Методологія дослідження включала теоретичний аналіз наукової літератури, законодавчих актів та існуючих методик землеустрою, що стосу-

ються відновлення деградованих земель та системний підхід щодо оцінки впливу інноваційних технологій на процес відновлення земель.

Викладення основного матеріалу. Деградація ґрунтів є однією з ключових екологічних проблем, що знижує їхню продуктивність і порушує екосистемну рівновагу. Активне використання земельних ресурсів, втрата рослинного покриву, антропогенне забруднення ґрунтів, поширення ерозійних процесів та стрімкі кліматичні зміни – перелік причин деградації ґрунтів.

Від початку повномасштабного вторгнення використання земельних ресурсів в Україні суттєво скоротилось. Станом на початок 2024 р. площа територій України, придатних для ведення господарської діяльності, склала 48109,77 тис. га, тобто збільшилась на 16,78 % порівняно із 2022 р. та на 2,83 % відносно 2023 р.. Площа лісів на лісовкритих землях збільшилась на 18,53 % порівняно із 2022 р., сільськогосподарських угідь – на 16,69 %, зокрема ріллі та перелогів – на 15,31 %, сіножатей і пасовищ – на 24,07 % [10] (рис.2).

Розораність земель залишається стабільно високою, а у поєднанні зі зменшенням площі лісів та лісовкритих територій це підвищує ризик деградації ґрунтів.

В Україні відновлення та охорона ґрунтів регулюються законодавством, що охоплює основні аспекти охорони навколишнього середовища, раціонального використання земельних ресурсів, а також заходи щодо збереження родючості ґрунтів. Серед основних нормативно-правових актів слід відзначити Конституцію України, Земельний кодекс, Закон України «Про охорону земель», Закон України «Про державний контроль за використанням та охороною

земель» та інші нормативні документи, які регламентують основні напрямки й механізми щодо використання, охорони та відтворення ґрунтів. Україна також активно працює над адаптацією законодавства до європейських стандартів у рамках Угоди про асоціацію з ЄС. Особливу увагу приділяють боротьбі з ерозією ґрунтів, відновленню деградованих територій, а також впровадженню сучасних методів агро-екології.

Землеустрій відіграє важливу роль у захисті та відновленні деградованих земель, оскільки він є комплексним інструментом управління земельними ресурсами, спрямованим на їх раціональне використання, збереження та відтворення. Інноваційні підходи землеустрою для ефективної протидії деградації земель забезпечують їх стале використання. Комплекс таких заходів охоплює регенеративні практики, точне землеробство, біоінженерні рішення, оптимізацію водного режиму, а також системне відновлення деградованих ґрунтів, підкріплене законодавчими ініціативами та активною взаємодією зі стейкхолдерами. Завдання включають як діагностику й профілактику подальшої деградації ґрунтів, так і розробку заходів для їх реабілітації.

Сучасні технології дозволяють проводити точну діагностику стану ґрунтів. Центральне місце в цьому процесі посідає моніторинг органічного вуглецю в ґрунті, який є ключовим інструментом для оцінки деградації, управління та відновлення земель. Вміст органічної речовини, представлена органічним вуглецем – це критичний показник здоров'я, родючості та екосистемних функцій ґрунту, зниження якого вказує на деградаційні процеси, що мають серйозні наслідки для сільського господарства, екологічної стабільності та кліматичної стійкості. Для ефектив-

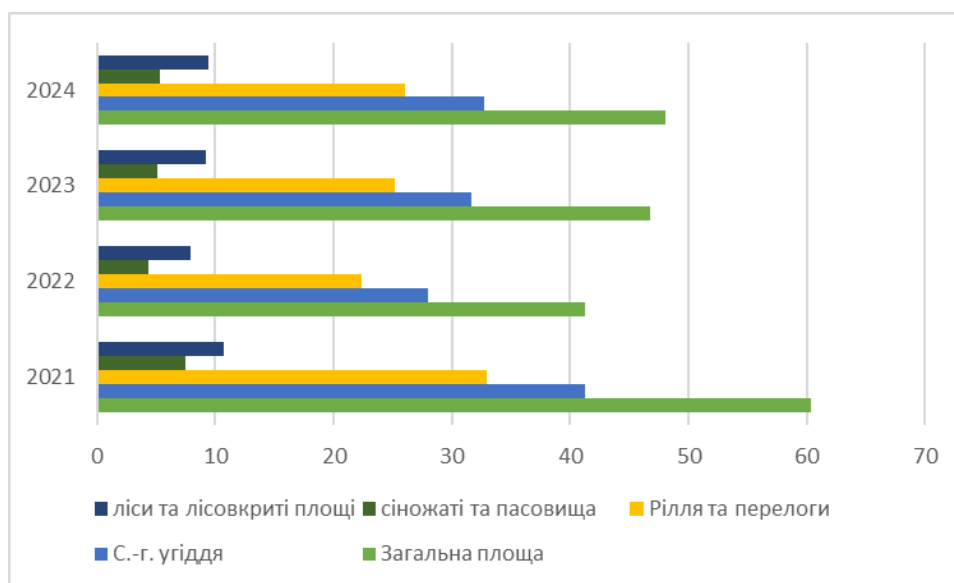


Рис 2. Динаміка земельних ресурсів України у 2021–2024 рр. (складено авторами на основі [10])

ної оцінки цих процесів активно використовуються супутникові знімки та дрони (ДЗЗ). Вони надають можливість оперативно та масштабно визначити рівень ерозії, засолення, а також зниження родючості ґрунтів. Отримана інформація, завдяки високій точності ДЗЗ, стає основою для виявлення проблемних ділянок.

Подальша інтеграція та аналіз цих просторових даних для візуалізації та прийняття обґрунтованих рішень відбувається за допомогою геоінформаційних систем (ГІС). ГІС дозволяють об'єднати дані ДЗЗ з іншими джерелами інформації, такими як лабораторні аналізи, створюючи комплексні карти стану ґрунтів. Це дозволяє не тільки оцінити поточний стан, а й відстежувати динаміку змін, моделювати розвиток деградаційних процесів та ефективність відновлювальних заходів.

Землеустрій стає платформою для реалізації практичних рішень у зменшенні деградації. Впровадження інноваційних заходів землеустрою має низку переваг і викликів (табл. 1).

Проведений SWOT-аналіз допомагає краще зрозуміти поточні можливості та виклики, пов'язані з використанням інноваційних заходів землеустрою для оцінки деградації, управління та відновлення

земель, та розробити ефективні стратегії для їхнього впровадження.

Висновки.

Землеустрій є важливим інструментом для забезпечення сталого управління земельними ресурсами. Серед ефективних підходів землеустрою виділяють регенеративні практики, точне землеробство, біоінженерні рішення, оптимізацію водного режиму, які потребують впровадження інноваційних засобів або технологій, що дозволяють реалізовувати передові методи діагностики та управління земельними ресурсами.

Проведений SWOT-аналіз використання сучасних технологій землеустрою для оцінки деградації, управління та відновлення земель демонструє їхні переваги: точність, оперативність, покращена візуалізація, а також виклики, що їх супроводжують, зокрема: висока вартість, потреба в кадрах, нормативно-правова база.

Інноваційні методи землеустрою є ключовими для вирішення проблем деградації земель. Вони дозволяють інтегрувати сучасні технології моніторингу, управління та відновлення, забезпечуючи екологічну стійкість і соціально-економічні вигоди. Розвиток таких підходів залежить від державної підтримки, наукових досліджень та міжнародної співпраці.

Таблиця 1

SWOT-аналіз використання інноваційних інструментів землеустрою для оцінки деградації, управління та відновлення земель

Сильні сторони:	Слабкі сторони:
Підвищена точність та об'єктивність оцінки деградації: Застосування ДЗЗ, ГІС, дронів забезпечує більш точні та об'єктивні дані про стан земель порівняно з традиційними методами.	Висока вартість впровадження та підтримки: Закупівля обладнання, програмного забезпечення, навчання персоналу та постійне оновлення технологій можуть бути значними фінансовими витратами.
Оперативність та масштабність моніторингу: Інноваційні технології дозволяють швидко охоплювати великі території та відстежувати динаміку деградаційних процесів у режимі реального часу або з високою періодичністю.	Потреба у висококваліфікованих кадрах: Ефективне використання інноваційних технологій вимагає наявності фахівців з відповідними знаннями та навичками в галузі ГІС, ДЗЗ, програмування, аналізу даних тощо.
Покращена візуалізація та аналіз даних: ГІС забезпечують потужні інструменти для візуалізації просторової інформації, проведення комплексного аналізу взаємозв'язків між різними факторами деградації.	Проблеми інтеграції з існуючими системами та даними: Необхідність інтеграції нових технологій з існуючими базами даних та робочими процесами може бути складною та потребувати значних зусиль.
Підвищення ефективності планування відновлювальних заходів: Точні дані та моделювання дозволяють розробляти більш цілеспрямовані та ефективні плани відновлення з урахуванням локальних особливостей.	Залежність від технічної інфраструктури та доступу до інтернету: Ефективне використання багатьох інноваційних технологій залежить від наявності стабільного інтернет-з'єднання та розвиненої технічної інфраструктури.
Можливість прогнозування та моделювання майбутніх змін: Застосування інформаційних технологій дозволяє прогнозувати розвиток деградаційних процесів та оцінювати ефективність різних сценаріїв управління.	Ризики, пов'язані з якістю та достовірністю даних: Необхідність ретельної перевірки та калібрування даних, отриманих з різних джерел (супутники, дрони, сенсори), для забезпечення їхньої достовірності.
Забезпечення прозорості та обґрунтованості прийняття рішень: Об'єктивні дані та аналіз сприяють більш прозорому та обґрунтованому прийняттю управлінських рішень у сфері земельних ресурсів.	Можливі етичні та конфіденційні питання: Збір та обробка великих обсягів просторових даних можуть викликати питання щодо приватності та конфіденційності інформації.
Покращення залучення зацікавлених сторін: Візуалізація даних та партисипативні ГІС-інструменти можуть сприяти кращому розумінню проблем та залученню громадськості до процесів прийняття рішень.	Недостатня нормативно-правова база: Відсутність або недосконалість нормативно-правового регулювання використання деяких інноваційних технологій (наприклад, дронів) може стримувати їхнє широке впровадження.

Можливості:	Загрози:
Покращення якості державного управління земельними ресурсами: Впровадження інновацій може підвищити ефективність державного земельного кадастру, моніторингу використання земель та контролю за дотриманням природоохоронного законодавства. Сприяння сталому сільському господарству: Технології точного землеробства, моніторингу стану ґрунтів та рослинності можуть допомогти оптимізувати використання ресурсів та зменшити негативний вплив на довкілля. Розвиток ринку геопросторових послуг та технологій: Зростаючий попит на інноваційні рішення у сфері землеустрою відкриває нові можливості для бізнесу та наукових досліджень. Покращення екологічної ситуації та адаптація до зміни клімату: Інноваційні підходи можуть допомогти у відновленні деградованих екосистем, підвищенні їхньої стійкості до кліматичних змін та зменшенні негативних наслідків. Залучення інвестицій та міжнародної допомоги: Активне впровадження сучасних технологій може зробити Україну більш привабливою для інвестицій та отримання міжнародної технічної допомоги у сфері управління земельними ресурсами. Підвищення обізнаності та екологічної культури: Візуалізація даних про стан земель та наслідки деградації за допомогою сучасних технологій може сприяти підвищенню обізнаності громадськості та формуванню екологічно відповідальної поведінки.	Повільне впровадження інновацій через бюрократію та консерватизм: Опір змінам та складні адміністративні процедури можуть гальмувати впровадження новітніх технологій. Недостатнє фінансування наукових досліджень та розробок: Обмежене державне фінансування може стримувати розвиток та адаптацію інноваційних рішень у сфері землеустрою. "Цифрова нерівність" та обмежений доступ до технологій: Нерівномірний доступ до сучасних технологій та недостатній рівень цифрової грамотності серед землекористувачів та органів управління можуть ускладнити їхнє широке впровадження. Ризик технологічної залежності від іноземних розробників: Необхідність розвитку власних технологічних рішень для забезпечення національної безпеки та зменшення залежності від іноземних постачальників. Можливість нецільового використання даних та технологій: Недостатній контроль за використанням геопросторових даних може призвести до їхнього неправомірного використання. Вплив геополітичної ситуації на доступ до технологій та обладнання: Міжнародні санкції або обмеження можуть ускладнити доступ до певних технологій та обладнання. Конкуренція з боку інших країн, які більш активно впроваджують інновації: Україна може втратити конкурентоздатність у сфері управління земельними ресурсами, якщо не буде активно впроваджувати сучасні технології.

Література

1. Конвенція Організації Об'єднаних Націй про боротьбу з опустелюванням (UNCCD). URL: <https://www.unccd.int/convention/official-documents> (дата звернення: 10.05.2025).
2. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні за 2019 рік. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Nats.-dop.-pro-stan-navk.-prirodного-seredovishha-v-Ukrayini-u-2019-rotsi.pdf> (дата звернення: 10.05.2025).
3. Butenko E., Loshakova Y. Sustainable land use and its assessment: global trends. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*. № 3, 2019. С. 37-47.
4. Schillaci, C., Jones, A., Vieira, D., Munafò, M., & Montanarella, L. Evaluation of the united nations sustainable development goal 15.3.1 indicator of land degradation in the European Union. *Land Degradation & Development*, 34(1), 2022. P. 250-268. doi: 10.1002/ldr.4457.
5. Смирнова С. М., Тлустий А. В. Землеустрій на позиціях збереження родючості ґрунту. *Агросвіт*. 2020. № 1. С. 88-95. DOI: 10.32702/2306-6792.2020.1.88
6. Дзядикув Ю.В., Любезна І.В. Складові процесу покращення землеустрою в Україні. *Інноваційна економіка*. 2020. №1-2 (82). С. 139-144. DOI: 10.37332/2309-1533.2020.1-2.20
7. Стойко Н., Ковалишин О., Куліковська О., Тригуба А. Землеустрій як важлива функціональна складова планування використання земель. *Вісник ЛНУП. Серія: Архітектура та будівництво*, 2022. Вип. 23. С. 110-118.
8. Герасимчук О.Л., Мельник-Шамрай В.В., Шевчук Л.М., Васільєва Л.А. Інноваційні підходи до розвитку землеустрою в контексті сталого розвитку територій. *Екологічні науки* № 4(55). 2024 С. 202-206. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.33>
9. Бурлака Н. І., Панько В. В. Екологічні наслідки деградації ґрунту та інноваційні шляхи її подолання. *Агросвіт*. 2020. № 7. С. 80-86. DOI: 10.32702/2306-6792.2020.7.80
10. Николок О., Пивовар П., Назаркіна Р., Стольнікович Г., Богонос М. Динаміка земельного фонду: як змінилися земельні ресурси України після 24 лютого 2022 року. *Центр досліджень продовольства та землекористування. Київська школа економіки*. 2024. 12 с.

LAND USE STRUCTURE IN CHERKASY REGION: FORMATION, CURRENT STATE, DYNAMICS

Sopova N.V.

Uman National University
Institutska str., 1, 20305, Uman,
State Biotechnological University
Alchevskikh str., 44, 61002, Kharkiv, Ukraine
lnau.sopova@gmail.com

The article deals with the formation, current state and dynamics of changes in the structure of land use in Cherkasy region. The influence of historical, geographical, natural, environmental and economic factors on the development of the land fund of the region is analyzed. The key stages of formation of the land use structure, which determined the specifics of land distribution between the main categories: agricultural, forest, industrial, environmental and other, are identified.

Particular attention is paid to the current state of land use, which is characterized by significant anthropogenic pressure, soil degradation, and disruption of the ecological balance. The article highlights in detail the issue of imbalance between agricultural and protected lands, which is an important challenge for ensuring sustainable development of the region.

The paper also examines the dynamics of changes in the structure of land use in Cherkasy region over the past decades. It is shown how global climate change, anthropogenic factors and urbanization affect the use of land resources. The necessity of integrating economic, environmental and social approaches to optimize land use and preserve the natural potential of the region is substantiated.

The results of the study allow identifying the main problems in the management of land resources in the region and offering recommendations for their rational use. The article presents practical proposals for optimizing the structure of land use, in particular, taking into account the need to restore ecological balance, increase the efficiency of the agricultural sector and ensure sustainable development of the region.

The study will be useful for scientists, experts in the field of earth sciences, land use, ecologists, farmers, as well as representatives of government and local authorities involved in land management. *Key words:* land use, Cherkasy region, agricultural land, arable land, land fund, land resources.

Структура землекористування в Черкаській області: формування, сучасний стан, динаміка. Сопова Н.В.

У статті розглянуто питання формування, сучасного стану та динаміки змін структури землекористування в Черкаській області. Проаналізовано вплив історико-географічних, природно-екологічних та економічних чинників на розвиток земельного фонду регіону. Визначено ключові етапи становлення структури землекористування, які зумовили специфіку розподілу земель між основними категоріями: сільськогосподарськими, лісовими, промислового призначення, природоохоронними та іншими.

Особливу увагу приділено сучасному стану землекористування, який характеризується значним антропогенним навантаженням, деградацією ґрунтів та порушенням екологічного балансу. У статті детально висвітлено питання дисбалансу між сільськогосподарськими та природоохоронними землями, що є важливим викликом для забезпечення сталого розвитку регіону.

У роботі також досліджено динаміку змін у структурі землекористування Черкаської області за останні десятиліття. Показано, як глобальні кліматичні зміни, техногенні фактори та урбанізація впливають на використання земельних ресурсів. Обґрунтовано необхідність інтеграції економічних, екологічних та соціальних підходів для оптимізації землекористування та збереження природного потенціалу регіону.

Результати дослідження дозволяють виявити основні проблеми в управлінні земельними ресурсами області та запропонувати рекомендації щодо їхнього раціонального використання. У статті представлено практичні пропозиції для оптимізації структури землекористування, зокрема з урахуванням необхідності відновлення екологічної рівноваги, підвищення ефективності аграрного сектору та забезпечення сталого розвитку регіону.

Дослідження буде корисним для науковців, експертів у галузі наук про Землю, землекористування, екологів, аграріїв, а також представників органів влади та місцевого самоврядування, які займаються питаннями управління земельними ресурсами. *Ключові слова:* землекористування, Черкаська область, сільськогосподарські землі, рілля, земельний фонд, земельні ресурси.

Relevance of the research. The relevance of studying the structure of land use in Cherkasy region is due to the importance of rational use of land resources, which are the basis for economic, environmental and social development of the region. Cherkasy region has a significant potential of the agricultural sector, while its territory is subject to significant anthropogenic impact, which affects soil quality, ecological balance and land use efficiency.

The formation of the land use structure in the region was conditioned by historical, geographical, economic and

natural factors, but the current state of land use needs to be rethought in light of the challenges of today. The issues of soil degradation, optimization of agricultural land use, protection of natural areas, and harmonization of environmental and economic interests are of particular importance.

The dynamics of changes in land use is an indicator of the region's adaptation to new conditions, in particular, to reforms in land relations, the introduction of market-based management mechanisms, and global climate change. Analyzing these processes will allow us

to identify trends in land use, assess the effectiveness of management decisions, and develop recommendations for sustainable development of the region.

Thus, the study of the structure of land use in Cherkasy region, its formation, current state and dynamics is important not only for regional policy, but also for ensuring sustainable development of land resources at the national level.

Analysis of research and publications. Research on the structure of land use in Ukraine, in particular in Cherkasy region, is widely covered in the works of domestic and foreign scholars. The main attention is paid to the analysis of historical aspects of land use formation, modern problems of rational use of land resources and assessment of the impact of anthropogenic and natural factors on their condition.

A significant contribution to the study of land use in Ukraine was made by such scholars as Shuvar I. A., Hnativ P. S., Lopotych N. Y., Kachmar N. V. [1], Kovalenko N. P. [2], Savchuk O. I., Melnychuk A. O., Drebot O. V., Dankevych E. M. [3], who analyzed land use issues in terms of optimizing agricultural production and environmental safety. Their works emphasize the importance of preserving soil fertility and ecological balance.

Sonko S. P., Kyselov Yu. O., Shchetyna M. A. [4], Denysyk H. I. [5] and other scholars in their studies highlight the spatial aspects of land use, focusing on the interconnection of natural conditions and land use features. Their works contain a thorough analysis of landscape and environmental factors that affect the structure and dynamics of land use in Ukraine, in particular in regions with a high level of agricultural development, which includes Cherkasy region.

Studies of the current state of land use in the Cherkasy region are covered in the works of Slavgorodska Y. V. [6], Bytko M. M., Kuznetsova O. V., Volontyr A. V. [7], who focus on the problems of imbalance between agricultural and environmental lands. Their works offer recommendations for improving the efficiency of land management.

Special attention is paid to the impact of land reform on the structure of land use. The studies of such scientists as A. M. Tretyak, V. M. Tretyak, T. M. Pryadka, N. A. Tretyak [8; 9] analyze the introduction of market mechanisms for land management and their impact on the economic performance of the regions, and also consider the issues of the strategy for the development of the land structure of Ukraine and its regions in the postwar period.

Important aspects of the dynamics of land use change in the context of climate change were also studied by Budziak O., Budziak V., Drebot O. [10] and Kucher A. [11], who focused on the adaptation of regional land use to global environmental challenges.

Despite the wide range of studies, there is a need for a comprehensive analysis of the dynamics of changes in the land use structure in Cherkasy region. The issues of

integrating economic, environmental and social aspects into the development of sustainable development strategies for the region remain insufficiently covered. This determines the need for new research aimed at developing innovative approaches to the rational use of land resources in Cherkasy region.

Presentation of the main material. Cherkasy region, located in the heart of Ukraine, is an important region with significant agricultural and natural potential (Fig. 1).

Its land resources are the basis for socio-economic development, contributing to the growth of agriculture, industry and environmental balance. The region's geographical location, rich soils and favorable climatic conditions have made it one of the leading agricultural production centers in the country. At the same time, constantly changing economic, environmental and social factors require a detailed analysis of the land use structure. Such a study allows not only to assess the level of efficiency of land use, but also to identify the dynamics of their changes, outline problems and find ways to optimize their use in the future.

The land use structure of Cherkasy region was shaped by a complex interaction of natural conditions and socio-economic processes. Rich natural resources, in particular highly fertile black soil, became a key factor in the development of agriculture in the pre-revolutionary period. Thanks to these conditions, in the nineteenth century the region turned into a center of agricultural production, where the main crops were cereals, in particular wheat and barley, as well as sugar beets, which became the basis for the development of the sugar industry.

In Soviet times, land use in the region underwent significant changes. Collectivization, which began in the 1930, contributed to the creation of large collective farms – collective and state farms. This made it possible to increase agricultural production, integrate new technologies, and centralize land management. However, this policy also had negative consequences. Overexploitation of land led to the loss of some of its fertility, in particular through intensive plowing and the use of chemical fertilizers. In addition, soil degradation has become one of the most serious environmental problems that remains relevant today. The current state of the land use structure has deep roots in the historical processes that shaped the region's territory.

The current structure of land use in Cherkasy region [12] is characterized by the following main categories (Fig. 2):

1) *Agricultural land.* Cherkasy region's agricultural land is the basis for the region's economic development and food security. They cover more than 70 % of the region's territory, which demonstrates their importance for the local economy and social well-being. The main components of the land are arable land, where key crops are grown, pastures for livestock and perennial plantations, including orchards and vineyards.



Fig. 1. Map of Cherkasy region

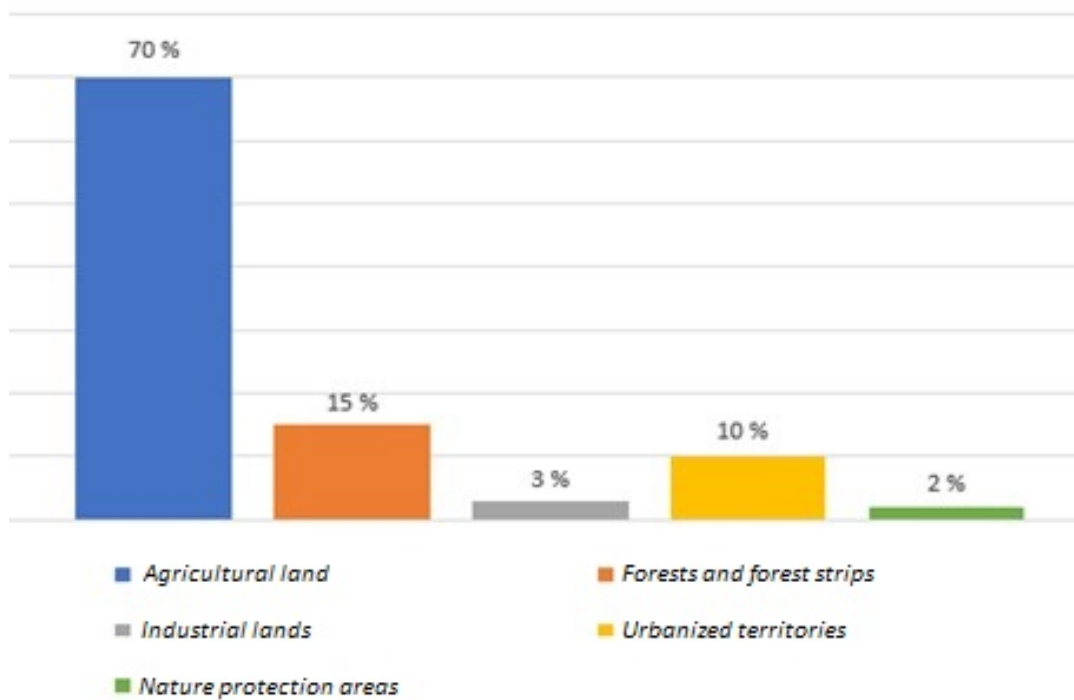


Fig. 2. Current structure of land use in Cherkasy region

Out of the total area of Cherkasy region (2,091.6 thousand hectares), agricultural land is 1,486.88 thousand hectares, including 1,450.82 thousand hectares of agricultural land (Fig. 3), of which [12]

- arable land – 1,271.86 thousand hectares;
- fallow land – 8.47 thousand hectares;
- perennial plantations – 27.34 thousand hectares;
- hayfields – 64.75 thousand hectares;
- pastures – 78.40 thousand hectares.

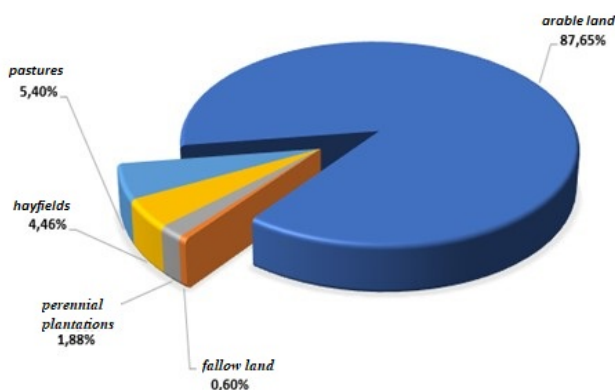


Fig. 3. Structure of agricultural land in Cherkasy region

The main crops of Cherkasy region are cereals (wheat, barley), which occupy a significant share of arable land, oilseeds (sunflower, rapeseed), which are a source of important export goods, and industrial crops, including sugar beet, which provides raw materials for the local food industry.

Due to its high soil fertility, especially black soil, and favorable climatic conditions, the region is one of Ukraine's leaders in agricultural production. The sector accounts for a significant share of the gross regional product, creating jobs and generating export earnings. The importance of Cherkasy region's farmland is emphasized by its role not only in the region's economy, but also in ensuring the stability of the national food system.

2) *Forests and forest belts.* Forests and forest belts occupy about 15 % of the territory of Cherkasy region and play an important ecological, economic and social role for the region [14]. Cherkasy forests, mostly represented by oak, pine and other mixed forests, provide habitat for numerous species of plants and animals, contributing to the conservation of the region's biodiversity.

Forest belts, which are located mainly along fields and water bodies, perform a number of vital functions. They protect fertile soils from wind and water erosion, reduce the negative impact of strong winds on agricultural land, thereby increasing yields and sustainability of agricultural production. In addition, forest belts help regulate the microclimate, retaining moisture in the soil and improving conditions for crop growth.

The ecological importance of Cherkasy region's forests is also manifested in their role as natural air filters, which helps to cleanse the atmosphere of harmful

substances and improve air quality in the region. They are an important resource for local communities, providing timber, recreational areas for recreation, and maintaining a stable water balance.

Thus, forests and forest belts in Cherkasy region are not only natural environmental protection, but also a key factor in the region's sustainable development, contributing to the conservation of natural resources, improving conditions for agriculture and enhancing the quality of life.

3) *Industrial land.* Industrial land in Cherkasy region occupies about 3 % of the total area of the region [14]. Despite their small territorial share, these lands play an important role in ensuring the economic development and industrial potential of the region. They are used to locate industrial enterprises of various profiles – from machine building and food industry to processing industries, as well as for quarries, construction of transport infrastructure and other facilities necessary for the functioning of the region.

Cherkasy region has a significant potential for industrial development due to a developed network of industrial centers, in particular in the cities of Cherkasy, Smila, Uman and others. Industrial land provides for job creation, development of innovative technologies, and attraction of investments. In addition, industrial infrastructure plays a key role in supporting the agricultural sector, ensuring the processing of agricultural products and the production of materials and equipment necessary for farmers.

Thus, although industrial land in Cherkasy region occupies a small share of the territory, it is strategically important for ensuring economic stability, growth and modernization of the region, contributing to the formation of a balanced economic structure.

4) *Urbanized areas.* The urbanized areas of Cherkasy region occupy approximately 10 % of the total area of the region and include cities, urban-type settlements, and adjacent residential areas [13]. These areas include residential neighborhoods, transportation network, utility systems, and social facilities such as schools, hospitals, cultural institutions, and parks.

The cities of Cherkasy region, in particular the regional center of Cherkasy, as well as such towns as Smila, Uman, and Zolotonosha, are important centers of economic, cultural, and administrative life. The development of urbanized areas in the region contributes to improving living standards, creating new jobs, developing education and healthcare, and attracting investment.

At the same time, active urbanization places demands on competent urban planning and land management. It is necessary to avoid overbuilding, which can lead to a decrease in the quality of life, a shortage of green areas, overloading of transport infrastructure, and problems with water supply and sewage. Modern approaches to the development of urbanized areas in Cherkasy region include a balance between residential development,

infrastructure development, and preservation of ecological balance.

Thus, the urbanized areas of Cherkasy region are an important factor in the socio-economic development of the region, which requires thoughtful planning and investment to ensure a sustainable and comfortable living environment.

5) *Nature protection zones.* The nature protection zones of Cherkasy region cover approximately 2 % of its territory and include various protected areas, such as nature reserves, national parks, regional landscape parks, and wildlife sanctuaries [14]. These zones were created to preserve unique natural complexes, the richness of flora and fauna, and to maintain the ecological balance of the region.

The Cherkasy region is home to important nature conservation sites that act as the «green lungs» of the region, preserve water resources, purify the air, and contribute to the preservation of natural landscapes. These include the Kaniv Nature Reserve, known for its biodiversity and rare species of plants and animals, as well as regional parks that are popular with tourists and locals for recreation and outdoor activities.

The protected areas of Cherkasy region are also of great educational and scientific importance: they serve as a base for research on ecosystems, natural processes, and the preservation of rare species. In addition, the protection of such areas helps maintain environmental stability, protect soil and water resources, and preserve cultural heritage.

Thus, Cherkasy region's protected areas are an integral part of the region's ecological system, ensuring the preservation of the natural environment, maintaining

biodiversity and creating conditions for sustainable development both environmentally and socially.

This distribution of land use reflects the natural conditions of the region, historical development and current socio-economic needs. Most of the land is used for agricultural production, but the growing pressure on the ecosystem requires attention to nature protection zones and sustainable management of other categories of land.

Over the past decades, the land use structure of Cherkasy region has undergone the following changes (Fig. 4):

- 1) Intensification of agriculture;
- 2) Environmental challenges;
- 3) Expansion of urbanized areas;
- 4) Increase in protected areas;
- 5) Climate change.

Conclusions. The structure of land use in Cherkasy region is formed under the influence of a complex interaction of natural conditions and anthropogenic factors that have long determined the nature of economic activity in the region. The current state of land use is characterized by the dominance of agricultural land, which covers a significant part of the region's territory, as well as its intensive use for growing grain, industrial crops and livestock.

However, this structure also poses a number of challenges. Environmental issues, such as soil degradation, declining biodiversity, and water pollution, threaten ecosystem stability. In addition, the impact of climate change, such as rising average annual temperatures, changing precipitation patterns, and increased frequency of extreme weather events, poses additional risks to land use.

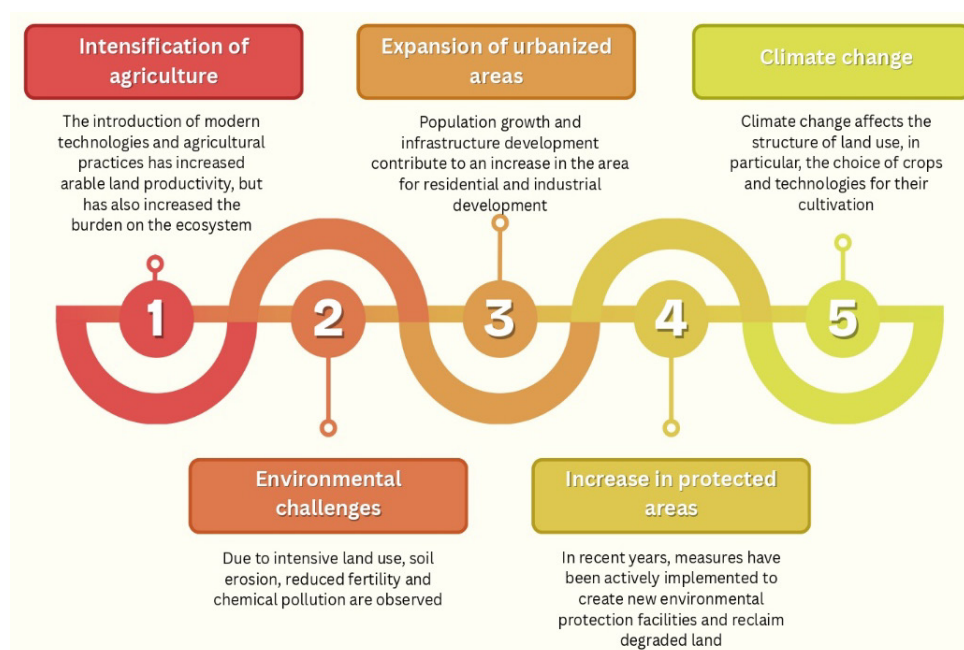


Fig. 4. Changes in the structure of land use in Cherkasy region in recent decades

To ensure the sustainable development of Cherkasy region, it is necessary to implement a set of measures aimed at the rational and environmentally balanced use of land resources. This includes:

- 1) Application of modern technologies: use of innovative approaches to soil cultivation, irrigation and fertilization to minimize negative environmental impact.
- 2) Greening agricultural production: expanding organic farming practices, introducing crop rotation and protecting soil fertility.
- 3) Preservation of the natural environment: creation and maintenance of protected areas, restoration of degraded lands and prevention of their further depletion.

4) Adaptation to climate change: development of risk management programs and implementation of adaptation strategies, such as growing drought-resistant crops and improving water supply.

5) Public and investor engagement: stimulating environmental initiatives through government programs, grants and investments in the region's sustainable development.

As a result of such actions, a harmonious balance between the economic needs of the population and the preservation of the natural environment can be achieved, which will contribute to the long-term environmental stability and social well-being of the region.

References

1. Шувар І. А., Гнатів П. С., Лопотич Н. Я., Качмар Н. В. Вплив сільськогосподарського землекористування на екосистеми басейну Дністра. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2022. т. 32. № 1. С. 68–72. DOI: <https://doi.org/10.36930/40320110>
2. Коваленко Н. П. Сільськогосподарське землекористування в Україні на початку XXI століття: аналіз тенденцій розвитку. *Вісник аграрної історії*. 2019. Вип. 27–28. С. 311–320. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vai_2019_27-28_42
3. Савчук О. І., Мельничук А. О., Дребот О. В., Данкевич Є. М. Оптимізація землекористування сільськогосподарських угідь Житомирської області. *Агропромислове виробництво Полісся*. 2014. Вип. 7. С. 7–10. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/avrol_2014_7_2
4. Сонько С. П., Кисельов Ю. О., Щетина М. А. Сільськогосподарське районування Черкаської області в контексті проблеми раціонального використання земельних ресурсів. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*. Тернопіль: СМП «Тайп». №1 (випуск 48). 2020. С. 139–148. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.20.1.16>
5. Denysyk H., Kanskyi V., Kanska V., Denysyk B., Mykhailo V. Anthropogenic landscapes of Ukraine and their reconstruction. *Czasopismo Geograficzne*. 2022. № 93(3). P. 417–433. DOI: <https://doi.org/10.12657/czageo-93-16>
6. Славгородська, Ю. В. Сучасний стан та динаміка змін земельних ресурсів центрального Лісостепу України. *Scientific Progress & Innovations*. 2018. № 2. С. 120–124. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2018.02.19>
7. Битько М. М., Кузнецова О. В., Волонтир А. В. Оптимізація ефективності використання земельних ресурсів на рівні Черкаської області. *Формування сталого землекористування: проблеми та перспективи* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції (19-20 листопада 2020 року). Київ, 2020. С. 12–15. URL: <https://dglb.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/cce66612-e7a7-41e4-9a2d-c0dc60028312/content>
8. Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М., Третяк, Н. А. Наукові засади стратегії розвитку земельного устрою України і її регіонів у повоєнний період. *Ефективна економіка*. 2023. № 3. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105.2023.3.9>
9. Третяк А. М., Третяк В. М., Прядка Т. М. Земельний устрій України: понятійні і інституційні аспекти розвитку. *Агросвіт*. 2020. № 24. С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2020.24.3>
10. Будзяк О., Будзяк В., Дребот О. Управління кліматоорієнтованим землекористуванням. *Agricultural and Resource Economics*. 2022. Vol. 8. № 3. С. 98–122. DOI: <https://doi.org/10.51599/are.2022.08.03.06>
11. Кучер А. Адаптація аграрного землекористування до змін клімату. *Agricultural and Resource Economics*. 2017. Vol. 3. № 1. С. 119–138. URL: <https://are-journal.com/are/article/view/95/97>
12. Фондові матеріали Головного управління Держгеокадастру у Черкаській області. URL: <https://cherkaska.land.gov.ua>
13. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>
14. Стратегія розвитку Черкаської області на період 2021–2027 роки. URL: <https://ck-oda.gov.ua/wp-content/uploads/2022/08/18082022.pdf>

СПОСІБ СТЕРИЛІЗАЦІЇ НЕЗРІЛИХ ЗЕРНІВОК ПШЕНИЦІ ТА ТРИТИКАЛЕ ДЛЯ ВВЕДЕННЯ *IN VITRO* З ПОДАЛЬШИМ ДОБОРОМ НА СТРЕСОСТІЙКІСТЬ

Пикало С.В., Юрченко Т.В., Харченко М.В., Волощук Г.Д., Пірич А.В.

Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України

08853, с. Центральне, Київська обл.

pykserg@ukr.net

Пшениця – одна з найцінніших зернових культур у світі. Останніми роками спостерігається зростання інтересу до тритикале, зумовлене його значним фізіолого-генетичним потенціалом продуктивності. Сучасним інноваційним напрямом, що дає змогу розширити спектр вихідного матеріалу й активізувати селекційний процес, спрямований на створення високопродуктивних стресостійких сортів, є біотехнологія. Біотехнологічні методи культури *in vitro* різних експлантів нині широко використовуються для вирішення прикладних завдань селекції пшениці та тритикале. В експлантах і, як наслідок, в індукованих з них калюсів та рослин-регенерантів може проявлятися інфекція, яка є як на поверхні (зовнішня), так і всередині (внутрішня) рослинного матеріалу. Для знезараження вихідного матеріалу існує низка методів із застосуванням різних реагентів та експозицій. Переважна їх більшість на сьогодні неоптимальні, внаслідок чого актуальним залишається завдання створення нових та удосконалення існуючих способів. У представленій роботі наведено порівняльну характеристику різних методів знезараження, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Розроблено ефективний спосіб стерилізації незрілих зернівок пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro*, який охороняється патентом на корисну модель. Запропонований метод відрізняється від існуючих аналогів концентрацією та співвідношенням стерилізуючих агентів, а також тривалістю обробки. Рослинний матеріал по чергово ретельно знезаражують стерилізаторами за наступною послідовністю: 70 % етанол – 3 хв; 30 % промисловий препарат «Білизна» – 5 хв; 0,01 Н розчин соляної кислоти – 3 хв; трикратне промивання стерильною дистильованою водою. Спосіб дозволяє отримати життєздатний стерильний рослинний матеріал для введення *in vitro*, а ефективність стерилізації становить 95–99 %. Застосування цього методу в селекції пшениці та тритикале сприятиме створенню нових конкурентоспроможних сортів з цінними практичними властивостями. Результати досліджень вносять певний вклад у вдосконалення біотехнологічних прийомів розширення генетико-селекційного потенціалу зернових культур. *Ключові слова:* пшениця, тритикале, спосіб, стерилізація, незрілі зернівки, культура *in vitro*.

Method for sterilization of immature wheat and triticale kernels for *in vitro* culture followed by selection for stress tolerance.
Pykalo S., Yurchenko T., Kharchenko M., Voloshchuk H., Piryach A.

Wheat is one of the most valuable cereal crops in the world. In recent years, there has been growing interest in triticale due to its considerable physiological and genetic potential for productivity. A modern and innovative approach that enables the expansion of the initial material base and enhances the breeding process aimed at developing high-yielding and stress-tolerant varieties is biotechnology. *In vitro* biotechnological methods using various explants are now widely applied to address practical challenges in wheat and triticale breeding. Explants and consequently the callus and regenerated plants induced from them may contain infections, both on the surface (external) and within the plant tissue (internal). There are numerous methods for disinfecting source material using different reagents and exposure times. However, most existing methods remain suboptimal, highlighting the relevance of developing new and improving existing techniques. This study presents a comparative analysis of various sterilization methods, each with its own advantages and drawbacks. An effective method for sterilizing immature wheat and triticale grains for *in vitro* culture has been developed and is protected by a utility model patent. The proposed method differs from existing analogs in the concentration and ratio of sterilizing agents used, as well as the duration of treatment. The plant material is sequentially and thoroughly sterilized using the following steps: 70% ethanol for 3 minutes; 30% industrial bleach ("Bilyzna") for 5 minutes; 0.01 N hydrochloric acid solution for 3 minutes; followed by triple rinsing with sterile distilled water. This method allows for the producing viable sterile plant material suitable for *in vitro* introduction, with a sterilization efficiency of 95–99%. The application of this method in wheat and triticale breeding will contribute to the development of new, competitive varieties with valuable practical traits. The research results contribute to the improvement of biotechnological approaches aimed at expanding the genetic and breeding potential of cereal crops. *Key words:* wheat, triticale, method, sterilization, immature kernels, *in vitro* culture.

Постановка проблеми. Пшениця є основною зерновою культурою у світі, від якої залежить основа продовольчої безпеки та формування експортного потенціалу держави [1]. Тритикале поєднує низку господарсько-біологічних особливостей – високий потенціал урожайності зерна та зеленої маси, під-

вищені адаптивні властивості, комплексний імунітет до грибних захворювань, високий вміст білка й лізину в зерні [2]. На сьогоднішній день зміна клімату впливає на низку екологічних стресових чинників, які визначають адаптивність і продуктивність зернових колосових культур [3; 4].

Біотехнологічні методи культури *in vitro* різних експлантів (органів або частин органів, ізольованих від донорної рослини) нині широко використовуються для вирішення прикладних завдань селекції цінних сільськогосподарських рослин [5; 6]. Проте в експлантах і, як наслідок, в індукованих з них калюсах та рослин-регенерантів може проявлятися різноманітна інфекція, яка є як на поверхні (зовнішня), так і всередині (внутрішня) рослинного матеріалу [7].

Актуальність дослідження. Впродовж останніх десятиліть біотехнологія зайняла вагоме місце поряд із морфолого-анатомічними та фізіолого-біохімічними методами оцінювання стресостійкості рослин [5; 6]. Використання сучасних біотехнологічних інструментів дозволяє значно зменшити строки селекційного добору та сортової ідентифікації, що активно впроваджується селекціонерами в усьому світі.

Значне місце в селекції зернових колосових культур відводиться використанню клітинних технологій, які створюють генетичне розмаїття на рівні соматичних клітин, з наступним скринінгом генотипів з господарсько цінними ознаками. Особливої актуальності набуває застосування культури тканин і органів *in vitro* – біологічної системи, де немає механізмів регуляції, що діють на рівні цілого організму [8]. На сьогодні метод культури *in vitro* є ефективним інструментом для розв'язання практичних завдань селекції широкого спектра сільськогосподарських культур [9]. Важливою властивістю соматичних рослинних тканин є здатність до регенерації повноцінних рослин завдяки тотипотентності клітин [10]. Культивування ізольованих тканин *in vitro* ґрунтується на використанні калюсних культур та є безпечною для довкілля, економічно доступною і ресурсоефективною технологією для оцінювання стійкості генотипів до стресових чинників довкілля [11].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлені матеріали є частиною таких науково-дослідних робіт: «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. Сучасним і принципово новим підходом у селекції пшениці та тритикале є впровадження біотехнологічних методів, що значною мірою оптимізують і пришвидшують традиційний процес створення нових сортів. За останні десятиліття біотехнологія здобула широке поширення як один із найперспективніших інструментів у сільськогосподарських дослідженнях [5; 6]. Поєднання біотехнологічних методів селекції із класичними забезпечує розвиток нових стратегій генетичного удосконалення рослин і підвищення їх продуктивності, що зумовлює

активне використання таких підходів селекціонерами в усьому світі [9]. Застосування біотехнологій дозволяє скоротити тривалість селекційного циклу, необхідного для створення сортів з покращеними господарсько цінними ознаками, а також сприяє розширенню спектра генетичної варіабельності, необхідної для отримання нових форм із заданими властивостями [6; 12].

Попри те, що культура *in vitro* злакових рослин уже тривалий час є об'єктом наукових досліджень, представники триби *Gramineae* досі залишаються одними з найскладніших у плані застосування біотехнологічних методів. Однією з основних проблем, що стримують ефективне використання клітинних технологій у селекції злакових, є низька регенераційна здатність тканин, отриманих у результаті культивування. Ключовим чинником, що визначає успішність біотехнологічних процедур для цієї групи культур, є правильний вибір типу експланта [13]. Для індукції калюсу з соматичних клітин використовують такі вихідні матеріали, як незрілі й зрілі зародки, молоді суцвіття, сегменти колеоптиля, мезокотилі, молодих листків і апікальні меристеми пагонів [14; 15]. Незрілі зародки традиційно вважаються одним із найбільш ефективних типів експлантів у злакових культур [16]. Це зумовлено їх високою проліферативною активністю та морфогенетичною компетентністю всіх тканин при культивуванні *in vitro* [10], що дає змогу мінімізувати вплив зниження проліферативної здатності, характерного для спеціалізованих тканин, на результати досліджень. Відомо також, що ефективність регенерації з різних типів експлантів залежить від того, на якій стадії розвитку (оптимальній або неоптимальній) вони були відібрані для отримання первинних калюсів [14; 16].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Так як поживні середовища, що використовуються для введення рослинного матеріалу в культуру *in vitro*, одночасно сприяють розвитку різноманітних мікроорганізмів, подальша життєздатність експлантів безпосередньо залежить від ефективності початкової стерилізації вихідного матеріалу [16]. Дослідження показали, що інфекційні агенти, локалізовані як на поверхні, так і у внутрішніх тканинах експлантів, можуть проявлятися як на ранніх етапах культивування, так і на пізніших стадіях розвитку рослин-регенерантів [7]. Це супроводжується помітним зниженням частоти поділу соматичних або ембріональних клітин, а також іншими негативними змінами ростових показників. В окремих випадках певні мікроорганізми здатні зберігати латентний стан упродовж кількох пасажів культури, активуючись і починаючи розмноження лише згодом. Тому після відбору донорного матеріалу в польових умовах слід обов'язково проводити його ретельну дезінфекційну обробку. Для більшості культур відомою є узагальнена схема стерилізації насіння, яка перед-

бачас послідовне застосування ряду дезінфікуючих агентів (етанолу, хлоровмісних, срібловмісних або ртутних препаратів), триразове промивання стерильною дистильованою водою та подальше висаджування виділених експлантів на живильне середовище для культивування *in vitro* [17]. Хоча дана методика є базовою для різних культур, вона потребує індивідуального підбору типу стерилізуючих речовин і тривалості їх дії.

Мета роботи – розробити ефективний спосіб поверхневої стерилізації незрілих зернівок пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro* з подальшим добром на стійкість до несприятливих чинників довкілля.

Новизна. Розроблено спосіб стерилізації незрілих зернівок пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro*, що включає послідовне знезараження рослинного матеріалу дезінфікуючими агентами. Новим є те, що насіння по чергово обробляють за схемою: 70 % етанол – 3 хв; 30 % промисловий препарат «Білізна» – 5 хв; 0,01 Н розчин соляної кислоти – 3 хв; стерильна дистильована вода (трикратна обробка). Запропонований спосіб охороняється патентом на корисну модель (№152327 від 11.01.2023, бюл. № 2) [18]. Розроблений метод дозволяє отримати життєздатний стерильний рослинний матеріал для подальшого введення в культуру *in vitro*, а ефективність стерилізації становить 95–99 %.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований спосіб стерилізації вихідного рослинного матеріалу пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro* доповнить методологію та сприятиме створенню нових сортів із цінними практичними властивостями. Спосіб може бути використаний у селекційних центрах, науково-дослідних установах та на дослідних станціях.

Виклад основного матеріалу. Для стерилізації рослинних експлантів зазвичай застосовують розчини, що містять активний хлор (наприклад, хлорамін, гіпохлорит натрію чи кальцію, сулема), бром (бромна вода), а також пероксид водню, етанол, нітрат срібла, діацид або антибіотики. У разі роботи з незрілими зернівками рослин, вирощених у відкритому ґрунті, також використовуються адаптовані методи стерилізації, придатні для введення в культуру *in vitro* представників різних сортів злакових культур [16; 19]. А.В. Бавол та співавтори розробили і апробували метод [16], згідно з яким спочатку здійснюють поверхневу стерилізацію колосся шляхом обробки 70 % розчином етилового спирту, після чого проводили стерилізацію незрілих зернівок. Для цього послідовно застосовували: 1 % розчин перманганату калію – 2 хвилини; 70 % етанол – 2 хвилини; 30 % розчин промислового препарату «Білізна» – 10 хвилин; триразова обробка стерильною дистильованою водою.

Найбільш близьким по технічній суті є спосіб стерилізації [20], відповідно до якого незрілі зернівки пшениці, зібрані на 12–16-ту добу після запи-

лення, стерилізують у наступній послідовності: 1) 70 % етанол – 30 с; 2) гіпохлорит натрію – 12 хв; 3) триразове промивання стерильною дистильованою водою. Проте недоліком цього способу є те, що за його використання ефективність стерилізації не перевищує 85 %, в той час як для масового введення в культуру *in vitro* необхідні способи, які б забезпечували стерилізацію рослинного матеріалу в межах 95–100 %. Окрім того, при нашій спробі застосувати цю схему стерилізації відмічено негативний вплив тривалої дії (12 хв) гіпохлориту натрію на зернівки, що проявлялось у порівняно низькому відсотку виходу життєздатних експлантів. Тому перед нами постала необхідність створити спосіб, який дозволить зручно, швидко і максимально ефективно стерилізувати незрілі зернівки пшениці та тритикале з метою подальшого виділення з них зародків та введення їх в культуру *in vitro*.

Поставлене завдання вирішується тим, що в способі стерилізації незрілих зернівок пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro* рослинний матеріал по чергово обробляють стерилізуючими агентами за наступною послідовністю: 1) 70 % етанол – 3 хв; 2) розчин гіпохлориту натрію, збагачений активним хлором (промисловий препарат «Білізна»), у концентрації 30 % – 5 хв; 3) 0,01 Н розчин соляної кислоти (HCl) – 3 хв; 4) трикратне промивання стерильною дистильованою водою. Введення додаткового проміжного етапу промивання незрілих зернівок розчином HCl дозволяє зменшити токсичний вплив на них хлорвмісного препарату. Цей спосіб дозволяє отримати життєздатний стерильний рослинний матеріал пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro*, а ефективність стерилізації за такого підходу становить 95–99 %. Це значно полегшує роботу та зменшує втрати рослинного матеріалу, як на початкових, так і на наступних етапах культивування.

Запропонований спосіб включає нижче перераховані процеси. На 14–16-ту добу після запилення рослин у польових умовах зрізають їх колоси. Далі відокремлюють зернівки центральної частини колосу та поміщають їх у чашки Петрі по 50 шт. для стерилізації. Стерилізацію реагентами проводять в умовах ламінар-боксу, у стерильних хімічних склянках у декілька етапів: 1) 70 % етанол – 3 хв; 2) 30 % промисловий препарат «Білізна» – 5 хв; 3) 0,01 Н розчин HCl – 3 хв; 4) трикратне промивання стерильною дистильованою водою. В подальшому із зернівок виділяють зародки і висаджують їх у чашки Петрі із живильним середовищем Мурасіге-Скуга [21] для індукції калюсу щитком вгору. При дотриманні вищезазначеної методики вдасться досягти максимальної стерильності незрілих зернівок пшениці та тритикале для подальшого введення в культуру *in vitro*.

Головні висновки. Таким чином, у результаті проведених досліджень розроблено спосіб стерилізації

лізації незрілих зернівок пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro*, який охороняється патентом на корисну модель. Наведено порівняльну характеристику різних методів знезараження рослинного матеріалу, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Запропонований метод відрізняється від існуючих аналогів концентрацією та співвідношенням стерилізуючих агентів, а також тривалістю обробки. Спосіб дозволяє отримати життєздатний стерильний рослинний матеріал для подальшого

введення його в культуру *in vitro*, а ефективність стерилізації становить 95–99 %.

Перспективи використання результатів дослідження. Використання даного методу в селекції пшениці та тритикале сприятиме створенню нових сортів, які мають цінні практичні властивості. Результати досліджень вносять певний вклад у вдосконалення біотехнологічних прийомів розширення генетико-селекційного потенціалу зернових колосових культур.

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. Oettler G. The fortune of a botanical curiosity – Triticale: past, present and future. *Journal of Agricultural Science*. 2005. Vol. 143. Iss. 5. P. 329–346.
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.
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.
5. 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.
6. Дубровна О.В., Моргун Б.В., Бавол А.В. Біотехнології пшениці: клітинна селекція та генетична інженерія. Київ: Логос, 2014. 375 с.
7. Поліщук В.В., Турчина С.Я., Осіпов М.Ю. Підбір стерилізатора для введення *in vitro* донорного матеріалу досліджуваних сортів *Callistephus chinensis* (L.) Ness. з метою подальшого використання в озелененні. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29. № 5. С. 22–26.
8. Lestari E.G. *In vitro* selection and somaclonal variation for biotic and abiotic stress tolerance. *Biodiversitas*. 2006. Vol. 7. Iss. 3. P. 297–301.
9. Дубровна О.В., Чугункова Т.В., Бавол А.В., Лялько І.І. Біотехнологічні та цитогенетичні основи створення рослин, стійких до стресів. Київ: Логос, 2012. 428 с.
10. 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.
11. Sigurbjörnsson E. Application of *in vitro* mutation techniques for crop improvement. *Euphytica*. 1995. Vol. 85. Iss. 1-3. P. 303–315.
12. Dubrovna O.V., Baval A.V. Variability of the wheat genome during *in vitro* culture. *Cytology & Genetics*. 2011. Vol. 45. N 5. P. 333–340.
13. Гончарук О.М., Бавол А.В., Дубровна О.В. Морфогенний потенціал високопродуктивних сортів озимої пшениці в культурі апікальних меристем пагонів. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2011. Т. 11. С. 237–241.
14. Бавол А.В., Дубровна О.В., Лялько І.І. Регенерація рослин із експлантів верхівки пагона проростків пшениці. *Вісник Українського товариства генетиків і селекціонерів*. 2007. Т. 5. № 1/2. С. 3–10.
15. Гончарук О.М., Бавол А.В., Дубровна О.В. Морфогенез у культурі апікальних меристем пагонів високопродуктивних сортів озимої пшениці. *Фізіологія рослин і генетика*. 2014. Т. 46. № 3. С. 245–251.
16. Бавол А.В., Дубровна О.В., Лялько І.І. Регенерація рослин із різних типів експлантів м'якої пшениці. *Фізіологія і біохімія культурних рослин*. 2008. Т. 40. № 2. С. 150–156.
17. Кушнір Г.П., Сарнацька В.В. Мікроклональне розмноження рослин. Теорія і практика. Київ: Наукова думка, 2005. 270 с.
18. Спосіб стерилізації незрілого насіння пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro*: пат. 152327 Україна: МПІК А01Н 1/00. № 202202662, заявл. 25.07.2022; опубл. 11.01.2023 р., Бюл. № 2. 5 с.
19. Fahmy A.H., El-Shafy Y.H., El-Shihy O.M., Madkour M. A highly efficient regeneration system via somatic embryogenesis from immature embryos of Egyptian wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.) using different growth regulators. *Arab Journal of Biotechnology*. 2004. Vol. 7. No. 2. P. 229–238.
20. Кваско А.Ю., Ісаснков С.В., Дмитрук К.В., Ємець А.І. Створення рослин пшениці з дріжджовими генами біосинтезу треталози *TPS1* і *TPS2*. *Доповіді Національної академії наук України*. 2020. № 6. С. 92–100.
21. Murashige T., Skoog F. A revised medium for rapid growth and bioassay with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*. 1962. Vol. 15. Iss. 3. P. 473–497.

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 351.77: 504.062:351.777(477)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.13>

ПЛАН ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ ЯК ІНСТРУМЕНТ ЕКОЛОГІЧНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПІСЛЯВОЄННОЇ РЕКОНСТРУКЦІЇ

Хрутьба В.О.^{1,2}, Кобзиста О.П.¹, Лисак Р.С.¹,
Хрутьба Ю.С.² Борятинський М.Ю.¹, Бельмега І.В.²

¹Національний транспортний університет
вул. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, м. Київ

²Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

v.khrutba@ntu.edu.ua, kobzista@ukr.net, lysakroksolana@gmail.com,
Hill33.kiev@gmail.com, hrutbaj@gmail.com, belmegaivan@gmail.com

Екологічна складова є важливою частиною відновлення та реконструкції України, оскільки довготривалу безпеку, економічну стабільність і добробут населення можна забезпечити тільки через запровадження сталого підходу до відновлення. Визначено місце України в Європейському зеленому курсі. Проаналізовано вплив військових дій на довкілля. Розглянуто і систематизовано можливості та завдання екологічної трансформації післявоєнного відновлення України через реалізацію міжнародних екологічних проєктів Плану відновлення України. Визначено основні інструменти та механізми екологічної трансформації через реалізацію Плану відновлення, який є не лише документом, а системним механізмом управління трансформацією України, адаптованим до викликів війни, кліматичних змін і потреб у модернізації держави.

Розглянуто та визначено особливості розробки та впровадження екологічних проєктів, які входять в різні програми Плану відновлення України та спрямовані на вирішення проблем захисту, збереження та відновлення довкілля. Визначено конкретні механізми реконструкції та відбудови України із залученням міжнародного фінансування через реалізацію міжнародних екологічних проєктів Плану відновлення України, які спрямовані на відновлення природного середовища, розвиток зеленої енергетики, очищення водних ресурсів, поводження з відходами та зменшення викидів парникових газів. Представлено приклади екологічних та соціальних проєктів різних національних програм Плану відновлення України. Матеріал підготовано за результатами проєкту «Transformational Learning Network for Resilience - Enabling Ukrainian higher education to ensure a sustainable and robust reconstruction of (post-war) Ukraine» програми Erasmus+ Project number: 2023-1-DE01-KA220-HED-000157119

Ключові слова: План відновлення України, екологічна трансформація, екологічні проєкти, післявоєнне відновлення та реконструкція довкілля.

Ukraine Recovery Plan as a tool of ecological transformation of post-war reconstruction. Khrutba V., Kobzista O., Lysak R., Khrutba Yu., Boryatynskyi M., Belmega I.

The environmental component is an important part of Ukraine's recovery and reconstruction, as long-term security, economic stability and well-being of the population can only be ensured through a sustainable approach to recovery. Ukraine's place in the European Green Deal is determined. The impact of military operations on the environment is analysed. The possibilities and tasks of environmental transformation of Ukraine's post-war recovery through the implementation of international environmental projects of the National Recovery Plan of Ukraine are considered and systematised. The main instruments and mechanisms of environmental transformation through the implementation of the National Reconstruction Plan, which is a systemic mechanism for managing Ukraine's transformation, adapted to the challenges of war, climate change, and the needs for modernisation of the state, are identified.

The article considers and identifies the peculiarities of the development and implementation of environmental projects included in various programmes of the National Reconstruction Plan of Ukraine and aimed at solving the problems of environmental protection, preservation and restoration. Specific mechanisms for the reconstruction and restoration of Ukraine with the involvement of international funding through the implementation of international environmental projects of the National Reconstruction and Recovery Plan of Ukraine aimed at restoring the natural environment, developing green energy, cleaning water resources, waste management and reducing greenhouse gas emissions are identified. Examples of environmental and social projects of various national programmes of the National Recovery Plan of Ukraine are presented. The material was prepared based on the results of the project 'Transformational Learning Network for Resilience - Enabling Ukrainian higher education to ensure a sustainable and robust reconstruction of (post-war) Ukraine' of the Erasmus+ programme Project no: 2023-1-DE01-KA220-HED-000157119. **Key words:** Ukraine Recovery Plan, environmental transformation, environmental projects, post-war recovery and reconstruction of the environment.

Постановка проблеми. Питання відновлення зруйнованої інфраструктури, екосистем та економіки набуває важливого значення в сучасних умо-

вах широкомасштабної агресії росії проти України. Водночас, екологічна складова є важливою частиною відновлення та реконструкції України, оскільки

довготривалу безпеку, економічну стабільність і добробут населення можна забезпечити тільки через запровадження сталого підходу до відновлення. Екологічна трансформація вимагає державного системного підходу із залученням міжнародних інвестицій.

Актуальність дослідження. Україна активно просуває концепцію «зеленої» реконструкції, орієнтуючись на Європейський зелений курс. Зокрема, затверджено інвестиційний план на \$20 млрд для розвитку відновлюваної енергетики до 2030 року [1], «Програма зеленого відновлення промисловості. Україна 2024-2028 р.» [2]. Проте екологічні організації, такі як Esoaction, вказують на фрагментарність та відсутність цілісного бачення в енергетичній політиці, зокрема щодо балансу між ядерною, відновлюваною та викопною енергією [3]. Особливості реалізації згаданих заходів пов'язані з необхідністю адаптації до національного законодавства, координації між урядовими та міжнародними інституціями, а також забезпечення прозорості та ефективного управління ресурсами.

Водночас існує потреба в розробці чітких критеріїв для оцінки екологічної доцільності проєктів у рамках міжнародної допомоги. Необхідність активнішого залучення громадянського суспільства до процесу планування та моніторингу екологічних ініціатив. Забезпечення відповідності екологічних проєктів вимогам Європейського зеленого курсу та іншим міжнародним зобов'язанням.

Таким чином, дослідження особливостей розробки та впровадження міжнародних екологічних проєктів для реалізації Плану відновлення України є вкрай актуальним, адже воно дозволяє виявити потенційні ризики й можливості, сприяє підвищенню ефективності співпраці з міжнародними партнерами та формуванню екологічно збалансованої політики післявоєнного відновлення держави.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Практичне значення одержаних результатів полягає у визначенні конкретних механізмів реконструкції та відбудови України із залученням міжнародного фінансування через реалізацію міжнародних екологічних проєктів Плану відновлення України, які спрямовані на реабілітацію природного середовища, розвиток зеленої енергетики, очищення водних ресурсів, поводження з відходами та зменшення викидів парникових газів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концептуально-практичний план реконструктивного відновлення економіки України представлено в [4]. Автори представляють різноманітні заходи суб'єктів господарювання та державних органів управління як цілеспрямований процес національно стійкого технологічного та соціального-економічного розвитку, що дасть змогу сформувати національний господарський комплекс – основу входження в європейський

та світовий простір як повноправного суб'єкта.

У січні–лютому 2024 року Фонд ім. Гайнріха Бюлля провів дослідження щодо участі громадськості у прийнятті рішень, пов'язаних із відновленням України в частині збереження довкілля та протидії зміні клімату. Дослідження виявило бар'єри для екологічного громадянського суспільства та оцінило рівень «зеленості» процесів відновлення [5].

Дослідження, яке аналізує значні, але часто недооцінені екологічні наслідки російського вторгнення в Україну, зокрема негативний вплив на ґрунти, повітря, воду та біорізноманіття представлено в [6]. Автори розглядають методи та рішення, орієнтовані на сталий розвиток, спрямовані на пом'якшення цих впливів на довкілля.

В дослідженні [7] запропоновані шляхи зниження втрат та нейтралізації негативного впливу наслідків війни росії проти України, вироблення засобів протидії індивідуальній і колективній травмі та ефективній стратегії поведінки дозволять сформувати пріоритетні напрямки фінансово-економічного та суспільного відновлення України у стратегічній перспективі та на етапі її післявоєнного відновлення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Мета дослідження – проаналізувати, розглянути та визначити особливості розробки та впровадження екологічних проєктів, які входять в різні програми Плану відновлення України та спрямовані на вирішення проблем захисту, збереження та відновлення довкілля.

Новизна. Аналіз міжнародних вимог, процедур, підходів та особливостей впровадження Плану відновлення України, визначення місця екологічних проєктів в національних програмах та їх реалізація для екологічної трансформації повоєнного відновлення.

Виклад основного матеріалу. Європейська зелена угода є стратегією Європейського Союзу, представлена Єврокомісією у грудні 2019 року [8]. Вона має на меті трансформувати економіку ЄС у кліматично нейтральну, екологічно стійку та соціально справедливу до 2050 року. Мета Європейської зеленої угоди полягає в тому, щоб перетворити ЄС на регіон з низьким рівнем викидів до 2030 року та досягти кліматичної нейтральності до 2050 року (11 грудня 2019 року).

Основні її завдання представлені на рис.1.

Європейська Комісія ухвалила нову комплексну Стратегію біорізноманіття та Стратегію «Від ферми до виделки» для справедливого, здорового та екологічно чистого харчування. Відповідно до Європейської зеленої угоди, вони пропонують амбітні дії та зобов'язання ЄС щодо зупинення втрати біорізноманіття в усьому світі та збалансування нашої продовольчої системи з навколишнім середовищем шляхом зменшення використання шкідливих речовин, посилення захисту суші та моря, а також відновлення деградованих екосистем.

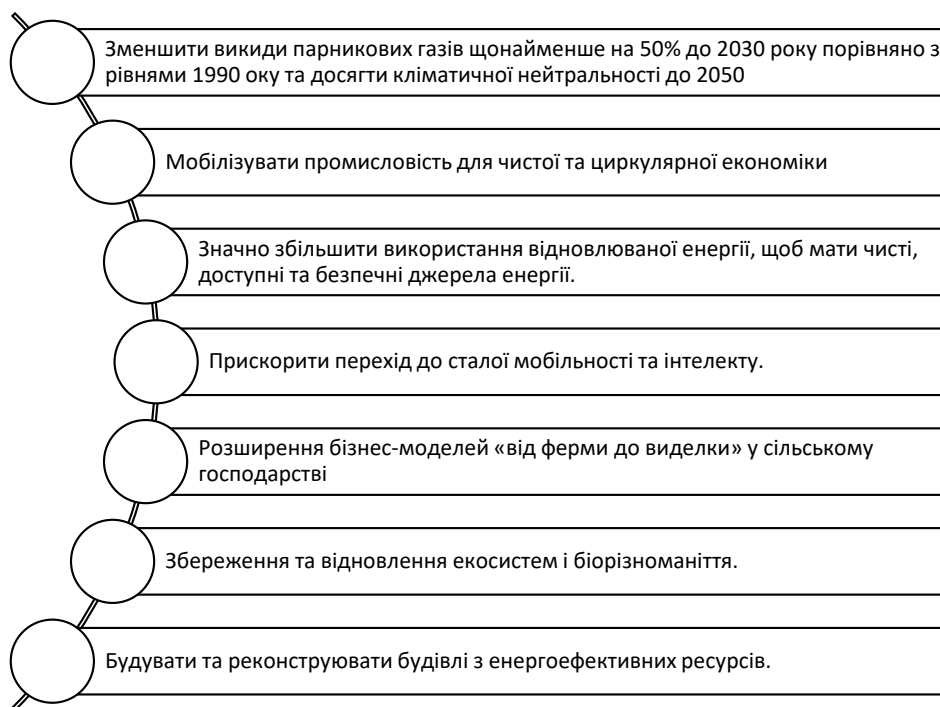


Рис. 1. Основні завдання Європейської зеленої угоди

Таблиця 1

Приклади впливу війни в Україні на довкілля

№	Сфера впливу	Конкретний приклад	Наслідки
1	Знищення екосистем	Ліси в Луганській області, заповідники «Асканія-Нова», «Святі гори»	Втрата біорізноманіття, пожежі, загибель флори та фауни
2	Хімічне забруднення	Обстріл заводу «Заря» в Рубіжному, руйнування складів пестицидів на Миколаївщині	Отруєння ґрунтів, вод, повітря, ризики для здоров'я населення
3	Забруднення повітря	Ураження нафтобаз у Кременчуці, Харкові, Чугуєві	Викиди токсичних речовин, канцерогенів, CO ₂ , сажі
4	Забруднення водних ресурсів	Підлив Каховської ГЕС, обстріли водозаборів у Миколаєві та Очакові	Затоплення територій, забруднення Дніпра, знищення рибного та пташиного середовища
5	Забруднення ґрунтів	Мінування полів у Харківській, Запорізькій, Херсонській областях	Неможливість ведення сільського господарства, отруєння ґрунтів
6	Мінна небезпека	30% території України потребує розмінування (дані ООН)	Загроза для людей, тварин, перешкоди для природного відновлення

Європейська зелена угода є орієнтиром і для країн-партнерів ЄС, зокрема України. Відповідність її принципам – умова для поглиблення євроінтеграції, залучення фінансової підтримки та участі у спільному ринку. У контексті повоєнної реконструкції Україна взяла курс на «зелене» відновлення, що базується на європейських стандартах сталого розвитку [9].

З початком повномасштабного вторгнення, за даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, вже зафіксовано понад 8000 екологічних злочинів [10].

Вплив війни на довкілля є однією з найгостріших, проблем сучасних збройних конфліктів, зокрема в Україні. Загальні збитки довкіл्लю України оці-

нюються у десятки мільярдів доларів США. Серед них, знищення природних екосистем, забруднення ґрунтів і води, викиди шкідливих речовин в атмосферу, пошкодження інфраструктури та об'єктів екологічної значущості, зміни ландшафтів і геоморфології, довготривалі наслідки. Навіть після закінчення бойових дій екологічні проблеми можуть залишатися десятиліттями, ускладнюючи відновлення природи і життя людей.

ООН визнала війну в Україні як одну з наймасштабніших екологічних катастроф у Європі за останні десятиліття. Конкретні приклади впливу війни в Україні на довкілля приведено в табл. 1.

Війна має системний та довготривалий вплив на природне середовище, що потребує не лише віднов-

лення інфраструктури, але й екологічної реабілітації, очищення територій, моніторингу, та інтеграції природоохоронних заходів у повоєнну реконструкцію.

Створена 21 квітня 2022 року Національна рада з питань відновлення України від наслідків війни є структурою при Президентові України. Її основна мета – розробка та реалізація стратегії післявоєнного відновлення країни, враховуючи руйнування, спричинені російською агресією [11].

Основним завданням Національної Ради є розробка плану дій щодо післявоєнного відновлення та розвитку України, який базується на принципах, приведених на рис. 2.

На конференції 4.07.22 р. в Лугано (Швейцарія) було представлено План відновлення України, що є стратегічним документом, який визначає пріоритети, напрями та інструменти післявоєнного відновлення країни. Як механізм, цей план виконує функцію інтеграції державної політики, міжнародної допомоги, реформ, інвестицій та ресурсного забезпечення задля відбудови економіки, інфраструктури, довкілля, соціальної сфери та інституційного потенціалу [12].

Бачення відновлення України: «Сильна європейська Україна – магніт для міжнародних інвестицій». Відновлення України спрямоване на прискорення сталого економічного зростання. У ролі механізму, План виступає:

- інструментом стратегічного планування – формує довгострокові цілі та середньострокові етапи відновлення;
- координаційною платформою – забезпечує взаємодію між державними органами, міжнародними партнерами, бізнесом та громадянським суспільством;
- механізмом мобілізації ресурсів – дозволяє ефективно залучати і розподіляти фінансову, технічну та гуманітарну допомогу;

- запобіжником неефективності – завдяки прозорим критеріям, контролю та моніторингу сприяє мінімізації корупційних ризиків;

- інструментом екологічної трансформації – спрямований на відбудову з урахуванням принципів сталого розвитку, енергоефективності й збереження довкілля.

Таким чином, План відновлення України є не лише документом, а системним механізмом управління трансформацією України, адаптованим до викликів війни, кліматичних змін і потреб у модернізації держави.

План відновлення України включає 850 проєктів з реконструкції країни з бюджетом понад 750 мільярдів доларів та визначає перелік національних програм для досягнення ключових результатів. Основні національні програми та приклади проєктів цих програм приведено в табл. 2.

Проєкти національних програм можуть реалізовуватися через різні міжнародні програми, які є інструментами фінансування ЄС. Наприклад, конкурси програми LIFE на 2025 рік були оголошені 24 квітня [13].

Програма LIFE є інструмент фінансування ЄС у сфері довкілля та боротьби зі зміною клімату. Створена в 1992 році, вона співфінансувала тисячі проєктів. Програма The LIFE programme 2021-2027 LIFE на 2021-2027 роки управляється Європейським виконавчим агентством з питань клімату, інфраструктури та довкілля (CINEA) та має бюджет у розмірі 5,4 мільярда євро:

- Природа та біорізноманіття
- Циркулярна економіка та якість життя
- Пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптація до них
- Перехід на чисту енергію

Розробка та впровадження проєктів цієї програми повністю відповідає цілям та завданням Плану від-

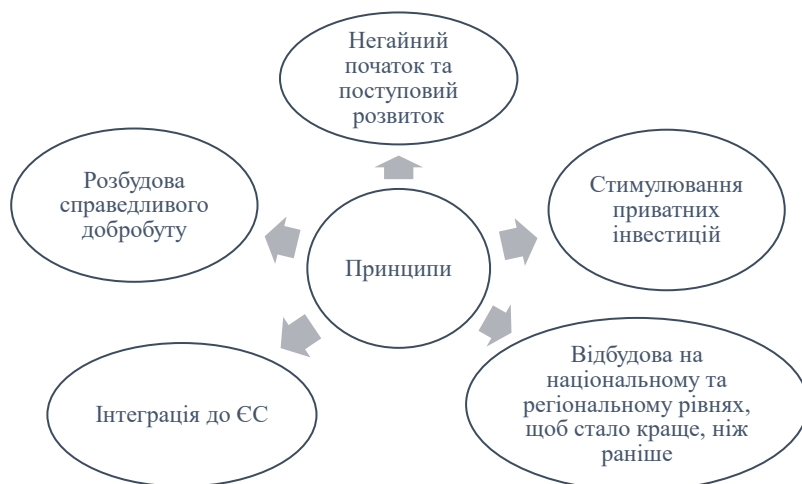


Рис. 2. Основні принципи роботи Національної Ради

Таблиця 2

Основні національні програми та приклади проєктів цих програм Плану відновлення України

№№	Національна програма	Приклади проєктів	Бюджет
1	Передумови відновлення: Зміцнення інституційного потенціалу	Проект інформатизації та цифровізації для підтримки розробки політики Підвищення ефективності управління державними стратегічними активами	<0,1 млрд дол
2	Передумови відновлення: Цифровий уряд	Електронні послуги для ветеранів Комплексна система моніторингу післявоєнного відновлення на основі відкритих даних Електронна реконструкція* (головний пріоритет)	<0,1 млрд дол
3	Зміцнення оборони та безпеки	Програма акселерації/інкубації оборони (Dii Tech & Defence) Державна цільова науково-технічна програма розвитку авіаційної промисловості на 2021-2030 роки	50 млрд дол
4	Прагнєть до інтеграції в ЄС	Відкриття ринків G7 та ЄС Підтримка громадянського суспільства, залученого до процесу моніторингу та підтримки процесу європейської інтеграції України	<0,1 млрд дол
5	Відновлення чистого та безпечного довкілля	Заходи пожежної безпеки, вжиті в зоні відчуження Відновлення дикої природи в Україні Створення мережі екодуків в Україні	20 млрд дол
6	Енергетична незалежність та Зелена угода	Збільшення видобутку газу з існуючих родовищ Відбудова пошкоджених енергетичних об'єктів, включаючи Кременчуцьку, Чернігівську, Охтирську ТЕЦ	130 млрд дол
7	Покращення бізнес-середовища	Економічне стимулювання громадян України, які виїхали за кордон для повернення та пошуку роботи в Україні Освітні та вебінари-проєкти для бізнесу	5 млрд дол
8	Забезпечити конкурентний доступ до фінансування	Запровадити воєнне страхування для інвестиційних проєктів у пріоритетних секторах Впровадження нових та розвиток існуючих фінансових інструментів	75 млрд дол
9	Забезпечити макрофінансову стабільність	Забезпечити джерела фінансування державного бюджету до відновлення доступу України до ринку Створення Бюджетного управління у Верховній Раді України	60 – 80 млрд дол
10	Усунення логістичних вузьких місць та інтеграція з ЄС	Електрифікація залізничних колій Програма розвитку туристичної інфраструктури для національних природних парків України. Система зарядних станцій для зеленої енергії	120 – 160 млрд дол
11	Зростання секторів економіки, що створюють додану вартість	IT: Розвиток екосистеми стартапів (інноваційні хаби, акселератори, інкубатори, платформи) Підвищення інноваційної активності підприємств (машинобудування)	50 млрд дол
12	Відновлення та модернізація житлового фонду та інфраструктури регіонів	Будівництво нової житлової інфраструктури відповідно до найкращих практик містобудування Розвиток макрорегіону Українських Карпат	150 – 250 млрд дол
13	Відновлення та модернізація соціальної інфраструктури	Розвиток мережі індустріальних парків Створення просторів для розвитку молоді	35 млрд дол
14	Покращення системи освіти	Відновлення та модернізація наукової інфраструктури України Система грантів для дослідників на основі результатів діяльності	5 млрд дол
15	Модернізація системи охорони здоров'я	Національний центр психічного здоров'я та реабілітації ветеранів Розвиток національної інфраструктури інформатизації охорони здоров'я	5 млрд дол
16	Розвиток систем культури та спорту	Соціальний проєкт «Активні парки – місця здорової України» Підтримка міжсекторальних проєктів у креативних індустріях	20 млрд дол
17	Забезпечення цілеспрямованої та ефективної соц. політики	Проект "Розвиток системи захисту прав дітей". Всеукраїнське дослідження потреб ветеранів	7 млрд дол

новлення України є і одним із інструментів екологічної трансформації для післявоєнного відновлення.

Головні висновки. План відновлення України є основним інструментом та механізмом екологічної трансформації. Він є системним механізмом управління реалізацією екологічних проєктів «зеленої» реконструкції, орієнтованих на Європейський зелений курс. Екологічні проєкти, які входять у різні національні програми Плану відновлення України спрямовані на вирішення проблем захисту, збереження та відновлення довкілля.

Матеріал підготовано за результатами проєкту «Transformational Learning Network for Resilience - Enabling Ukrainian higher education to ensure a sustainable and robust reconstruction of (post-war) Ukraine» [14] програми Erasmus+ Project number: 2023-1-DE01-KA220-HED-000157119 з використанням матеріалів розробленого партнерами курсу «STRATEGIC ADAPTIVE MANAGEMENT FOR SUSTAINABLE RECONSTRUCTION AND RESTORATION» [15].

Література

1. Проєкт «Програма зеленого відновлення енергетики України» URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/projects/prohrama-zelenoho-vidnovlennya-enerhetyky-ukrayiny>
2. Програма зеленого відновлення промисловості. Україна 2024-2028. Vienna International Centre Wagramerstr. 5, P.O. Box 300, A-1400 Vienna, Austria UNIDO 2024. 65 с.
3. Олексій Рябчин, Дарина Кулага Зелене відновлення України: 2023. Керівні принципи та інструменти для тих, хто ухвалює рішення, KSE, UNDP, 189 с. URL: <https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2024-04/undp-ua-green-recovery-ukr.pdf>
4. Відновлення та реконструкція повоєнної економіки України : наукова доповідь / НАН України, ДУ «Інститут економіки та прогнозування НАН України». – Електрон. дані. – К., 2022. – 305 с. URL: <https://ief.org.ua/publication/naukovi-dopovidi/2022/vidnovlennja-ta-rekonstrukcija-povoennoi-ekonomiky-ukrainy>
5. Повоєнна зелена відбудова України: процеси, зацікавлені сторони, участь громадськості. Аналітичний звіт – січень – лютий 2024 р. Андрій Андрусевич, Зоряна Козак. Представництво Фонду ім. Г. Бюлля в Україні, РАЦ «Суспільство і довкілля», 2024. 83 с.
6. Polukarov, Yu., Kachynska, N., Polukarov, O., Zemlyanska, O., & Mitiuk, L. (2024). Impact of the full-scale war in Ukraine on the environment: Environmental damage assessment Law. Human. Environment, 15(1), 85-100
7. Вплив війни на соціально-економічні системи: безпековий аспект: колективна монографія / за заг. ред. д.е.н., проф. М.І. Копитко., д.ю.н., проф. З.Р. Кісіль Львів: ЛьвДУВС, 2024. 394 с.
8. Communication from the commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions. The European Green Deal URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52019DC0640>
9. Європейський Зелений Курс. URL: <https://ukraine-eu.mfa.gov.ua/posolstvo/galuzeve-spivrobitnictvo/klimat-yevropejska-zelena-ugoda>
10. ЕкоЗагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://ecozagroza.gov.ua/feed>
11. Національна рада з відновлення України від наслідків війни URL: <https://www.kmu.gov.ua/diyalnist/konsultatyvno-doradchi-orhany/nacionalna-rada-z-vidnovlennya-ukrayini-vid-naslidkiv-vijni>
12. План відновлення України URL: <https://recovery.gov.ua/>
13. LIFE Programme Funding & tender opportunities portal.
14. Transformational Learning Network for Resilience - Enabling Ukrainian higher education to ensure a sustainable and robust reconstruction of (post-war) Ukraine URL: <https://translearnn.ztu.edu.ua/>
15. Ukrainian-German Digital Teaching Network URL: <https://ukrdigital.hnee.de/course/index.php?categoryid=12>

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

УДК 502.3:504.5

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.14>

АНАЛІЗ СИСТЕМ ДЕРЖАВНОГО ТА ГРОМАДСЬКОГО МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В М. ХАРКІВ ТА ХАРКІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Ломакіна О.С., Телюра Н.О.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

вул. Черноглазівська, 17, 61002, м. Харків

olha.lomakina@kname.edu.ua, Natalya.Telyura@kname.edu.ua

Ефективність прийнятих управлінських рішень в галузі охорони довкілля залежить від ефективності функціонування відповідної системи моніторингу. В статті висвітлюються питання організації систем державного та громадського моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря на території м. Харків та Харківської області. Для агломерації «Харків» та зони «Харківська» затверджені відповідні «Програми державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря». В статті наведено опис існуючих та планованих систем моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря відповідно до цих програм моніторингу. Програмами передбачено для агломерації «Харків» розширення існуючої мережі шляхом встановлення нових індикативних пунктів спостереження. Для зони «Харківська» планується придбання пересувного пункту контролю та встановлення автоматизованих постів спостережень за станом атмосферного повітря. Встановлено, що на території Харківської області з метою постійного інформування населення про якість атмосферного повітря в режимі реального часу працюють індикативні автоматичні станції громадського моніторингу EcoCity та громадської організації «SaveDnipro». Визначено, що більшість станцій розташована на території м. Харків. Відмічено, що в її західній та центральній частинах України розташована більша частина станцій громадського моніторингу, на тимчасово окупованих територіях станції відсутні. Зроблено припущення, що причиною є воєнні дії, які ускладнюють функціонування та обслуговування станцій спостережень. Визначено, що останнім часом низка закладів вищої освіти встановлює на своїй території станції громадського моніторингу. Це є можливим шляхом розвитку систем громадського моніторингу, що дозволить розширити існуючу систему громадського моніторингу та покращити забезпечення навчального процесу. *Ключові слова:* атмосферне повітря, система моніторингу, пункти спостережень.

Analysis of state and public air monitoring systems the city of Kharkiv and Kharkiv region. Lomakina O., Teliura N.

The effectiveness of management decisions in the field of environmental protection depends on the efficiency of the relevant monitoring system. The article highlights the issues of organization of the state and public monitoring systems in the field of atmospheric air protection in the city of Kharkiv and Kharkiv region. For the agglomeration 'Kharkiv' and the zone 'Kharkivska', the respective 'Programs of State Monitoring in the Field of Atmospheric Air Protection' have been approved. The article describes the existing and planned monitoring systems in the field of atmospheric air protection in accordance with these monitoring programs. The programs provide for the expansion of the existing network for the Kharkiv agglomeration by installing new indicative monitoring points. For the Kharkivska zone, it is planned to purchase a mobile control point and install automated air monitoring stations. It has been established that in the Kharkiv region, in order to inform the population about the quality of atmospheric air in real time, there are public indicative monitoring stations owned by the EcoCity and NGO SaveDnipro. It is determined that most of the stations are located in Kharkiv. It is noted that in its western and central parts of Ukraine there is a larger number of public monitoring stations, while there are no stations in the temporarily occupied territories. It is assumed that the reason for this is military operations, which complicate the functioning and maintenance of monitoring stations. It is determined that recently a number of higher education institutions have been installing public monitoring stations on their territory. This is a possible way to develop public monitoring systems, which will expand the existing public monitoring system and improve the provision of the educational process. *Key words:* atmospheric air, monitoring system, observation points.

Постановка проблеми. Питання скорочення рівня забруднення довкілля та організації системи ефективного управління його якістю є одними з головних завдань, які стоять перед системою державного екологічного управління в Україні. Інформаційним підґрунтям для прийняття ефективних управлінських рішень є дані державної системи моніторингу, що дозволяють оцінити поточний стан компонентів довкілля, відстежити існуючі тенденції та спрогнозувати подальші зміни, надати нау-

ково обґрунтовані рекомендації для прийняття цих рішень [1].

Забруднення атмосферного повітря є однією з найгостріших екологічних проблем в Україні, тому необхідним є забезпечення ефективного функціонування системи моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря, як складової державної системи моніторингу довкілля, з метою забезпечення інформаційної бази для прийняття рішень в сфері управління якістю атмосферного повітря.

Актуальність дослідження. Прийнятий у 2019 р. оновлений «Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» (далі – Порядок) [2] імплементує в існуючу систему державного моніторингу атмосферного повітря положення Директиви 2008/50/ЄС «Про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи» [3], зокрема в частині диференціації режимів оцінювання концентрації забруднювальних домішок.

Впровадження вимог Положення повинно забезпечити ефективну розбудову існуючої системи державного моніторингу України за стандартами Євросоюзу, зокрема шляхом організації та розвитку системи індикативних вимірювань. Слід також зважати на те, що одночасно з державною системою моніторингу атмосферного повітря також активно розвивається громадський моніторинг.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Проведене дослідження безпосередньо пов'язане з дослідженням сучасного рівня організації державної системи моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря на окремих територіях та її зміни на виконання вимог Порядку [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання функціонування та розширення існуючої системи моніторингу атмосферного повітря в Україні є досить широко дослідженим. В «Аналітичній записці щодо стану та перспектив розвитку державної системи моніторингу довкілля» [4] ґрунтовно розглянуто правові засади функціонування та існуючі підходи до організації ДСМД, її інституційне забезпечення, матеріально-технічні та фінансові аспекти функціонування, визначено існуючі проблеми та запропоновано кроки з реформування. В розглянутих питаннях за необхідності виокремлено аспекти, пов'язані з організацією та функціонуванням системи моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря. У дослідженні [5] авторами проведений ґрунтовний аналіз механізмів організації та функціонування моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря в Україні на національному, регіональному та муніципальному рівнях.

Питання організації та вдосконалення систем моніторингу за станом атмосферного повітря України на території окремих населених пунктів також є напрямком окремих наукових досліджень. Так у дослідженні [6] розглянуто існуючу систему спостережень за станом атмосферного повітря в м. Харків та запропоновано заходи щодо приведення її до вимог українського та європейського законодавства. Авторами встановлено необхідність вдосконалення існуючої системи моніторингу атмосферного повітря в місті та рекомендовано облаштування нових індикативних постів спостережень, а також використання маршрутних постів в зонах впливів промислових підприємств. У дослідженні [7] проведено аналіз державної, муніципальної та громадської систем моніторингу атмо-

сферного повітря в м. Київ, надано рекомендації щодо їх поліпшення. Значну увагу приділено аналізу діяльності громадських організацій зі створення мереж громадських автоматичних станцій моніторингу якості повітря та забезпечення доступності результатів цих спостережень для громадськості. Питання розвитку системи громадського індикативного моніторингу в м. Миколаїв розглядається у роботі [8]. Питання оптимізації системи моніторингу атмосферного повітря Вінницької зони за допомогою методу аналізу ієрархій розглянуто у дослідженні [9], зокрема авторами запропоновано новий підхід щодо встановлення пріоритетності місць розташування стаціонарних пунктів спостережень. Методичні підходи щодо визначення міст спостережень за станом атмосферного повітря визначено також у дослідженні [10], де автори розробили пропозиції щодо організації та вдосконалення автоматизованої системи спостережень у м. Кам'янське, Марганець та Жовті води, ґрунтуючись на результатах математичного моделювання поширення забруднення в приземному шарі атмосфери та оцінок інгалаційного ризику для здоров'я населення.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Аналіз наукової літератури свідчить про значний інтерес дослідників до проблем організації та функціонування систем моніторингу атмосферного повітря. Недостатню увагу приділено питанню функціонування системи громадського моніторингу в м. Харкові та Харківській області.

Новизна. Ефективне функціонування та розширення існуючої системи моніторингу атмосферного повітря є запорукою ефективного управління його якістю. Метою даної статті є аналіз поточного стану та розвитку систем державного та громадського моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря в м. Харків та Харківській області.

Виклад основного матеріалу. Згідно «Порядку здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» [2] для здійснення цілей моніторингу атмосферного повітря та управління його якістю, на території України встановлюють агломерації, межі яких збігаються з межами відповідних міст, та зони, межі яких збігаються з межами областей без урахування агломерацій на їх території. Для кожної зони та агломерації повинна бути розроблена «Програма державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря», форма якої затверджена Наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [11].

На виконання вимог Порядку [2], для м. Харків та Харківської області розроблені «Програма державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря агломерації «Харків» на 2024-2028 роки» [12] та «Програма державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря» на 2021-2025 роки для зони «Харківська» [13].

Згідно з Програмою [12], чинна система моніторингу стану атмосферного повітря на території агломерації «Харків» станом на 2022 р. складається з 10 стаціонарних постів спостережень. Індикативні станції та пересувні пункти спостережень на території агломерації відсутні. Стаціонарні пункти спостережень належать Харківському регіональному центру з гідрометеорології і розташовані у Шевченківському, Холодногірському, Новобаварському, Слобідському, Київському, Салтівському та Немишлянському районах м. Харків. На всіх постах спостережень здійснюється спостереження за вмістом пилу, сірки діоксиду, вуглецю оксиду, азоту діоксиду. Також проводиться вимірювання концентрацій фенолу (ПСЗ № 9, 13, 16), формальдегіду (ПСЗ № 9, 11, 12, 16, 17, 18), важких металів (ПСЗ № 11, 17, 19), сажі (ПСЗ № 18), аміаку (ПСЗ № 19, 24) та сірководню (ПСЗ № 21). Спостереження здійснюються за кожною домішкою окремо чотири рази на добу, крім неділі та вихідних. Також вимірювання концентрації забруднювальних речовин в атмосферному повітрі виконуються на 26 пунктах спостережень, які належать Харківській міській філії ДУ «Харківський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України». Контроль виконується шляхом фіксованих вимірювань чотири рази на рік на 20 пунктах та двічі на рік на 6 пунктах спостережень. На всіх пунктах спостережень контролюються пил неорганічний, сірки діоксид, вуглецю оксид, азоту оксид та діоксид; на 25 пунктах – формальдегід, свинець, кадмій та нікель; на 1 пункті – сірководень. Важкі метали визначаються в ЦГО ім. Б. Срезневського.

Заплановане у Програмі [12] розширення системи моніторингу для м. Харків передбачає створення у 2024-2028 р.р. п'яти нових індикативних пунктів спостережень за станом атмосферного повітря, які працюватимуть онлайн, для спостережень за вмістом наступних забруднювальних речовин: ТЧ_{10} , $\text{ТЧ}_{2,5}$, сірки діоксид, азоту діоксид та вуглецю оксид (на всіх постах); озон (на одному пості). Нові пункти спостережень будуть розташовані у Київському, Холодногірському, Баварському, Немишлянському та Індустріальному районах міста.

Згідно з Програмою [13], система моніторингу стану атмосферного повітря на території зони «Харківська» станом на 2021 р. складається з 68 пересувних пунктів спостережень, які належать ДУ «Харківський ОЛЦ МОЗ України». Пункти спостережень розташовані по районах області наступним чином: Богодухівський – 10, Ізюмський – 13, Берестинський – 6, Куп'янський – 6, Лозівський – 11, Чугуївський – 14, Харківський – 8. Стаціонарні та індикативні пости відсутні. На всіх пунктах здійснюється спостереження за вмістом пилу, сірки діоксиду, азоту діоксиду; на більшості пунктів – за вмістом вуглецю оксиду та формальдегіду; на окремих пунктах – фенолу, свинцю, хрому шестивалентного, сажі, бензолу, нікелю, кадмію та озону.

Згідно з Програмою [13] для зони «Харківська» планується придбання одного пересувного пункту контролю на базі лабораторії та встановлення дев'яти автоматизованих постів спостережень за станом атмосферного повітря, на яких здійснюватимуться спостереження за концентраціями діоксиду сірки, діоксиду азоту та оксидів азоту, оксиду вуглецю, ТЧ_{10} , $\text{ТЧ}_{2,5}$, озону, бензолу, бенз(а)пірену, ртуті, свинцю, арсену, кадмію та нікелю. Програма передбачає можливість коригування кількості постів та місця їх розташування.

Дані щодо якості атмосферного повітря, отримані за допомогою системи державного моніторингу, оприлюднюються щомісяця на сайті Харківської військової державної адміністрації [14] у складі «Аналітичної довідки щодо екологічного стану м. Харкова та Харківської області» та щорічно у складі «Доповіді про стан навколишнього природного середовища в Харківській області».

Станції громадського моніторингу є індикативними та призначені для здійснення безперервних вимірювань вмісту забруднювальних речовин. Їх функціональні можливості дозволяють як отримувати дані про поточний вміст домішок, так і накопичувати масиви даних для подальшої оцінки та обробки. [8]. Основним призначенням систем громадського моніторингу є інформування населення про якість атмосферного повітря в режимі реального часу. У значній кількості наукових публікацій дані, отримані від станцій громадського моніторингу використовуються у якості вихідних даних для проведення досліджень, що свідчить про достатньо високий рівень довіри до їх достовірності з боку наукової спільноти.

Проведений аналіз розташування станцій громадського моніторингу показав, що на території м. Харків та Харківської області функціонують станції спостереження у мережах громадського моніторингу EcoCity та SaveDnipro.

Станції мережі громадського моніторингу якості повітря EcoCity розташовані головним чином на території м. Харків (8 станцій) та ще одна у передмісті – с. Пісочин. На всіх станціях вимірюється вміст дрібнодисперсного пилу $\text{PM}_{2,5}$ та PM_{10} та метеорологічні показники (температура, вологість, атмосферний тиск). На п'яти станціях також визначаються основні газові домішки (залежно від станції – азоту діоксид, вуглецю оксид, аміак, формальдегід, хлор) [15]. Розташування станцій на території м. Харків наведено на рис. 1.

Мережа громадського моніторингу якості повітря SaveEcoBot, створена ГО «SaveDnipro», нараховує сім станцій моніторингу, з яких три безпосередньо розташовані у м. Харків та чотири у Харківській області (с. Солоницівка, с. Ков'яги, с. Лиман, с. Слобожанське). Станції надають інформацію стосовно індексу якості атмосферного повітря, розрахованого для дрібнодисперсного пилу, та основні

метеорологічні показники (температура, вологість, атмосферний тиск) [16].

Аналізуючи розташування станцій громадського моніторингу в цілому по Україні за даними різних платформ [15, 16, 17] можна відмітити загальну нерівномірність їх розподілу на території України (рис. 2, 3, 4).

Більшість станцій наразі розташована в західній та центральній частині України та в м. Київ. Це може бути пояснено тим, що східна частина України наразі більше потерпає від воєнної агресії Російської Федерації, що ускладнює функціонування та обслуговування станцій спостережень. На тимчасово оку-

пованих територіях станції громадського моніторингу відсутні.

Зважаючи на те, що основною функцією, яку виконує мережа громадського моніторингу є інформування населення про якість атмосферного повітря в реальному часі, важливим є подальший її розвиток та розширення.

Одним зі шляхів розширення системи громадського моніторингу є широке залучення закладів вищої освіти до встановлення станцій громадського моніторингу на своїй території. Окремі ЗВО вже впроваджують цю практику в процес підготовки здобувачів, зокрема: Національний університет біоре-

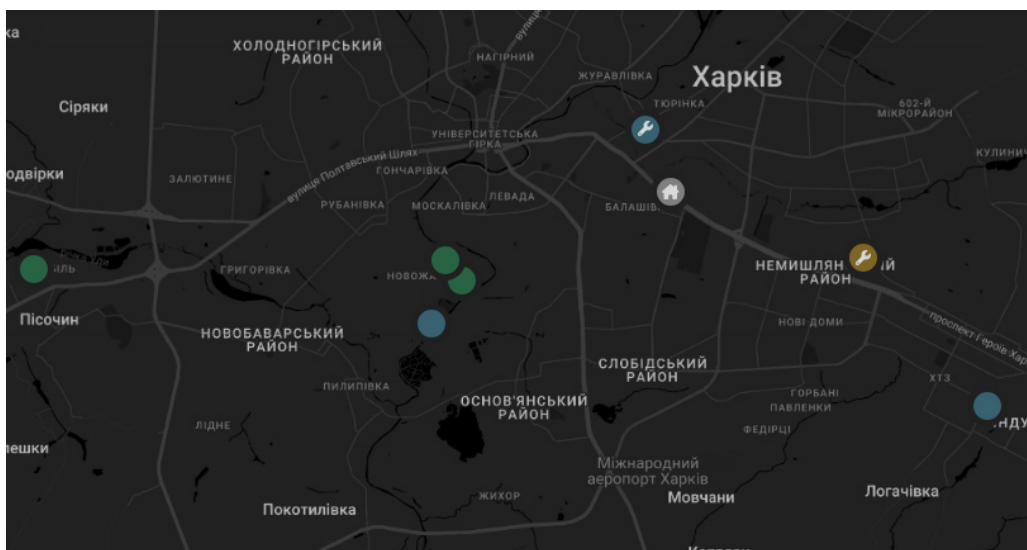


Рис. 1. Розташування станцій громадського моніторингу EcoCity на території м. Харків [15]

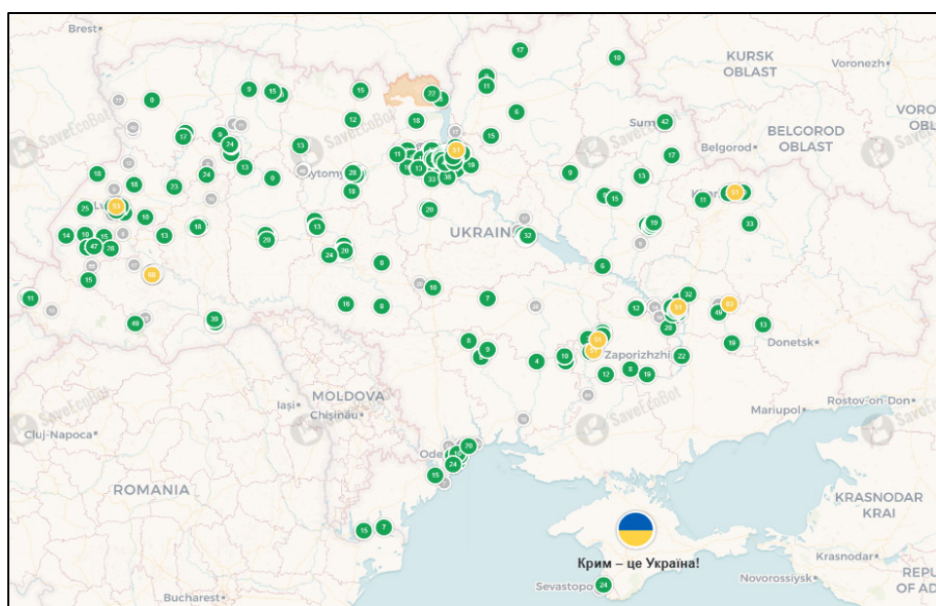


Рис. 2. Розташування станцій моніторингу ГО «SaveDnipro» [16]

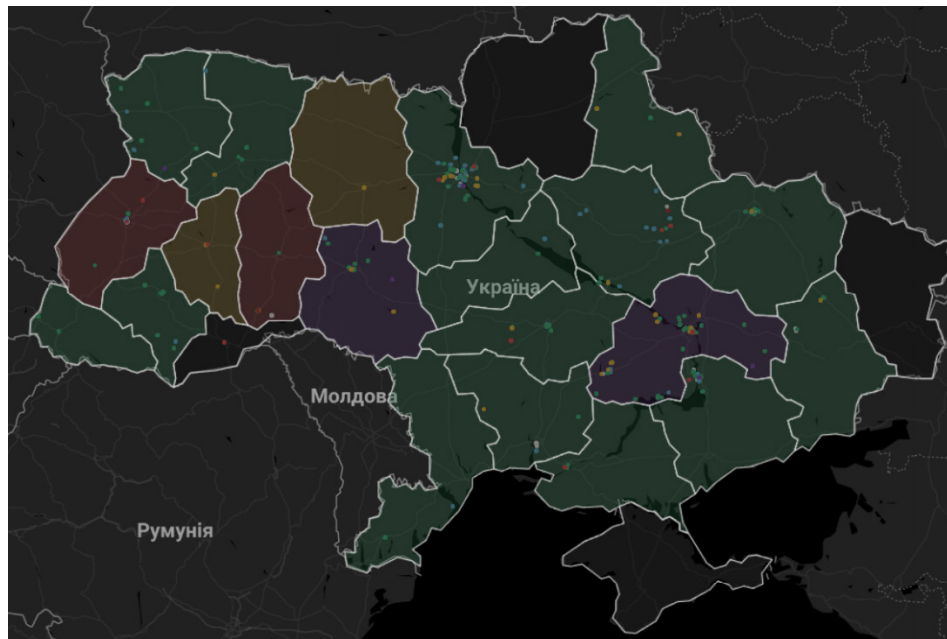


Рис. 3. Розташування станцій громадського моніторингу EcoCity [15]

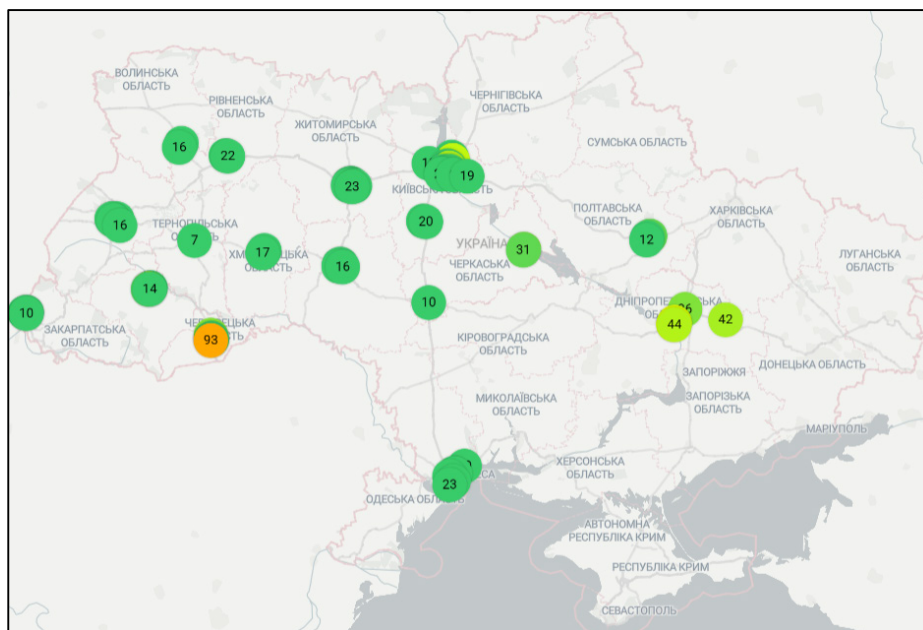


Рис. 4. Розташування станцій моніторингу ГО Лун МІСТО [17]

сурсів та природокористування України (автоматичні станції ГО «SaveDnipro») [18]; Національна металургійна академія та Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені Лазаряна (автоматичні станції EcoCity) [19]; Кременчуцький національний університет імені М. Остроградського (автоматичні станції EcoCity) [20].

З одного боку це дозволяє збільшити кількість станцій громадського моніторингу та її просторове охоплення, а з іншого – створює для ЗВО науково-практичну базу для забезпечення підготовки фахів-

ців екологічних спеціальностей в частині організації системи моніторингу якості атмосферного повітря, її подальшого моделювання та прогнозування.

Головні висновки. Проведене дослідження показало, що для м. Харків та Харківської області відповідними органами управління якістю атмосферного повітря розроблені «Програми державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря». Зазначені Програми передбачають: розширення існуючої системи державного моніторингу на території м. Харків шляхом створення п'яти нових

індикативних пунктів спостереження; придбання пересувного пункту контролю на базі лабораторії та створення автоматизованих постів спостережень на території зони «Харківська».

На території Харківської області функціонують станції спостережень мереж громадського моніторингу EcoCity та ГО «SaveDnipro», більшість яких розташована на території м. Харків. Це станції

здійснюють індикативні вимірювання, які є джерелом інформації для населення про поточну якість атмосферного повітря. Перспективним напрямком збільшення постів громадського моніторингу є встановлення станцій моніторингу на території ЗВО, що дозволяє одночасно покращувати науково-практичне забезпечення навчального процесу та розширювати існуючу мережу станцій.

Література

- Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем: постанова Каб. Міністрів України від 13.06.2024 р. № 864. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-%D0%BF#Text>
- Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря: постанова Каб. Міністрів України від 14.08.2019 р. № 827. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#n18>
- Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21.05.2008 р. Якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text
- Моніторинг довкілля. Аналітична записка щодо стану та перспектив розвитку державної системи моніторингу довкілля / Команда підтримки реформ Міндовкілля. Київ, 2003. 119 с. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/02/Monitoring-Green-Paper_15_02_2022.pdf
- Ангурець О., Хазан П., Колесникова К. Управління якістю атмосферного повітря: від концепції до впровадження. Звіт за результатами досліджень / ред. М. Сорока. Прага-Київ: Arnika, 2021. 52 с. URL: <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2021/11/cleanair.org.ua-i-ukrajina-fin-web-hires.pdf>
- Кириченко П., Варламов Є., Квасов В. Організація моніторингу за станом атмосферного повітря у м. Харків. *Екологічна безпека та природокористування*. № 48(8), 2023. С. 81–90. URL: <https://es-journal.in.ua/article/view/297270>
- Сагайдак Д. А., Боголюбов В. М. Аналіз систем моніторингу атмосферного повітря в м. Київ. *Екологічні науки*. № 1(52), Том 1, 2024. С. 51–58. URL: https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2024/1/part_1/9.pdf
- Суша Н. О., Григор'єва Л. І. Місце індикативних вимірювань в системі моніторингу якості атмосферного повітря. *Екологічні науки*. № 4(31), 2020. С. 27–30. URL: <https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2020/4/6.pdf>
- Мокін В. Б., Крижановський Є. М., Яцолт А. Р., Шмундяк Д. О., Паєвський Б. В. Оптимізація моніторингової мережі стану атмосферного повітря Вінницької зони за даними 2016–2020 рр. *Матеріали LI Науково-технічної конференції під-розділів ВНТУ* (м. Вінниця, 31 трав. 2022 р.), 2022. URL: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36041>
- Петросян А. А., Маремуха Т. П., Моргульова В. В. Удосконалення та організація автоматизованої системи моніторингу за якістю атмосферного повітря в Україні. *Молодий вчений*. № 8(84), 2020. С. 97–102. URL: <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/775/746>
- Про затвердження форми Програми державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря: наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів від 25.02.2021 р. № 147. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0543-21#Text>
- Програма державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря агломерації «Харків» на 2024–2028 роки». *ІнфоСІТІ. Офіційний додаток 2*. URL: https://infocity.kharkiv.ua/wp-content/uploads/2024/11/130_oficialnoye-prilojenie_2024_2_final.pdf
- Програма державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря на 2021–2025 роки для зони «Харківська». URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1134/113320/Attaches/programa_derzhavnogo_monitoringu_harkivska_oblast.pdf
- Стан навколишнього природного середовища міста Харкова та Харківської області. URL: <https://kharkivoda.gov.ua/oblasna-derzhavna-administratsiya/struktura-administratsiyi/strukturni-pidrozdzili/486/2736>
- Карта моніторингу якості повітря. EcoCity. URL: <https://reborn.eco-city.org.ua/>
- Карта якості повітря. SaveEcoBot. URL: <https://www.saveecobot.com/maps>
- Карта якості повітря Лун Місто AIR. URL: <https://lun.ua/misto/air?srsId=AfmBOooql0hfZkS0Y7W5V1CYzSImToWw3LxBLRNgAxEZ3AxEKKnO-XHz>
- Мережа моніторингу атмосферного повітря розширяється. URL: <https://nubip.edu.ua/node/146566>
- Моніторинг для науки у Дніпрі. URL: https://cleanair.org.ua/6595/dnipro_univerc/
- КрНУ підписав меморандум щодо здійснення громадського моніторингу якості атмосферного повітря у Кременчуці. URL: <https://www.kdu.edu.ua/new/detail.php?id=2578>

МЕТОДИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ МОНІТОРИНГУ ЖИТТЄВОГО СТАНУ РОСЛИН В УРБАНІЗОВАНИХ ЕКОСИТЕМАХ

Шумик М.І., Попіль Н.І., Бойко Р.В.

Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України
вул. Садово-Ботанічна, 1, 03014, м. Київ
shumikmikola@gmail.com

Опрацьовані теоретичні і практичні засади моніторингу та оцінки життєвого стану міських рослин. Визначення життєвого стану деревних рослин передбачає оцінку їх життєвості (*vitality*) та життєздатності (*viability*). Натомість оцінки санітарного стану насаджень рекомендовано в урбоекосистемах проводити оцінку життєвості рослин. Інтегральна оцінка життєвого стану додатково розкриває фізіологію рослинного організму – його життєдіяльність в поточних умовах довкілля. Це уможливило розробку оперативних заходів з покращення стану рослин, зняття стресових ситуацій, оптимізації умов довкілля для успішного росту та розвитку рослин.

Вивчено життєвість (віталітет) рослин в умовах екотопів інтенсивних автотранспортних систем та екотопів намівних пісків і штучних едафотопів міста Києва за індивідуальними морфометричними параметрами структури, росту, розвитку та репродукції організмів. Візуально віталітет деревних рослин визначався за наступними критеріями:

- величина приросту пагонів і структура крони;
- стан асиміляційних органів (облистяність, розміри листків, колір і некрози);
- репродуктивна здатність;
- стійкість до шкідників і хвороб;
- порушення фенологічних ритмів;
- здатність до регенерації після фізіологічного стресу чи механічних пошкоджень.

Рекомендовано віталітет деревних рослин визначати окремо для трьох різних вікових станів рослин: прегенеративного (віргінільні рослини, молодість), генеративного (зрілість) та сенильного (старіння). Доцільність такого підходу зумовлена наявністю чи відсутністю основних параметрів життєдіяльності рослин на різних етапах їх онтогенезу (наприклад, в молодих рослин відсутнє плодоношення, а в старих рослин практично відсутній приріст пагонів). Розроблено три шкали оцінки віталітету деревних рослин.

За результатами оцінки віталітету деревних рослин у вуличних насадженнях встановлено, що майже 50% дерев характеризуються низькою життєздатністю та всихають. Лише 20% рослин мають високу життєвість. Подібна тенденція спостерігається у рослин в екотопах намівних пісків, окрім випадків природного заростання. Аналіз природного заростання на намівних пісках у Конча-Заспі свідчить про ефективність та перспективність цього процесу в порівнянні з штучним озелененням низки житлових районів лівобережного Києва. *Ключові слова:* життєвість та життєздатність деревних рослин, віталітет, екотоп, урбанізовані екосистеми.

Methodological and practical aspects of monitoring the vital state of plants in urbanized ecosystems. Shumik M., Popil N., Boyko R.

Theoretical and practical foundations for monitoring and assessing the vital state of urban plants have been established. Determining the vital state of woody plants involves evaluating their vitality and viability. Instead of assessing the sanitary condition of plantings, in urban ecosystems, it is recommended to assess plant vitality. An integrated assessment of the vital state further reveals the physiology of the plant organism - its life activity under current environmental conditions. This enables the development of prompt measures to improve plant condition, mitigate stress situations, and optimize environmental conditions for successful plant growth and development.

Vitality of plants was studied under the conditions of ecotopes of intensive transport systems and ecotopes of alluvial sands and artificial edaphotopes of the city of Kyiv based on individual morphometric parameters of structure, growth, development, and reproduction of organisms. Visually, the vitality of woody plants was assessed based on the following criteria:

- the length of shoot growth and crown structure;
- the condition of assimilation organs (foliage density, leaf size, color, and necrosis);
- reproductive capacity;
- resistance to pests and diseases;
- uncharacteristic repeated flowering as an indicator of physiological stress;
- the ability to regenerate after physiological stress or mechanical damage.

It is recommended to assess the vitality of woody plants separately for three different age stages: pre-generative (virginile plants, youth), generative (maturity), and senile (aging). The appropriateness of this approach is based on the presence or absence of key parameters of plant life activity at different stages of their ontogenesis (for example, young plants do not bear fruit, while older plants show almost no shoot growth). Three assessment scales for woody plant vitality have been developed.

Based on the results of vitality assessment of woody plants in street plantings, it was established that nearly 50% of trees are characterized by low vitality and are drying out. Only 20% of plants show high vitality. A similar trend is observed among plants in ecotopes of alluvial sands, except in cases of natural overgrowth. The analysis of natural overgrowth on alluvial sands in Koncha-Zaspa indicates the effectiveness and promise of this process compared to artificial landscaping in several residential areas on the left bank of Kyiv. *Key words:* vitality and viability of woody plants, vitality, ecotope, urbanized ecosystems.

Постановка проблеми. Основною причиною погіршення стану зелених насаджень, зниження ними середовищотвірної (екологічної) функції та якості природного довкілля в Києві є вплив комплексу несприятливих антропогенних (міських) і природних чинників – техногенне забруднення довкілля, аридизація клімату та ксеротизація умов зростання зелених рослин. Відсутність, адаптованої до змін клімату та зростаючого антропогенного тиску, технології створення та догляду за зеленими насадженнями знижує здатність зелених рослин виконувати притаманні їм екологічні функції. Умови території Києва для деревних видів є задовільними за ґрунтово-кліматичними особливостями і критичними за рівнем антропогенного навантаження. В Києві комплексна трансформація екотопів у насадженнях парків відносно лісового становить 55%, скверів і садів – 80%, а в насадженнях вулиць – 100%. Такі чинники, як сухість повітря та ґрунту, критично низька родючість і зруйнованість ґрунтів, хімічна забрудненість екотопів, особливо, в насадженнях вулиць і в напрямку до центру міста, найбільше погіршують умови вирощування деревних рослин.

Нині не існує всебічної оцінки життєвого стану деревних рослин, яка б ґрунтувалася на врахуванні трансформованості довкілля за комплексом природних і антропогенних чинників та біологічних особливостей рослинних організмів. Оцінка санітарного стану рослин не передбачає виявлення причин зниження стійкості організму, порушення його фізіології та біології, а заходи з покращення санітарного стану насаджень не враховують вікової і статеві структури інтродукційних популяцій, індивідуальних якостей особин [1].

Актуальність дослідження. Загострення проблем озеленення в урбанізованому довкіллі вимагає адекватної реакції з боку фахівців та наукової спільноти. Підвищення стійкості та ефективності зелених насаджень, зменшення витрат на їх створення та догляд є не лише даниною часу, але й необхідністю в забезпеченні сталого розвитку урбанізованих та природних екосистем. Без інтегральної оцінки життєвого стану рослин, виявлення причин його погіршення неможливою є розробка оперативних заходів з покращення стану рослин, зняття стресу в організмів, оптимізації умов довкілля для успішного розвитку рослин.

Досягнення сталого розвитку урбоекосистем Києва та оздоровлення життєвого простору людини можливе лише за умови функціонування зелених насаджень з високою життєвістю та життєздатністю окремих особин та інтродукційних популяцій.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. Стаття підготовлена за матеріалами наукових досліджень з відомчої тематики Національної академії наук України №: 347-ЛБ «Моніторинг стану зелених насаджень урбанізованих екосистем: методологія і сталий розвиток».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати оцінки життєвого стану деревних рослин

в урбанізованому середовищі висвітлені в небагатьох наукових дослідженнях та працях.

У науковій монографії П. С. Гнатіва «Функціональна діагностика в дендроекології» обґрунтована концепція функціональної адаптації деревних рослин в різних екотопах та запропоновані методи оцінки трансформованості середовища. Досліджені морфо-фізіологічні й біохімічні реакції асиміляційного апарату деревних видів на умови вегетації, запропоновані методи діагностики фізіологічного стану та способи вирощування декоративних рослин, які забезпечують нормальну життєдіяльність окремих особин, біогруп, фітоценозів [2].

У дослідженнях О.М. Горелова для визначення поточного стану рослини запропоновано використовувати термін життєвість, або віталітет, а для прогностичної оцінки потенційного життєвого стану – життєздатність. Візуально життєвість визначається за трьома категоріями: висока, середня і низька. Для кількісної оцінки віталітету запропоновано 6-бальну шкалу [3].

Для природних насаджень В.Г. Кияк пропонує визначати життєвість (віталітет) популяції як інтегральну характеристику, яка відображає сучасний стан популяції за індивідуальними і груповими параметрами структури, росту, розвитку та репродукції рослинних організмів [4].

Найбільш наближеною до вирішення практичних питань моніторингу життєвого стану деревних рослин в міських насадженнях є європейські методики на основі шкали вітальності Ролоффа (Roloff 2015, 2018) та Стандартів оцінки та діагностики дерев (FER 2021) [5,6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Для екологічної оптимізації біогеоценотичного покриву сучасного міста потрібний екологічно ефективний, стійкий та життєздатний асортимент рослин. Науково-практичний моніторинг життєвості поточного асортименту деревних видів рослин в озелененні міста, є необхідною передумовою для оптимізації урбоекосистем, забезпечення їх сталого розвитку. Чим вища життєвість та життєздатність рослин, тим ефективніша роль зелених насаджень в оздоровленні життєвого простору людини та формуванні сталого довкілля. Безпечне утримання дерев у місті також можливе лише за обґрунтованої прогностичної оцінки життєздатності кожного окремого рослинного організму.

Метою роботи стало опрацювання методики визначення життєвого стану рослин шляхом розробки, диференційованих за віком, шкал оцінки життєвості деревних рослин, встановлення кількісних та якісних параметрів їх безпечного та ефективного функціонування.

Наукова новизна. Розроблені методичні підходи до оцінки віталітету (життєвості) міських рослин та життєздатності інтродукційних популяцій. Життєвість (віталітет) рослин розглядається як інтегральна характеристика, що відображає поточний стан рослин на основі найважливіших індивідуаль-

них параметрів морфофізіологічної характеристики. Рекомендовано віталітет деревних рослин визначати окремо для трьох різних вікових станів рослин: прегенеративного (віргінільні рослини – молодість), генеративного (зрілість) та сенильного (старіння).

Матеріали та методи досліджень. Для поточної оцінки стану урбоекосистем використані методи структурного, системного та функціонального аналізу. Для з'ясування ролі біотичних і абіотичних факторів, що впливають на структуру та динаміку видів рослин, використані екологічні методи у формі візуального обстеження, експерименту та моделювання.

Віталітет рослин вивчався в умовах екотопів інтенсивних автотранспортних систем та екотопів наливних пісків і штучних едафотопів міста Києва. Обстежені деревні насадження і визначено віталітет дерев восьми вулиць (Райдужна, Мала Житомирська, Олександра Архипенка, Святослава Хороброго, Генерала Алмазова, космонавта Леоніда Каденюка, Черчилля, Лесі Українки) та низки колекційно-експозиційних ділянок ботанічного саду – Вересові, партер, трояндовий рушник, Сад троянд.

Виклад основного матеріалу. Віталітет визначався на індивідуальному рівні, тобто на рівні рослинного організму, особини (організмівий рівень). Потрібно розрізняти віталітет – як здатність рости в існуючих умовах та віталітет – як генетичну здатність протистояти стресу (адаптація). Ми розглядали варіант життєвості вже адаптованих рослин (адаптація є сукупністю реакцій організму, які направлені на стабілізацію життєвого стану окремих органів чи організму в цілому задля захисту та збереження його цілісності). Життєвість (віталітет) рослин – це інтегральна характеристика, яка відображає поточний стан рослин на основі найважливіших індивідуальних параметрів структури, росту, розвитку та репродукції.

Оцінка життєвості може проводитися на основі короткотривалих, навіть однорічних досліджень і є достатньо динамічною ознакою. На відміну від життєздатності популяцій, у яких стабільно низька життєвість притаманна в умовах віддалених від еколого-фітоценотичного оптимуму, життєвість окремих особин в міських умовах лімітується не лише екологічними чинниками, але й ступенем антропогенного тиску.

Візуально віталітет деревних рослин визначався за наступними критеріями:

- величина приросту пагонів і структура крони;
- стан асиміляційних органів (облистяність, розміри листків, колір і некрози);
- репродуктивна здатність;
- стійкість до шкідників і хвороб;
- порушення фенологічних ритмів (зокрема, непридатне повторне квітування як ознака фізіологічного стресу);
- здатність до регенерації після фізіологічного стресу чи механічних пошкоджень.

Віталітет деревних рослин визначається окремо для трьох різних вікових станів рослин: прегенеративного (віргінільні рослини, молодість), генеративного (зрілість) та сенильного (старіння). Доцільність

такого підходу зумовлена наявністю чи відсутністю основних параметрів життєвості рослин на різних етапах їх онтогенезу (наприклад, в молодих рослин відсутнє плодоношення, а у вікових рослин практично відсутній приріст пагонів).

Період молодості є досить тривалим у рослин насіннєвого походження й складає від 6-10 років (яблуня, горобина, глід) до 40-60 років (бук, дуб, сосна, гірकोкаштан). В умовах культури цей вік значно зменшується. Ювенільність (молодість) рослин можна підсилити обрізкою пагонів, гілок, що сприяє росту ювенільної деревини й суттєво подовжує фазу та ступінь ювенільності. Тривалість фази молодості у деревних рослин, розмножених вегетативно, залежить від фізіологічного віку батьківських організмів чи біологічних особливостей підщепи. За звичай, у цих рослин репродуктивний період настає раніше, ніж у насіннєвих нащадків.

Шкала оцінки віталітету молодих (прегенеративних) деревних рослин в міських насадженнях:

1. Рослина у фазі активного лінійного росту вегетативних пагонів. Верхівкові і бічні пагони ростуть динамічно і рівномірно, утворюючи переважно довгі стебла першого і другого порядків. Рослинам часто притаманний дворазовий річний приріст верхівкових пагонів. Листковий апарат густий і рівномірний по всій кроні. Асиміляційні органи без видимих ушкоджень і некрозу.

2. Злегка сповільнений ріст головного пагону. Бічні бруньки утворюють короткі пагони, які виглядають як списи. Близько 25% об'єму листового апарату втрачається із-за недорозвиненості пагонів та часткового некрозу асиміляційних органів. Є ознаки зменшення розмірів листової пластинки.

3. Ріст пагонів помітно зменшується і утворюються лише короткі пагони. Приріст рослин у висоту мінімальний. Крона втрачає близько 50% об'єму листового апарату й виглядає дуже розрідженою. Сильно виражений некроз асиміляційних органів.

4. Поточний приріст пагонів відсутній. Спостерігається суховершинність та всихання скелетних і бічних пагонів. Регенерація пагонів відсутня. Близько 75% об'єму листового апарату втрачається із-за всихання гілок і зменшення розмірів листової пластинки. Некроз асиміляційних органів в кінці вегетаційного сезону близько 100%.

5. Всихаючі дерева без ознак регенерації і мертві дерева та кущі.

Більшість рослин в досліджуваних екотопах перебувають у репродукційному віці – періоді квітування, плодоношення та утворення насіння. У цей період приросту ще досить інтенсивні. Період зрілості у деревних видів різний і настання його залежить від внутрішніх, генетичних чинників та від умов довкілля. Неприятливі умови, стреси, різкі зміни умов довкілля часто прискорюють настання репродуктивного віку. За звичай умови довкілля, що сприяють інтенсивним ростовим процесам віддаляють цвітіння, затримують його, тоді як чинники, що пригнічують ріст – стимулюють генеративний роз-

виток. Швидкорослі та світлолюбні види вступають у фазу плодоношення раніше, ніж повільнорослі та тіньовитривалі.

Шкала оцінки віталітету зрілих (генеративних) деревних рослин в міських насадженнях:

1. Рослина у фазі оптимального лінійного росту пагонів. Верхівкові і бічні пагони ростуть динамічно і рівномірно. Листковий апарат густий і рівномірний по всій кроні. Рослинам притаманне рясне цвітіння та плодоношення. Повторне (непритаманне рослині) квітування на рівні організму не спостерігається.

2. Злегка сповільнений ріст головного пагону. Бічні бруньки утворюють короткі пагони, які виглядають як списи. Близько 25% об'єму листового апарату втрачається із-за недорозвиненості пагонів і некрозу асиміляційних органів. Є ознаки зменшення розмірів листової пластинки. Спостерігається зменшення морфометричних параметрів репродуктивних органів. Стресові ситуації (посуха, зміни метеорологічних умов, клімату) викликають повторне, непритаманне для організму, цвітіння.

3. Ріст пагонів помітно зменшується і утворюються лише короткі пагони. Приріст рослин у висоту мінімальний. Крона втрачає близько 50% об'єму листового апарату й виглядає дуже розрідженою. Сильно виражений некроз асиміляційних органів. Спостерігається слабе квітування, передчасне опадання квітів, зав'язі, плодів, деформація репродуктивних органів.

4. Поточний приріст пагонів відсутній. Спостерігається суховершинність та всихання скелетних і бічних пагонів. Регенерація пагонів відсутня. Близько 75% об'єму листового апарату втрачається із-за всихання гілок і зменшення розмірів листової пластинки. Квітування відсутнє, або дуже рідке; плоди не утворюються.

5. Всихаючі дерева без ознак регенерації і мертві дерева та кущі.

Визначення життєвого стану постгенеративних, вікових рослин має специфічні особливості. Процес старіння рослинних організмів супроводжується зниженням загальної стійкості рослин, інтенсивності фізіологічних процесів, накопичення вегетативної маси, тощо. Проте життєздатність, до прикладу, багатьох вікових дубів ще досить висока, що сприяє ефективному виконанню ними екологічних та оздоровчих функцій (поглинання токсичних полутантів у повітрі, підтримання здорового мікроклімату, тощо). Шкала оцінки віталітету старих (сенільних) деревних рослин в міських насадженнях:

1. Рослина у фазі мінімального лінійного росту пагонів, або прирости відсутні. Листковий апарат густий і рівномірний по всій кроні. Асиміляційні органи без видимих ушкоджень і некрозу. Ознак аварійності стовбура дерева немає. Рослина є ефективним продуцентом корисних речовин в довкілля для покращення його екології.

2. Прирости головного пагону відсутні. Бічні пагони з мінімальним приростом, або приріст відсутній. Крона злегка розріджена. Близько 25% об'єму листового апарату втрачається із-за відсутності приростів пагонів і некрозу асиміляційних органів. Є ознаки зменшення розмірів листової пластинки.

Є ознаки аварійності окремих гілок у кроні дерева.

3. Прирости пагонів відсутні. Крона втрачає близько 50% об'єму листового апарату й виглядає дуже розрідженою. Сильно виражений некроз асиміляційних органів та зменшення розмірів листової пластинки. Стовбур та основи скелетних гілок з незначними пошкодженнями дереворуйнівними грибами. Є невеликі дупла, що призводять до аварійності скелетних гілок.

4. Спостерігається суховершинність та всихання скелетних гілок і бічних пагонів. Близько 75% об'єму листового апарату втрачається із-за всихання гілок і зменшення розмірів листової пластинки. Стовбур та основи скелетних гілок сильно уражені дереворуйнівними грибами, є великі дупла. Безпечне утримання дерева потребує додаткових заходів з його стабілізації та постійного моніторингу.

5. Всихаючі, аварійні дерева без ознак регенерації і мертві дерева та кущі. Консервація стовбура чи окремих гілок неможлива.

У малих популяцій, якими є низка інтродукційних популяцій в колекціях ботанічного саду і які сформовані за вузького діапазону еколого-фітоценотичних умов, життєвість як інтегральна ознака стану особин і популяції за головними параметрами, слугує важливим показником для визначення потенційної життєздатності і перспектив розвитку інтродукційних популяцій в урбанізованих екосистемах. Встановлення спрямованості багаторічної динаміки життєвості, відтак і стратегії популяції є оцінкою її життєздатності в довготривалій перспективі. Дослідження динамічності диференціальних ознак життєвості лежить в основі розуміння складних внутрішньопопуляційних механізмів (гетерогенності, екотипної диференціації, природного і штучного добору) життєздатності інтродукційних популяцій. Головними параметрами для встановлення життєвості популяції є її обсяг, вікова, віталітетна та статевая структури, чисельність, щільність, здатність до генеративного і вегетативного розмноження.

Вагомими показниками в забезпеченні віталітету рослин є площа життєвого простору (едасфера) і об'єм площі живлення (едатоп) дерева. Едасфера є фітогенним полем організму, яке впливає на прилегле довкілля, створюючи особливий мікроклімат і низку фізичних та хімічних полів. Нездорова конкуренція в межах едасфери не бажана для інтродукційних популяцій та вікових дерев. Аналогічні умови притаманні і для едатопа – сукупності чинників, створених ґрунтом і кореневими системами рослин.

За результатами оцінки віталітету деревних рослин по вулиці Райдужній в житловому районі Райдужний, який створено на наливних пісках в місті Києві встановлено, що 37,1% дерев мають дуже низький рівень життєвості - всихають або знаходяться в аварійному стані, 44, 7% дерев мають середню оцінку життєвості і тільки 18,2% особин мають високу життєвість. Отже за отриманими показниками – умови зростання є несприятливими. Подібні тенденції спостерігаються і в інших досліджуваних вуличних насадженнях. Проведено комплексне обстеження 28 вікових дерев-пам'яток природи. За результатами моніторингового дослідження

із застосуванням томографії зроблена оцінка життєвості, стабільності та життєздатності дерев. Всі дерева мають певні ушкодження та гнилі, тому серед них немає дерев першого класу життєвості.

В дослідженнях з оцінкою віталітету і життєздатності сформованих інтродукційних популяцій відмічено, що репродуктивний період у переважної більшості видів характеризується порушеннями фенологічних ритмів *Rhododendron luteum*, *R. molle subsp. japonicum*, *R. molle subsp. molle*, *R. smirnowii*. Раннє входження рослин в репродуктивну фазу, повторне квітування восени, прискорений розвиток рослин загалом свідчить про несприятливий перебіг їх онтогенезу в умовах *ex situ*. Це призводить до зниження віталітету та біологічного віку рослин. Життєздатність цих популяцій носить депресивний характер, а перспективи дуже обмежені. В інтродукційних популяціях, сформованих за вузького діапазону еколого-фітоценотичних умов, життєвість, як інтегральна ознака стану особин, слугує важливим показником для визначення потенційної життєздатності і перспектив розвитку інтродукційних популяцій в урбанізованих екосистемах. Дослідження динамічності диференціальних ознак життєвості лежить в основі розуміння складних внутрішньо популяційних механізмів (гетерогенності, екотипної диференціації, природного і штучного добору) життєздатності інтродукційних популяцій. Головними параметрами для встановлення життєздатності популяції є її обсяг, вікова, віталітетна та статева структури, чисельність, здатність до генеративного і вегетативного розмноження.

Проведено аналіз літературних джерел з історії створення районів закладених на наливних пісках Київського лівогобережжя. Більш ніж півстолітній досвід озеленення територій екотопів наливних пісків свідчить про неспроможність досягнення еколого-фітоценотичного оптимуму для рослин поточними методами (або їх відсутності). Разом з цим, природне заростання таких територій (але незабудованих) досить ефективне; рослини-піонери (сосна, береза, шельюга, осика) утворюють прості ценози з притаманною їм екологічною функцією. Цьому сприяє насіннєве розмноження місцевих видів, завдяки якому рослини формують потужну й адаптовану до ґрунтових умов кореневу систему й володіють широкою нормою реакції геному з притаманною сіянцям фізіологічною молодістю.

Висновки. В урбанізованих екосистемах налімість визначення санітарного стану доцільніше про-

водити індивідуальну оцінку життєвості деревних рослин. Життєвість (віталітет) рослин є поточною інтегральною характеристикою морфологічних реакцій організмів, їх адаптації в умовах мінливого середовища. Віталітет деревних рослин визначається візуально за п'ятибальною шкалою та окремо для трьох різних вікових станів рослин: прегенеративного (віргінільні рослини – молодість), генеративного (зрілість) та сенильного (старіння).

Життєздатність рослин є прогностичною оцінкою їх можливостей виконувати, притаманні рослинним організмам, екологічні, середовищеві та оздоровчі функції. Планування безпечного утримання дерев (зокрема вікових) здійснюється за результатами оцінки їх життєздатності.

Життєздатність інтродукційних популяцій, сформованих за вузького діапазону еколого-фітоценотичних умов, є підсумком оцінок індивідуальної життєвості організмів. Для визначення потенційної життєздатності і перспектив розвитку інтродукційних популяцій в урбанізованих екосистемах мають значення її обсяг, вікова, віталітетна та статева структури, чисельність, здатність до генеративного і вегетативного розмноження.

Моніторинг стану рослин в екотопах наливних пісків свідчить про перспективність природного заростання цих територій. Півстолітній досвід озеленення територій екотопів наливних пісків свідчить про неспроможність досягнення еколого-фітоценотичного оптимуму для рослин поточними методами (або їх відсутності). Разом з цим, природне заростання таких територій (але незабудованих) досить ефективне; рослини-піонери (сосна, береза, шельюга, осика) утворюють прості ценози з притаманною їм екологічною функцією. Цьому сприяє насіннєве розмноження місцевих видів, завдяки якому рослини формують потужну й адаптовану до ґрунтових умов кореневу систему й володіють широкою нормою реакції геному з притаманною сіянцям фізіологічною молодістю.

Перспективи використання результатів дослідження. Адекватна оцінка життєвого стану рослин в міських умовах сприяє кращому плануванню практичних заходів щодо диференційованого за екотопами асортименту рослин та оптимізації умов доквілля. Досягнення сталого розвитку урбоєкосистем Києва та оздоровлення життєвого простору людини можливе лише за умови функціонування зелених насаджень з високою життєвістю та життєздатністю окремих особин та інтродукційних популяцій.

Література

1. Категорії стану дерев. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/756-2016-%D0%BF#n9>.
2. Гнатів П.С. Функціональна діагностика в дендроекології : Наукова монографія. – Львів: В-во Камула, 2014. – 336 с.
3. Горелов О.М., Горелов О.О. Життєвість деревних рослин (визначення, критерії та оцінка). *Вісник Львівського університету*. Серія біологічна. 2017. Випуск 76. С. 105–111.
4. Кияк В.Г. Життєвість (віталітет) як інтегральний показник стану популяції у рослин. *Біологічні Студії / Studia Biologica* • 2014 • Том 8/№3–4 • С. 273–284.
5. Тишко-Хмеловец Пйотр. Основи біології, екології та біомеханіки дерев : Посібник для інспекторів стану дерев та арбористів / П. Тишко-Хмеловец : пер. з англ. О.В. Вакаренко та П. Тишко-Хмеловца. – Чернівці: Друк Арт, 2023, - 56 с.
6. Віткось-Гнах Каміль. Інспекція дерев. Посібник для інспекторів стану дерев – базовий рівень / К.Віткось-Гнах, Маріуш Криніцький, Беата Пахновська, Пйотр Тишко-Хмеловец, Зося Гагось. – Чернівці: Друк Арт, 2023. – 224с.

ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

УДК 574, 550.3:504 , 504:640.522.2:304:364.1

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.16>

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАКЛАДІВ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я ЯК ЧИННИК ЗМЕНШЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОГО СЛІДУ

Оліненченко Ю.О.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»
пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ
7232384@stud.kai.edu.ua

Наслідки зміни клімату, що з кожним роком відчуваються все сильніше по всьому світу, в поєднанні з енергетичними проблемами через військові дії в Україні, надали питанню енергоефективності закладів охорони здоров'я особливого значення як засобу збереження ресурсів та одночасно чинника зменшення вуглецевого сліду. Медичні заклади являються одними з найбільш енергоємних у сфері послуг, тому вони стали пріоритетом для урядів тих держав, які бажають підвищити енергоефективність даної галузі. Враховуючи критичний характер роботи лікарень і модель надання медичної допомоги (обслуговування 24 години на добу, 7 днів на тиждень), досягти скорочення енергоресурсів досить важко. Огляд міжнародної літератури свідчить, що підвищення енергоефективності закладів охорони здоров'я є складним процесом, який потребує подальших досліджень і відповідного інвестування, яке часто буває обмеженим, хоча в перспективі обертається значною вигодою. У даній роботі розглянуто можливості впровадження енергоефективних заходів як чинника зменшення вуглецевого сліду у медичних закладах при наявності менших або більш значних обсягів початкових інвестицій, що включають стратегії енергетичного моніторингу, модернізацію будівель, використання відновлюваних джерел енергії, збереження ресурсів.

Як приклад кроків по підвищенню енергоефективності наведено заходи, впроваджені у медичному центрі у місті Києві. Так, заміна люмінесцентних ламп на LED та заміна обладнання на енергоефективне дали 55% і 50% економії енергії відповідно. Відмова від спалювання вихлопного органічного палива і перехід на відновлювані джерела енергії для медичних закладів є найбільш сучасним і ефективним шляхом до зменшення карбонового сліду. В умовах України доцільно більше інвестувати в сонячну енергію. У проведених нами дослідженнях по моделюванню сонячних фотоелектричних систем для медичного центру показано прогнозоване зменшення вуглецевого сліду в залежності від кількості використаних панелей та особливостей їх розміщення, від 6 000 до 17 000 кг/рік CO₂. Розглянуті методи досягнення енергоефективності дозволяють медичним закладам зробити внесок у сталий розвиток в секторі охорони здоров'я. *Ключові слова:* вуглецевий слід, зміна клімату, енергоефективність, медичні заклади, відновлювана енергетика, сталий розвиток.

Energy efficiency of healthcare institutions as a factor for changing the carbon footprint. Olinechenko Yu.

The consequences of climate change, which are being felt more and more strongly around the world every year, combined with energy problems due to military operations in Ukraine, have given the issue of energy efficiency in healthcare facilities special importance as a factor in reducing the carbon footprint and at the same time conserving resources. Healthcare facilities are among the most energy-intensive service sectors, making them a priority for governments looking to improve energy efficiency in the sector. Given the critical nature of hospitals and the 24/7 healthcare delivery model, achieving energy savings is difficult. A review of international literature shows that increasing energy efficiency in healthcare facilities is a complex process that requires further research and appropriate investment, which is often limited, although in the long term it turns into a significant benefit. This paper examines the possibilities of implementing energy efficiency measures as a factor in reducing the carbon footprint in healthcare facilities with smaller or larger initial investments, including energy monitoring strategies, building modernization, use of renewable energy sources, resource conservation. As an example of steps to increase energy efficiency, measures implemented in a medical center in the city of Kyiv are given. Thus, replacing fluorescent lamps with LEDs and replacing equipment with energy-efficient ones yielded 55% and 50% energy savings, respectively. Refusing to burn fossil fuels and switching to renewable energy sources for medical institutions is the most modern and effective way to reduce their carbon footprint. In Ukraine, it is advisable to invest more in solar energy. Our research on modeling solar photovoltaic systems for a medical center shows a projected reduction in carbon footprint, depending on the number of panels used and the features of their placement, from 6,000 to 17,000 kg/year of CO₂. The considered methods for achieving energy efficiency allow healthcare institutions to contribute to sustainable development in the healthcare sector. *Key words:* carbon footprint, climate change, energy efficiency, healthcare facilities, renewable energy, sustainable development.

Постановка проблеми. Заклади охорони здоров'я, або медичні заклади (лікарні, поліклініки, медичні центри) – це об'єкти з високим енергоспоживанням, які потребують значної кількості електроенергії внаслідок специфіки своєї цілодобової діяль-

ності для освітлення, опалення, кондиціонування, систем охолодження, підігріву води тощо. Робота спеціалізованого медичного обладнання, яке необхідне для діагностики та забезпечення оптимальних результатів лікування (МРТ-сканери, КТ-сканери,

рентгенівські апарати), потребує також значних енерговитрат для безпечної та ефективної роботи. Необхідність суворого внутрішнього лікарняного екологічного контролю для безпеки персоналу та пацієнтів ще додатково збільшує споживання енергії. Підтримання оптимальної температури, рівня вологості, дезінфекційні заходи мають вирішальне значення для комфорту та запобігання поширенню інфекцій. На відміну від інших установ у сфері послуг, більшість медичних закладів працюють у режимі 24/7, який необхідний для забезпечення безперервного догляду за пацієнтами, але він значно збільшує споживання енергії. Від освітлення в численних палатах і операційних до живлення необхідного медичного обладнання, попит на надійну енергію є постійним і величезним. Таке масове споживання енергії в медичних установах сприяє збільшенню рівня забруднення навколишнього середовища та збільшенню вуглецевого сліду в атмосфері.

За оцінками різних авторів, сектор охорони здоров'я відповідальний за 5% -10% глобальних викидів, що викликають зміну клімату, тож необхідно діяти у напрямку зменшення такого впливу [1, 2]. Це можна зробити, крок за кроком, впровадженням заходів з енергоефективності та переходом на відновлювані джерела енергії. Впроваджуючи заходи з енергоефективності, ми будемо відповідати європейським практикам сталого розвитку у секторі охорони здоров'я, як зазначено у Директиві Європейського Союзу (ЄС/2023/1791) [3].

Актуальність дослідження. Наслідки зміни клімату, які ми спостерігаємо все в більшій мірі, в поєднанні з енергетичною кризою, що стала результатом повномасштабного вторгнення росії в Україну, дали новий поштовх збереженню енергетичних ресурсів та переходу на відновлювані джерела енергії. Швидке потепління, спричинене викидами парникових газів, має серйозні наслідки для громадського здоров'я, посилюючи серцево-судинні захворювання, пов'язані зі спекою, проблеми з диханням та поширенням інфекцій. Доводиться констатувати, що на даний час медичні заклади, які рятують людей від вищевказаних проблем, одночасно мають значний вуглецевий слід внаслідок їх енергоємної діяльності та переважного отримання енергії за рахунок спалювання викопного палива. За таких обставин потреба в покращенні енергоефективності в лікарнях стала ще більш актуальною.

Ставлячи у пріоритет енергоефективність, медичні заклади можуть значно зменшити викиди парникових газів, боротися зі змінами клімату, сприяти чистішому і здоровішому навколишньому середовищу. Крім екологічних міркувань, енергоефективні практики в охороні здоров'я мають позитивні економічні наслідки. Зниження витрат на енергію, ощадливе використання ресурсів і дотримання стандартів сталого розвитку покращують фінансовий стан медичних закладів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проводилося в рамках імплементації Європейського зеленого курсу в Україні, виконувалося в межах науково-дослідної теми кафедри екології Факультету екологічної безпеки, інженерії та технологій Державного університету «Київський авіаційний інститут» «Розробка та впровадження практик екологічного управління в медичній галузі» (Державний реєстраційний номер 0125U000196, дата реєстрації 10.01.2025). Дане дослідження є фрагментом дисертаційної роботи на здобуття ступеню доктора філософії (PhD) аспіранта кафедри екології Оліненченка Ю.О.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нагальна необхідність зменшення впливу на довкілля сфери охорони здоров'я становить значну дослідницьку зацікавленість. Вчені зосереджуються на енергоефективності медичних закладів і одночасному зменшенні викидів оксидів карбону та впливі, який вони створюють. Низка публікацій присвячена опису самої проблеми та її важливості, а також методів оцінки і зниження енерговитрат в секторі охорони здоров'я в різних країнах [1,2, 4-9]. Так, у США, де дослідження використання енергії є найбільш просунутими, наводяться наступні середні дані по енергоспоживанню у лікарнях [2]: опалення приміщень 29%, вентиляція 12%, медичне обладнання 11%, охолодження 11%, нагрівання води 11%, освітлення 9%, приготування їжі 7%, холодильна техніка 3%, комп'ютери 5%, офісне обладнання 2%. У Великій Британії галузь охорони здоров'я відповідальна щорічно за 18 млн т викидів CO₂, з яких 22%, за наведеними оцінками, припадає на використання енергії для опалення будівель [5]. Питанням переходу на відновлювані джерела енергії у медичній галузі та різним аспектам застосування сонячної енергії присвячено багато сучасних публікацій, з огляду на надзвичайну важливість декарбонізації для збереження клімату, сприятливого для життя на нашій планеті [13-21].

Виділення невирішених раніше частин проблеми, котрим присвячується означена стаття. В даній статті ми звернули увагу на розробку практичних поетапних кроків при впровадженні енергоефективних заходів, що мають кінцевим результатом не тільки економічний, а й екологічний сенс. Нашою метою є дослідження енергоефективності як чинника зменшення карбонового сліду, зменшення впливу медичних закладів на довкілля, що відповідає стратегії сталого розвитку.

Методологічне або загальнонаукове значення. Оптимізація енергоефективності в лікарнях і медичних закладах є першочерговим питанням у сфері енергозбереження. Модель сталого розвитку спрямована на те, щоб керівники закладів охорони здоров'я ефективно реалізовували стратегії, які мінімізують витрати лікарень, водночас дозволяючи ефективне та результативне

використання наявних ресурсів. Тому аналіз кращих міжнародних практик енергозбереження та зменшення впливу на довкілля у медичних закладах дає напрямок їх врахуванню і впровадженню в Україні. Розглянуті методи досягнення енергоефективності дозволяють медичним закладам робити внесок у підвищення сталого розвитку в секторі охорони здоров'я.

Викладення основного матеріалу. В Україні в даний час функціонує біля 1000 лікарень, без врахування інших медичних закладів. Переважна більшість з них побудовані в період з 1950 до 1990 роках та потребують капітального ремонту, а деякі з них знаходяться в аварійному стані. Як результат, рівень споживання енергоресурсів в 2-2,5 рази перевищує сучасні нормативи та умови в приміщеннях не завжди відповідають нормативним показникам. На опалення в нашому кліматі припадає біля 40% споживання енергії та 36% викидів парникових газів, тому енергетична модернізація будівель є пріоритетом по внеску в економію енергії і зменшення вуглецевого сліду, що показує і міжнародна практика [10, 11]. Доведено, що окрім залежності між споживанням енергії та кількістю користувачів медичних послуг, кількість енергії, яка щоденно використовується в лікарні, прямо корелює з розміром і дизайном лікарні. В цьому плані невеликі лікарні виявляються більш енергоефективними. Вважаємо доцільним мінімізувати кількість непотрібного простору всередині лікарняної будівлі, щоб зменшити споживання енергії. Ця мета може бути досягнута проєктувальниками будівель (або при реконструкції), зменшивши по можливості коридори та інші мало використовувані простори, на які припадає приблизно 20% енергоспоживання в медичних закладах.

Прагнення впровадити енергоефективні заходи часто обмежується фінансовими можливостями. Однак, необхідно робити поступові кроки у цьому напрямку. Шлях до енергоефективності не обов'язково вимагає значних інвестицій для отримання сут-

тєвих результатів. Медичні заклади можуть почати з простих, недорогих заходів, щоб зменшити споживання енергії. Наприклад, з виділених нами, які наведені у табл.1, що потребують невеликих обсягів інвестування. Стратегічне зосередження на недорогих заходах може значно покращити управління енергією. Наприклад, встановлення енергоефективного освітлення, такого як світлодіодні світильники, є яскравим прикладом скромних за обсягом інвестицій, але значних за ефектом. Ці освітлювальні рішення не тільки потребують менше енергії, але й мають довший термін використання, зменшуючи як загальні витрати, так і потреби в обслуговуванні.

Слід зауважити, що успіх на шляху до енергоефективності напряму залежить від усвідомлення колективом закладу засад сталого розвитку і відповідального ставлення до довкілля. Тому пропаганда енергозберігаючої поведінки серед персоналу та пацієнтів є культурним зрушенням в лікарняному середовищі. Такі заохочувальні дії, як вимкнення обладнання, що не використовується, та максимальне використання природного світла можуть допомогти зменшити споживання енергії. З іншого боку, управління енергоефективністю в організаціях охорони здоров'я потребує ретельного моніторингу з боку керівництва організації на всіх етапах: проведення аудиту, розроблення плану управління споживання енергії, моніторингу та оцінки енергоефективності на кожному етапі, а також аналізу тенденцій та вжиття відповідних коригувальних заходів.

При наявності фінансових можливостей заходи по підвищенню енергоефективності лікарняних закладів та зменшенню впливу на довкілля набувають масштабів; вони пропонуються у табл.2.

Як приклад кроків по підвищенню енергоефективності, наводимо заходи, впроваджені у медичному центрі у місті Києві (загальна площа 1000 м², загальне річне споживання електроенергії – 40000 кВт,

Таблиця 1

Заходи по підвищенню енергоефективності медичних закладів з невеликими обсягами інвестування

№	Заходи	Цілі	Досягнення
1	Проведення енергетичних аудитів	Визначення енергетично неефективних ланок. Оцінка ефективності обладнання, схем енергоспоживання	Висновки з аудиту забезпечують основу для розробки плану по енергоефективності
2	Проведення освітніх та рекламних заходів стосовно енергоефективності для персоналу та пацієнтів	Підвищення рівня екологічної свідомості	Практики ефективності демонструють прагнення медичного закладу до сталого розвитку та відповідальне ставлення до довкілля
3	Розроблення плану управління споживання енергії	Впровадження методів економії енергії, визначення перспектив та пріоритетів	Зменшення витрат, зменшення впливу на довкілля
4	Оптимізація освітлення	Впровадження світлодіодного освітлення, датчиків руху та регуляторів світла	Комфортне світлове середовище при економії ресурсів
5	Моніторинг та оцінка енергоефективності на кожному етапі	Застосування систем вимірювання витрат енергії	Аналіз тенденцій та вжиття коригувальних заходів

річне споживання води – 600 м³), (табл. 3). Як видно з даних таблиці, вони дали значний ефект енергозбереження. Для цього медичного центру нами були проведені також дослідження по перспективності впровадження дахової сонячної фотоелектричної системи. Робота виконувалася із застосуванням сучасного програмного забезпечення PV-Sol Premium 2025 [12].

Відмова від спалювання викопного органічного палива і перехід на відновлювані джерела енергії для медичних закладів є найбільш сучасним і ефективним шляхом до зменшення карбонового сліду [13-20]. Незалежність від мереж постачання, значна економія фінансів у перспективі, можливість масштабування при потребі і збільшенні ресурсів є незаперечними перевагами і аргументами для інвестування у такі проекти. Використання додатково систем накопичення

енергії, акумуляторів, надають можливість зберігання надлишків енергії, що підвищує стійкість лікарень і забезпечують резервне живлення під час відключень. У проведених нами дослідженнях по моделюванню сонячних фотоелектричних систем для медичного центру показано прогнозоване зменшення вуглецевого сліду в залежності від кількості використаних панелей, загальної площі та особливостей їх розміщення (табл. 4). У розрахунках використовувались характеристики сонячних фотоелектричних панелей JA Solar Holdings Co., Ltd. – AM72S30-550/MR Vertical.

Разом всі наведені заходи підкреслюють важливість енергоефективного менеджменту в медичних закладах, узгоджуючи його з ширшими цілями економії коштів, покращення надання медичних послуг та сприяння практикам сталого розвитку.

Таблиця 2

**Заходи по підвищенню енергоефективності медичних закладів,
що потребують значних обсягів інвестування**

№	Заходи	Цілі	Досягнення
1	Проектування, модернізація та реконструкція будівель відповідно сучасних технологій для підвищення енергоефективності	Зменшення енергетичних та теплових втрат	Значна економія ресурсів, підвищення комфортності та зменшення впливу на довкілля
2	Впровадження джерел відновлювальної енергії: сонячні батареї, геотермальні системи, біогазові установки	Енергонезалежність від мереж, цілодобове стабільне забезпечення електроенергією, можливість за потреби масштабування систем	Радикальне зменшення викидів парникових газів, декарбонізація, економія ресурсів
3	Оновлення енергоємного обладнання: заміна застарілого енергоефективними альтернативами	Досягнення вищого рівня ефективності при зменшенні енерговитрат	Покращення роботи, економія ресурсів та зменшення впливу на довкілля.
4	Оптимізація систем опалення, вентиляції, охолодження.	Зменшення значного споживання енергії для кондиціонування повітря	Більш комфортне середовище, значна економія ресурсів, зменшення впливу на довкілля

Таблиця 3

Реалізація заходів по підвищенню енергоефективності медичного центру (м. Київ)

№	Заходи	До змін	Після змін	% Економії/ заощадження
1	Заміна люмінесцентних ламп на LED	18000 кВт/рік	7800 кВт/рік	55
2	Заміна водяних бойлерів (із 80л на 50л)	2400 кВт/рік	1700 кВт/рік	30
3	Заміна холодильного обладнання на новітнє та енергоефективніше	1800 кВт/рік	900 кВт/рік	50
4	Встановлення безконтактних сенсорних змішувачів води	600 м ³ /рік	420 м ³ /рік	30

Таблиця 4

**Зменшення вуглецевого сліду при впровадженні фотоелектричних сонячних систем
у медичному закладі**

№	Кількість панелей	Загальна площа панелей, м ²	Загальна потужність панелей, кВт	Загальна річна генерація, кВт·год на рік	Зменшення викидів CO ₂ , кг на рік	Частка задоволення енергетичних потреб, %
1	30	77,5	16,5	14650	6140	35,4
2	94	242,8	51,7	38930	16271	48,6
3	104	268,7	57,2	41366	17076	73,3

Головні висновки. З екологічної та енергетичної точки зору закладам охорони здоров'я необхідно розглянути можливість реконструкції будівель, щоб вони відповідали стандартам енергоефективного будівництва. Рекомендується зменшити непотрібні простори всередині будівель лікарень, щоб зменшити споживання електроенергії. Окрім того, постійний енергетичний менеджмент у лікарнях є важливим фактором, оскільки неефективне управління призводить до збільшення ресурсних витрат та негативного впливу на довкілля.

Політика збереження навколишнього середовища за допомогою впровадження відновлюваних джерел

енергії на сьогодні є найбільш радикальним способом зменшення карбонового сліду, тому доцільно більше інвестувати в сонячну енергію. Перехід до енергоефективності в закладах охорони здоров'я є очевидним безпрограшним рішенням, оскільки економія коштів поєднується з екологічними перевагами зменшення вуглецевого сліду.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропоновані підходи до вирішення проблем енергоефективності та зменшення впливу на довкілля, отримані на основі власних досліджень та аналізу сучасної наукової літератури, планується пропагувати та впроваджувати в медичних закладах України.

Література

1. Hough E., Cohen Tanugi-Carresse A. Supporting Decarbonization of Health Systems – A Review of International Policy and Practice on Health Care and Climate Change. *Curr Environ Health Rep.* 2024 Feb 15;11(2):266–278. doi: 10.1007/s40572-024-00434-x
2. Pichler, P.-P.; Jaccard, I.S.; Weisz, U.; Weisz, H. International comparison of health care carbon footprints. *Environ. Res. Lett.* 2019, 14, 064004. [Google Scholar] [CrossRef]
3. European Union Energy Efficiency Directive (EU/2023/1791).
4. Dion H., Evans M., Farrell, P. (2023), Hospitals management transformative initiatives; towards energy efficiency and environmental sustainability in healthcare facilities, „Journal of Engineering, Design and Technology, Vol. 21 No. 2, s. 552–584. <https://doi.org/10.1108/JEDT-04-2022-0200>.
5. Jie Dong, Amr Hamada, Meysam Akbari Paydar, Nishesh Jain, Nick Macdonald Smith, Esfandiar Burman Identifying decarbonization pathways for primary healthcare buildings using energy certificate models in England and Wales. *Building and Environment.* V. 274, 2025, 112794.
6. Tomanek Michał, 2024, Energy Efficiency in Hospitals – towards Sustainable Healthcare, „Builder” 03 (320). DOI: 10.5604/01.3001.0054.3461
7. Salas, R.N.; Maibach, E.; Pencheon, D.; Watts, N.; Frumkin, H. A pathway to net zero emissions for healthcare. *BMJ* 2020, 371, m3785. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Alotaiby Rana, Krenyacz Eva Energy efficiency in healthcare institutions, *Society and Economy*, V.45, Issue 4, 2023. – P.495-511.
9. Psillaki M., Apostolopoulos N., Makris I., Liargovas P., Apostolopoulos S., Dimitrakopoulos P., Sklias G., Hospitals' Energy Efficiency in the Perspective of Saving Resources and Providing Quality Services through Technological Options: A Systematic Literature Review, *Energies* 2023, 16(2), 755; <https://doi.org/10.3390/en16020755>
10. Borges de Oliveira K., Ferro dos Santos E., Faria Neto A., de Mello Santos V., José de Oliveira O., Guidelines for efficient and sustainable energy management in hospital buildings, „Journal of Cleaner Production”, Vol. 329, 20 (December 2021).
11. Papadopoulos A.M., Energy Efficiency in Hospitals: Historical Development, Trends and Perspectives, *Energy Performance of Buildings*, s. 217–233, Springer (2016).
12. PV*SOL Premium: https://PV*SOL.software/en/
13. Відновлювані джерела енергії. За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
14. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: Матеріали XXV міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 22–24 травня 2024 р.). К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України. 2024. 545 с. (С. 197–288). <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024>.
15. Soto E.A., Hernandez-Guzman A., Vizcarrondo-Ortega A., McNealey A., Hernandez-Guzman A., Vizcarrondo-Ortega A., McNealey A., Bosman L. A. Solar Energy Implementation for Health-Care Facilities in Developing and Underdeveloped Countries: Overview, Opportunities, and Challenges. *Energies.* 2022, 15(22), 8602; <https://doi.org/10.3390/en15228602>
16. Noorollahi, Y.; Golshanfard, A.; Ansaripour, S.; Khaleedi, A.; Shadi, M. Solar energy for sustainable heating and cooling energy system planning in arid climates. *Energy.* 2021, 218, 119421. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Shafqat Mughal, Yog Raj Sood, R.K. Jarial. A Review on Solar Photovoltaic Technology and Future Trends. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology.* Volume 4, Issue 1, April 2018. ISSN: 2456-3307
18. Sevda Kuşkaya, Faik Bilgili, Erhan Muğaloğlu, Kamran Khan, Mohammad Enamul Hoque, Nurhan Toguç The role of solar energy usage in environmental sustainability: Fresh evidence through time-frequency/Renewable Energy, V. 206, April 2023, P. 858-871.
19. Herrando, M., Pantaleo, A. M., Wang, K., & Markides, C. N. (2019). Solar combined cooling, heating and power systems based on hybrid PVT, PV or solar-thermal collectors for building applications. *Renewable Energy.* doi:10.1016/j.renene.2019.05.004
20. Kazem H.A., Chaichan M.T., Al-Waeli A. H. A., Gholami A. A systematic review of solar photovoltaic energy systems design modelling, algorithms, and software. *Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.* V. 44, Issue 3, 2022. – P. 6709-6736.
21. Tomson Ch., Reducing the carbon footprint of hospital-based care, „Future Hospital”, 57–62, (February 2015).

ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ

УДК 504.064

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.17>

ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ДЛЯ УПРАВЛІННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯМ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ НАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДНОГО ПАРКУ «СИНЬОГОРА»

Барабаш О.В., Тарасюк М.В.

Національний транспортний університет
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 02000, Київ
barabashelena29@gmail.com, nikolaytarasuik@gmail.com

Національний природний парк «Синьогора» є природоохоронною, рекреаційною, культурно-освітньою, науково-дослідною установою загальнодержавного значення і входить до складу природно-заповідного фонду України. Ідентифікація на території парку природних оселищ, які є осередками збереження видів, що охороняються законами України, є особливо актуальною через певну вирівняність структури оселищ парку – майже на 90 відсотків його території це лісові екосистеми і більше 50% – природні оселища. Відповідно до проведених досліджень рослинний світ НПП «Синьогора» налічує 380 вищих судинних рослин та 24 рослинних угруповання. Основними рідкісними рослинними асоціаціями є угруповання, пов'язані з домінуванням сосни кедрової європейської (*Pinus cembra* L.) та сосни гірської (*Pinus mugo* Turra). За результатами досліджень 2024 року встановлено, що найбільш поширеним природним оселищем НПП «Синьогора» є Карпатські ялицево-буково-ялинові ліси і ялицево-ялинові ліси. Для дослідження було використано дані інвентаризації лісів та відомості щодо складу біомів, утворених головними видами дерев, та їх рівень зустрічей у лісництвах: Сивульське, Межирицьке, Дуплянське, які знаходяться на території НПП «Синьогора». Розглянуто складність та внутрішнє різноманіття лісових систем лісгоспів НПП «Синьогора». За індексом Шеннона визначено, що ліси Дуплянського лісництва відзначаються найбільшим стресом, який може бути пов'язаний як із негативним антропогенним, так і природним впливами. Визначено показники біорізноманіття та видового багатства лісових екосистем НПП «Синьогора», які демонструють переважання у лісовому масиві Дуплянського лісництва дерев-едифікаторів, які витісняють інші види і формують лісову моносистему. Керівництву НПП «Синьогора» запропоновано використовувати додаткові сучасні технології захисту навколишнього середовища до плану управління лісами. *Ключові слова:* лісові екосистеми, управління лісами, природно-заповідний фонд, інвентаризація лісів, лісовідновлення, кліматичні зміни.

Environmental protection technologies for biodiversity management of forest ecosystems of the Syniohora National Nature Park. Barabash O., Tarasuik M.

The Syniohora National Nature Park is a nature conservation, recreational, cultural, educational, scientific and research institution of national importance and is part of the nature reserve fund of Ukraine. Identification of natural habitats on the territory of the park, which are centers of conservation of species protected by the laws of Ukraine, is especially relevant due to a certain leveling of the structure of the park's habitats – almost 90 percent of its territory is forest ecosystems and more than 50% – natural habitats. According to the conducted studies, the flora of the Syniohora National Nature Park includes 380 higher vascular plants and 24 plant groups. The main rare plant associations are groups associated with the dominance of European cedar pine (*Pinus cembra* L.) and mountain pine (*Pinus mugo* Turra). According to the results of the 2024 research, it was established that the most common natural habitat of the Syniohora National Park is the Carpathian fir-beech-spruce forests and fir-spruce forests. The study used forest inventory data and information on the composition of biomes formed by the main tree species and their level of occurrence in the forestry: Syvulske, Mezhyritske, Duplyanske, which are located on the territory of the Syniohora National Park. The complexity and internal diversity of the forest systems of the forest farms of the Syniohora National Park were considered. According to the Shannon index, it was determined that the forests of the Duplyanske forestry are characterized by the greatest stress, which can be associated with both negative anthropogenic and natural influences. The indicators of biodiversity and species richness of forest ecosystems of the Syniohora National Park were determined, which demonstrate the predominance of edifier trees in the forest massif of the Duplyansky forestry, which displace other species and form a forest monosystem. The obtained data should be used for mapping the territory of the Syniohora National Park. The management of the Syniohora National Park was suggested to use additional modern environmental protection technologies in the forest management plan. *Key words:* forest ecosystems, forest management, nature reserve fund, forest inventory, forest restoration, climate change.

Постановка проблеми. Карпатські ліси сприяють екосистемній функціональності ландшафтів. Вони зберігають та поглинають вуглець, що дає змогу запобігати тимчасовому перевантаженню та

охолодженню мікроклімату лісів та клімату території Карпатського регіону. Ліси Карпат забезпечують ряд пов'язаних між собою екосистемних функцій, серед яких необхідно відзначити такі, як регулю-

вання водного режиму, очищення повітря, збереження біорізноманіття, охоронну функцію ґрунтів та забезпечення ресурсами.

Однією з проблем Карпатського регіону є фрагментація лісів. Фрагментація лісів – це процес поділу цілісної лісової території на менші, відокремлені ділянки, або фрагменти, внаслідок антропогенної діяльності та природних стихійних явищ – вирубка, будівництво доріг, лісові пожежі. Фрагментація лісів становить загрозу для багатьох організмів та знижує рівновагу екосистеми, що особливо актуально в умовах кліматичної кризи. Тому, моніторинг біорізноманіття лісових екосистем дасть змогу коригувати та формувати систему сучасних технологій для захисту природоохоронних територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Охорона природи є соціальною діяльністю, тому дослідження про підходи до управління, відновлення та консервацію лісів займають центральне місце у публікаціях багатьох учених. Було прогнозовано зв'язок між споживанням деревини в Німеччині та втратою чотирьох таксонів амфібій, рептилій, птахів та ссавців у регіонах, де видобувається круглий ліс. За допомогою Eciobase був розрахований деревний слід споживання в Німеччині еквівалентів круглого лісу [1]. Вивчення екологічного сліду Київської та Дніпропетровської областей України дало змогу виявити негативні тенденції у споживанні деревини та її використанні [2], а також оцінити необхідність визначення забруднення атмосферного повітря методом дендроіндикації [3]. Використання моделей взаємозв'язку видів та територій сільської місцевості (cSAR) дозволяє оцінити та спрогнозувати втрату видового багатства земноводних та плазунів порівняно з їх природним еталонним станом [4, 5]. Відкриття нових можливостей для управління лісами дало змогу використовувати порогові значення багатовимірної аналізу таксонів-індикаторів (TITAN). Таким чином вдалося оцінити реакції угруповань диких тварин на порушення лісів [6], проаналізувати сучасний стан лісових ресурсів у контексті сталого розвитку [7]. Для успішного вирішення питань у сфері охорони природних ресурсів та природних екосистем використовується методологія Q. Вона дозволяє з'ясувати думку зацікавлених сторін про проблему конфліктів між людиною, промисловою діяльністю та довкіллям [8, 9, 10], управління видами, що знаходяться під загрозою зникнення, або про стратегію в природоохоронній організації [11, 12]. Багато досліджень підтверджують, що втрата біорізноманіття пропорційна глобальним змінам клімату [13]. Планування управління лісами необхідне для створення програм та проєктів, які б об'єднували екологічні, економічні та соціальні аспекти управління лісами [14]. Це дозволить правильно застосовувати інструменти сталого лісокористування. Такі програми дадуть змогу розглядати ліс не лише як деревину, але як необхідний аспект збереження біорізноманіття [15]. Важливими

питання є не лише шляхи природного відновлення природи, а й актуальний критичний погляд на регулювання законодавчої бази для досягнення глобальних цілей сталого розвитку до 2030 року, виходячи з того, що держави не змогли виконати цільові завдання щодо збереження біорізноманіття, прийняті в Аїті [16]. Тому, багато досліджень присвячені оцінюванню біорізноманіття видів нижчих рослин і безхребетних тварин за допомогою видового індексу придатності середовища проживання. За допомогою моделювання впливів управління лісами та зміни клімату на придатність їх середовища проживання були визначені «види-переможці» та «переможені» [17]. За допомогою просторово-часових супутникових індексів та розширеного індексу рослинності (EVI) були визначені загрози біорізноманіттю лісів, серед яких основну роль відіграє надмірна мінливість клімату [18]. Дослідження щодо відновлення лісів після лісових пожеж проводяться для створення дискретних карт склад рослинних угруповань. Запропонований підхід є ефективним, оскільки дає змогу оцінити цілі відновлення та покращити стратегії адаптивного управління лісами [19, 20]. Загальні питання управління лісами та гострі дискусійні суперечки щодо управління лісовими пожежами та відновленням лісів піднімаються у правовому полі для встановлення ролі політичних наративів у цивільному захисті, захисті навколишнього середовища та для вивчення можливостей ліквідації наслідків стихійних лих [21, 22].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Отже, надзвичайно актуальним питанням в умовах сьогодення і таким, що потребує подальших досліджень є моніторинг біорізноманіття лісів, особливо в межах об'єктів природно-заповідного фонду, що стане інструментом для розроблення ефективних методів та підходів управління лісами.

Наукова новизна. Вперше проведено моніторинг біорізноманіття лісових екосистем НПП «Синьогора».

Виклад основного матеріалу. Національний природний парк «Синьогора» (Парк), площею 10866 га розташований у центральній і найвищій частині гірського масиву Горгани Українських Карпат. Територія Парку являє собою єдиний суцільний масив верхів'я басейну ріки Бистриця Солотвинська і знаходиться в межах висот від 660 до 1837 м над рівнем моря. В межах НПП «Синьогора», розташовані найвищі вершини Горгани: Сивуля Велика (1837 м), Сивуля Мала (1808 м), Ігровець (1804 м), Висока (1803 м). Територія Парку є слабо вивченою та потребує ретельних наукових досліджень.

На території НПП «Синьогора», високогір'я Українських Карпат представлене трьома поясами рослинності: високогірні ялинові та гірськососнові ліси; субальпійські луки з участю вільхи зеленої та альпійські пустощі.

За даними лісовпорядкування 2024 року в НПП «Синьогора» ідентифіковано 28 типів лісу. Загальна

Таблиця 1

Частка покриття основних деревоутворюючих порід на території НПП «Синьогора» за лісництвами

	Сивульське лісництво, %	Межиріцьке лісництво, %	Дуплянське лісництво, %
Бук	18,5442	31,1465	27,4677
Ялиця	20,3473	17,8197	3,2444
Ялина	30,1561	18,3968	44,4463
Сосна	22,3385	10,1484	7,4236
Явір	0,4686	0,0978	0,0249
Дуб	0,2265	0,0054	0,0000
Горобина	0,0538	0,0000	0,0000
Береза	7,8599	22,3728	17,2224
Індекс Шеннона	2,27	2,25	1,91

площа високогір'я в парку складає 3224 га, тобто майже третина всієї території. Домінують у високогір'ї парку два типи лісових екосистем: вологий кедрово-мережковий субір – 745,8 га (23 %); волога чиста сушечина – 686,7 га (21 %).

Основною метою дослідження є демонстрація можливих варіантів моніторингу та оцінки біорізноманіття лісової екосистемної групи і її біому, склад якого практично є постійним. Дослідження базуються на даних отриманих із «Літопис природи Національного парку «Синьогора» (2024 рік). За результатами досліджень 2024 року на території НПП «Синьогора» найбільш поширеним природним оселищем парку є Карпатські ялицево-буково-ялинові ліси і ялицево-ялинові ліси. Також були використані дані щодо складу біомів, утворених головними видами дерев, та їх рівень зустрічей. Дані були опрацьовані за показниками наданими лісництвами: Сивульське, Межиріцьке, Дуплянське, які функціонують на території НПП «Синьогора» (рис. 1, табл. 1).

Розрахунки проводили для видів лісових угруповань (біомів) лісництв Парку. Сумарний індекс кожного лісгоспу визначали як суму індексів біомів, властивих для даної території. Для кожного лісгоспу визначали середню величину індексу Шеннона. Для розрахунків була використана формула (1).

$$H' = -\sum_i p(i) \cdot \log p(i). \quad (1)$$

де p – вірогідність кожного виду лісового біому, i – індекс цього виду.

Вважається, що під час вибірки 102, індекс Шеннона не перевищує значення 3,5, за умови, що ентропія дорівнює нулю, тобто територія обстежена повністю.

Під час оцінки біорізноманіття, індекс Шеннона показує середній мінімальний таксономічний код лісгоспів, які входять до складу НПП «Синьогора». Отримані дані доцільно використовувати для картографування території НПП «Синьогора».

Встановлено, що складність та внутрішнє різноманіття лісових систем лісгоспів НПП «Синьогора» в певній мірі відрізняється. Визначено, що за показником H' ліси Дуплянського лісництва відзначаються найбільшим стресом, який може бути наслідком як негативних антропогенних, так і природних впливів. Також показники біорізноманіття та видового багатства наочно демонструють переважання у лісовому масиві Дуплянського лісництва дерев-ефікаторів, які витісняють інші види і формують лісову моносистему. Така ситуація призведе, в тому числі до змін у біорізноманітті тварин цього лісового масиву. Види будуть шукати комфортніші місця для проживання через зміну умов, які погіршують їх етапи життя, наприклад такі, як сплячка, вихід зі сплячки, полювання, розмноження, шлюбний період, переміщення до місць розмноження, полювання та ін. Таким чином відбудеться порушення екосистемних зв'язків, що призведе до формування нової екосистеми.

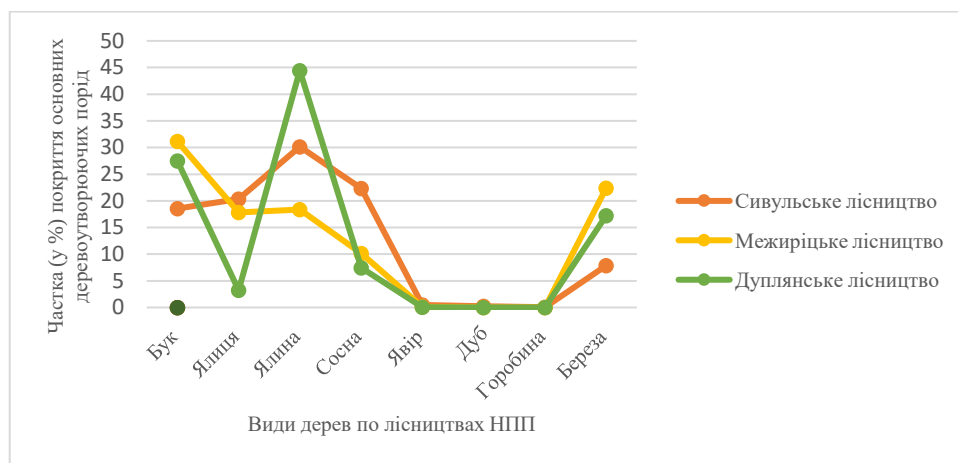


Рис. 1. Лісові біоми лісництв НПП «Синьогора»

Тому, Дуплянське лісництво НПП «Синьогора» потребує ретельно виважених управлінських рішень внесених у екологічний менеджмент-план. Для цього доцільно проводити комплексні дослідження системи «ліс-тварини», що дасть змогу отримати достовірні дані щодо стану лісової екосистемної групи Парку.

Висновки. Результати, наведені у дослідженні, дають наближену оцінку значень індексів біорізноманіття щодо лісової частини території НПП «Синьогора». За результатами дослідження пропонуємо керівництву НПП «Синьогора» внести до плану управління лісами такі заходи: – проведення коротко- та довгострокового моніторингу лісових масивів; – для збору даних і досліджень території НПП «Синьогора» використовувати засоби цифрової фіксації в програмі SMART, відео-фіксацію; – сформувати загальну базу лісів Парку з даних баз лісництв; – розробити аналітично-інформаційне програмне забезпечення для створення бази даних стану видів дерев та видів дерев-ефікаторів Парку; – висаджувати саджанці дерев і залучати громадськість. Для цього доцільно розробити свій бренд (до прикладу: «Учасник відновлення лісу «Синьогори»); – розробити чат-бот (до прикладу: «Синьогора – назавжди»), який дасть змогу отримувати громадськості якомога більше інформації

про стан природних ресурсів, видів рослин і тварин, цікаві місця, екскурсійні маршрути, місця відпочинку; – ведення календаря природи для виявлення кліматичних змін і їх впливу на стан лісів; – проведення освітньої та роз'яснювальної роботи для населення, що проживає поблизу Парку про наслідки зменшення площі лісів; – чіткий графік проведення зустрічей для коригування екологічного менеджмент-плану Парку.

Перспективи використання результатів дослідження. Дослідження дає змогу визначити стан лісових екосистем Карпатського регіону для формування ряду заходів щодо усунення фрагментації лісів для покращення умов життєдіяльності тваринних та рослинних угруповань Парку.

Тому, подальші дослідження будуть пов'язані із оцінкою таксономічного складу, біорізноманіття та видового багатства угруповань тварин НПП «Синьогора» для впровадження заходів з покращення управління парком. Дослідження буде проводитись відповідно до плану наукових досліджень кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного транспортного університету і є складовою НДР «Комплексний підхід до відновлення України на засадах сталого розвитку», № держреєстрації 0125U001993 (02.04.2025 р.).

Література

1. Egenolf V., Schüngel J., Bringezu S., Schaldach R. The impact of the German timber footprint on potential species loss in supply regions. *Science of The Total Environment*. 2023. 901. doi:10.1016/j.scitotenv.2023.165897.
2. Барабаш О.В., Вознюк Я.Ю. Екологічний слід як індикатор природного капіталу екосистем. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2018. № 1(20). С. 109–114
3. Барабаш О.В. Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря методом дендроіндикації. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. Вип. 4 (27). 2019. С. 102–108. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-4-27-14>
4. Барабаш О.В. Екологія земноводних та плазунів Опілля : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. біол. наук : спец. 03.00.16 «екологія» / О. В. Барабаш. – пЧернівці, 2002. – 20 с.
5. Барабаш О.В., Стецула Н.О. Вертикальне поширення мишоподібних гризунів у біотопах лісництв національного природного парку «Сколівські Бескиди». *Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту ім. В. Гнатюка. Серія Біологія*, 2007. № 1 (31). С. 55–59.
6. Brown G.S., DeWitt P.D., Dawson N., Landriault L. Threshold responses in wildlife communities and evidence for biodiversity indicators of sustainable resource management. *Ecological Indicators*. 2021. 133. doi:10.1016/j.ecolind.2021.108371
7. Пацева І.Г., Барабаш О.В., Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацев І. С. Аналіз сучасного стану лісових ресурсів у контексті сталого розвитку. *Збірника наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2023. № 4 (493). С. 205–211. DOI [https://doi.org/10.15589/znpp2023.4\(493\).27](https://doi.org/10.15589/znpp2023.4(493).27)
8. Zabala A., Sandbrook C. Mukherjee N. When and how to use Q methodology to understand perspectives in conservation research. *Conservation Biology*. 2018. 32. P. 1185–1194. doi:10.1111/cobi.13123
9. Барабаш О.В. Наукові основи застосування методів біотестування та біоіндикації в системах управління екологічною безпекою суб'єктів господарювання : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 ; Держ. екол. акад. післядиплом. освіти та упр. Київ, 2020. 38 с
10. Barabash O.V. Ecological hazard assessment of the atmospheric air at the urban ecosystem by the state of the deposit environment. *Proceedings of the National Aviation University*. 2019. 81(4). P. 57–63. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.81.14602>.
11. Barabash O., Weigang G. Mathematical Modeling of the Summarizing Index for the Biosystems Status as a Tool to Control the Functioning of the Environmental Management System at Business Entities. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020)*. 2021. 1265. P. 56–66. DOI:10.1007/978-3-030-58124-4_6
12. Barabash O., Weigang G., Dychko A., Belokon K., Zhelnovach G. Modeling a Set of Management Approaches for the Effective Operation of the Environmental Management System at the Business Entities. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2021. 22(6):P. 1–10. DOI:10.12912/27197050/141895
13. Habibullah S., Din B.H., Tan S H. Impact of climate change on biodiversity loss: global evidence. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. 29. P. 1073–1086. doi:10.1007/s11356-021-15702-8

14. Barabash O., Khrutba O., Pokshevnytska T., Tarasiuk M. The Realisation of Sustainable Development Goals Through the Implementation of International Environmental Projects with the Implementation of Transport Infrastructure Solutions. In: Slavinska, O., Danchuk, V., Kunytska, O., Hulchak, O. (eds) Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort. ITSESQC 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1335. Springer, Cham., 2025, p.14-28 https://doi.org/10.1007/978-3-031-87376-8_2
15. van Hensbergen H., Shono K., Cedergren J. A guide to multiple-use forest management planning for small and medium forest enterprises. *Forestry Working Paper*. 2023. 39. doi:10.4060/cc6780en
16. Ibisch P.L. EU policies undermine environmental targets. *Science*. 2023. 382 (6676). P. 1253-1255. doi: 10.1126/science.adm8856
17. Ekman E., Triviño M., Blattert C. Disentangling the effects of management and climate change on habitat suitability for saproxylic species in boreal forests. *Journal of Forestry Research*. 2024. 35, 34. doi:10.1007/s11676-023-01678-3
18. Peri P. L., Gaitán J., Mastrangelo M. Soil organic carbon stocks in native forest of Argentina: a useful surrogate for mitigation and conservation planning under climate variability. *Ecological Processes*. 2024. 13. doi:10.1186/s13717-023-00474-5
19. Nuijten R. J.G. C., Coops N., Theberge D., Prescott C. E. Estimation of fine-scale vegetation distribution information from RPAS-generated imagery and structure to aid restoration monitoring. *Science of Remote Sensing*. 2024. 9. doi:10.1016/j.srs.2023.100114.
20. 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>
21. Tietze N., Lars G., Ibisch P. L. Policy narratives in forest fire management. *Environmental Research Letters*. 2023. 18 (11). doi:10.1088/1748-9326/acf6d2
22. Mann D., Gohr C., Blumröder J. S., Ibisch P. L. Does fragmentation contribute to the forest crisis in Germany? *Frontiers in Forests and Global Change*. 2023. 6. doi:10.3389/ffgc.2023.1099460

УДК 551.4:551.435:551.58:528.9(477.87)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.18>

ЛАНДШАФТНО-ГЕОМОРФОЛОГІЧНІ ЗМІНИ В КАРПАТАХ ПІД ВПЛИВОМ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ПОГОДНИХ УМОВ: ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ АКТИВІЗАЦІЇ ЗСУВНИХ ПРОЦЕСІВ (2010-2023 РР).

Бігун М.В.

Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 79000, м. Львів
nikolai852741@gmail.com

У представлений статті основна увага приділяється аналізу даних, які вказують на активність зсувних процесів в Українських Карпатах за період 2010-2023 рр. Особлива увага приділена даним, що стосуються територій, які належать до Передкарпатського прогину. Проведено збір даних про активність зсувів, кількість та розмір зсувних ділянок на території таких адміністративних областей як Чернівецька, Івано-Франківська та Львівська. Описано також дані щодо частоти виникнення на даній території екстремальних погодних явищ, таких як сильні дощі, шквали, снігові бурі, спеки.

Встановлено взаємозв'язок між частотою та інтенсивністю виникнення зсувних явищ у досліджуваному регіоні з частотою виникнення екстремальних метеоумов. Зібрано та проаналізовано дані про особливо зсувонебезпечні райони досліджуваної території. Також виявлено, що активізації зсувних процесів сприяє нераціональне ведення сільського та лісового господарства. За сукупністю впливу ландшафтно-геоморфологічних, тектонічних, геологічних та господарчих факторів найбільш зсувонебезпечним районом Передкарпатського прогину визнано території, які відносяться до Чернівецької та Івано-Франківської областей.

Для запобігання зсувним явищам необхідно впроваджувати новітні методи їх прогнозування, які засновані на зборі та аналізі інформації за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) та методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Ці методи дозволяють швидко та якісно збирати та аналізувати дані зі зсувних ділянок, що свідчать про їх активізацію, а також прогнозувати настання та інтенсивність екстремальних метеоумов для досліджуваної території, що створює всі передумови для своєчасного реагування на загрозу зсувів та інших небезпечних явищ. Важливо також приймати законодавчі акти у сфері охорони довкілля, які б дозволяли регулювати ведення сільського та лісового господарств з дотриманням екологічних норм та правил. *Ключові слова:* ландшафтно-геоморфологічні зміни, Українські Карпати, Передкарпатський прогин, зсуви, екстремальні погодні умови, ГІС, ДЗЗ.

Landscape and geomorphological changes in the Carpathians under the influence of extreme weather conditions: spatial analysis of landslide activation (2010–2023). Bihun M.

The presented article focuses on the analysis of data indicating the activity of landslide processes in the Ukrainian Carpathians during the period from 2010 to 2023. Particular attention is paid to data concerning territories that belong to the Precarpathian Depression. Data collection was conducted regarding landslide activity, the number and size of landslide-affected areas within the administrative regions of Chernivtsi, Ivano-Frankivsk, and Lviv. The article also describes data on the frequency of extreme weather events in the region, such as heavy rainfall, squalls, snowstorms, and heatwaves.

A correlation was established between the frequency and intensity of landslide occurrences in the studied region and the occurrence of extreme meteorological conditions. Data were collected and analyzed concerning areas of particularly high landslide risk within the studied territory. It was also found that the activation of landslide processes is facilitated by irrational agricultural and forestry practices. Based on the combined impact of landscape-geomorphological, tectonic, geological, and anthropogenic factors, the most landslide-prone areas of the Precarpathian Depression are located in the Chernivtsi and Ivano-Frankivsk regions.

To prevent landslide events, it is necessary to implement advanced forecasting methods based on the collection and analysis of information using Geographic Information Systems (GIS) and remote sensing (RS) technologies. These methods allow for the rapid and accurate collection and analysis of data from landslide-prone areas, indicating their activation, as well as predicting the occurrence and intensity of extreme weather conditions for the studied territory. This creates all the prerequisites for timely response to the threat of landslides and other hazardous phenomena. It is also important to adopt legislative acts in the field of environmental protection that would regulate agricultural and forestry practices in compliance with ecological norms and regulations. *Key words:* landscape and geomorphological changes, Ukrainian Carpathians, Precarpathian Depression, landslides, extreme weather conditions, GIS, remote sensing (ERS).

Постановка проблеми. Однією з найбільш глобальних екологічних проблем сучасності є зміна клімату. Це глобальний процес, який має суттєвий вплив на всі природно-кліматичні зони Землі та на більшість природних та антропогенних процесів. За останні 35 років спостерігається поступове підвищення середньорічної температури повітря

та зменшення кількості опадів. Також частіше фіксується настання екстремальних погодних умов, таких як: інтенсивні опади, зливи, повені, різкі коливання температур, вітрові бурі тощо. Інтенсивність впливу зазначених факторів залежить, в тому числі, і від геоморфологічних умов певної території.

Карпатський регіон є одним із найскладніших регіонів України у геоморфологічному відношенні. Рельєф цієї місцевості формується як під впливом тектонічних процесів, так і під дією сучасних кліматичних факторів. Зокрема, екстремальні погодні умови є основними чинниками змін у ландшафтно-геоморфологічній структурі Карпат. В цьому регіоні внаслідок особливостей геоморфологічної структури, таких явищ як паводки, а також високого ступеню антропогенного навантаження на ґрунтовий покрив та нерациональне ведення сільськогосподарського та лісового господарства найбільший відсоток виникнення зсувних та селевих явищ. Особливо часто такі явища можна помітити в районах, які належать до Передкарпатського прогину.

Актуальність дослідження. Відповідно, вивчення динаміки зсувних процесів в даному регіоні та застосування сучасних методів прогнозування та ліквідації зсувів є надзвичайно актуальною темою наукових досліджень, адже зсуви та інші екзогенні геоморфологічні явища завдають значної шкоди економіці країни та природному середовищу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Контроль зсувних процесів на складних ділянках Карпатського регіону, збір актуальних даних, прогнозування зсувів є проблемою загальнодержавного значення, оскільки активізація та зростання масштабів зсувних ділянок спричиняє суттєвий негативний вплив на економіку держави та безпеку населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема виникнення та розповсюдження зсувів, а також їх прогнозування широко досліджується у всьому світі. В Україні особливо зсувонебезпечними є території заходу України, а саме регіон Українських Карпат. Отже, проблема достатньо широко висвітлюється в наукових джерелах Касіянчук, Шехунова, Штогрин, Линник та ін. [3, 5, 10, 11]

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Райони, які належать до Передкарпатського прогину за рахунок ландшафтно-геоморфологічних, геологічних, тектонічних та господарчих особливостей є територіями з високим рівнем небезпеки активізації зсувних процесів, проте збір даних щодо зсувів в цьому регіоні Українських Карпат є несистематичним, що ускладнює прогнозування зсувних процесів цих районах та своєчасне реагування на них.

Новизна. В ході досліджень було проведено збір та систематизацію даних щодо наявності та активності зсувних процесів та екстремальних кліматичних факторів, що впливають на їх виникнення та частоту, на території, що належать до Передкарпатського прогину.

Методологічне або загальнонаукове значення. Проведено аналіз активності зсувних процесів в районах, що належать до Передкарпатського прогину у зв'язку зі зміною кліматичних умов та часто-

тою настання екстремальних погодних явищ.

Викладення основного матеріалу. Розвиток зсувних процесів залежить від геологічних, геоморфологічних, гідрогеологічних (рівень, хімічний склад, умови живлення та дренажу підземних вод), метеорологічних (атмосферні опади, температура тощо), гідрологічних (рівні та витрати води в поверхневих водотоках, ерозійна та абразійна дія поверхневих вод), сейсмічних та неотектонічних (землетруси) природних умов. Їх активізація може бути спровокована техногенною діяльністю (вирубка лісів, зрошення земель, порушення рівноважного профілю схилів при розташуванні інженерних об'єктів на схилах чи поблизу них).

Територія, яка розміщена в межах Українських Карпат, є частиною альпійсько-гімалайського орогенного (колізійного) поясу, в межах якого тектоніка прямо або опосередковано відображається в рельєфі. Найбільш чітке співвідношення рельєфу зі структурним планом спостерігається у Зовнішніх Карпатах, де чергування гірських хребтів і улоговин, їхні висоти, характер розчленування та напрямки простягання пов'язані з серією покривів, що мають значний вплив на напрямок і будову річкових долин, які, в свою чергу, формують регіональні умови розвитку зсувів, селів та інших небезпечних інженерно-геологічних процесів [10]. Проте ці процеси характерні також і для Передкарпаття, зокрема, для районів, які належать до Передкарпатського прогину (рис. 1).

Передкарпатський прогин – це регіон, який лежить між внутрішніми хребтами Українських Карпат і Подільською височиною, охоплюючи частини Львівської, Івано-Франківської та Чернівецької областей. Це перехідна зона між гірською і рівнинною частинами, особливо чутлива до геоморфологічних змін під впливом екстремальних погодних умов.

Передкарпатський прогин поділяється на дві основні зони – Зовнішню та Внутрішню. Такий поділ базується на особливостях геологічного розвитку та тектонічних деформаціях регіону. Зовнішня зона формувалася на різномірних елементах докембрійського та палеозойського фундаменту платформи й представлена теригенно-карбонатними відкладами верхнього міоцену, які утворюють так звану верхню моласу. Внутрішня складчаста зона включає в себе моласові породи нижнього міоцену, які частково перекриті насувами флішових товщ. Ця зона ділиться на дві підзони: Бориславсько-Покутську та Самбірську, які являють собою тектонічні покриви. Фронтальна частина Бориславсько-Покутського покриву є перевернутим насувом Карпат, більшість якого розташована в межах України, за винятком невеликої ділянки поблизу Перемишля. Ширина цього покриву становить 5–10 км, і він насунутий на Самбірську зону в північно-західному напрямку. Бориславсько-Покутський покрив у свою чергу складається з менших структурних елементів:



Рис. 1. Передкарпатський крайовий прогин в системі тектонічного районування України
(джерело: https://nrv.org.ua/tektonichna-budova-ukrayiny/#google_vignette)

Делятинського та Слобода-Рунгурського покривів. Делятинський покрив утворений відкладами крейдового та нижньоміоценового віку, подібно до Скибового (Сколівського) покриву Зовнішніх Карпат. Флішові товщі тут перекриті породами поляницької та воротищенської світ, місцями заміщеними конгломератами. Основу прогину утворюють докембрійські, палеозойські та мезозойські породи. Основні породи, які складають геологічну структуру району - мергелі, глини та пісковики.

Його ландшафт є складним поєднанням хвилястих рівнин, горбогір'їв і терас річок, що робить його особливо вразливим до гідрометеорологічних екстремумів. На цій території переважають денудаційно-алювіальні рівнини, терасові комплекси річок (особливо Дністра, Пруту, Бистриці, Лімниці) [1].

Клімат описаних територій помірно-континентальний, з річними опадами 600–900 мм, іноді з дуже інтенсивними зливами.

В межах Передкарпатського прогину знаходяться населені пункти таких областей як Чернівецька, Івано-Франківська та Львівська.

Ландшафтно-геоморфологічні, геологічні та кліматичні особливості цієї місцевості створюють передумови для виникнення таких явищ як зсуви ґрунту, селі, паводки, розмивання берегів річок тощо. Для вище названих територій характерні часті екстремальні погодні умови як, наприклад, сильні зливи, снігові бурі, шквали тощо. Відповідно, всі згадані особливості формують сприятливі умови для виникнення геоморфологічних змін території. Найчастіше тут виникають зсуви ґрунту. Особливо це стосується територій Івано-Франківської та Чернівецької областей, де інтенсивність та частота виникнення зсувів є суттєвою [4, 5].

В ході дослідження було зібрано статистичні дані щодо частоти виникнення зсувних процесів на території Передкарпатського прогину за період 2013-2023 рр. [2, 3, 6, 8, 9] (рис. 2):

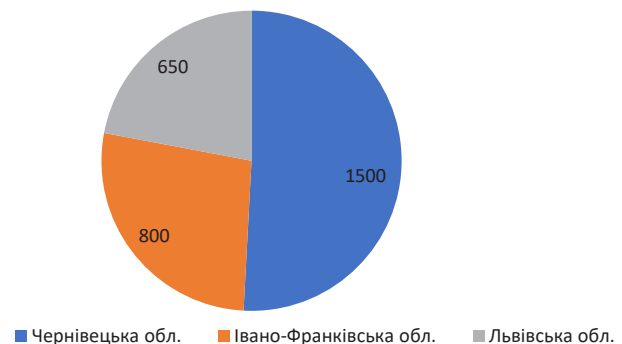


Рис. 2. Середня кількість зсувів на територіях адміністративних областей, які розташовані в Передкарпатському прогині

Згідно з отриманими даними зсуви є найбільш характерними для районів Чернівецької та Івано-Франківської областей. На території Чернівецької області зсуви охоплювали до 70% території Покутсько-Буковинського Передкарпаття. В Івано-Франківській обл. це Коломийський, Калуський, Яремчанський райони; села Шепарівці, Микуличин, місто Калуш. Протягом досліджуваного періоду частота зсувів збільшувалась, особливо, в кілька останніх років. Таке почастищення зсувних процесів можна пояснити кліматичними змінами, які відбуваються в останні десять років практично по всьому світу.

Українські Карпати так само зазнають змін температурного режиму, вологості тощо. Через кліматичні зміни в Карпатському регіоні за останні 10 років почастишала інтенсивність екстремальних погодних явищ, а саме сильних дощів, зумовлених ними паводків та повеней; шквалів та температурних аномалій.

В ході дослідження було зібрано інформацію про кількість випадків вище названих екстремальних метеорологічних явищ на території Українських Карпат та Передкарпатського прогину. Дані було зібрано за період 2013-2023 рр [7].

Аналіз даних про кількість випадків та інтенсивність сильних дощів в Українських Карпатах та Передкарпатському прогині за період 2013-2023 рр. дозволив встановити, що за останні 10 років кількість випадків сильних дощів поступово зростає (рис. 3). За згаданий період часу частота виникнення цього явища збільшилась у 2,0 – 2,5 рази.

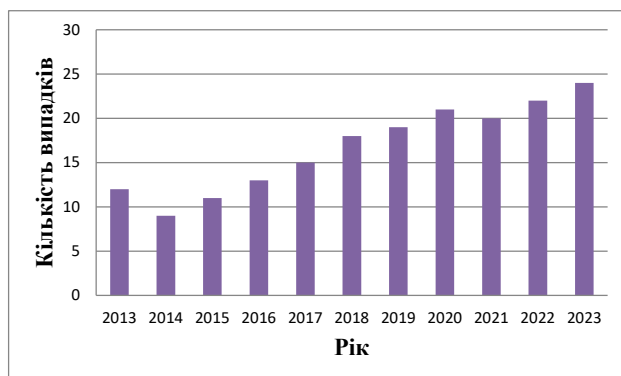


Рис. 3. Кількість випадків та інтенсивність сильних дощів в Українських Карпатах та Передкарпатському прогині за період 2013-2023 рр.

Кількість паводків та інтенсивність за зазначений період часу також дещо збільшилась, хоча їх максимум спостерігався 2018-2020 рр. при різкому зниженні їх частоти до 2023 року (рис. 4). Можливо таке зниження пояснюється протипаводковими заходами, які почали більш активно застосовувати (особливо, в районі Передкарпатського прогину) після того, як потужні паводки 2019-2020 років завдали значних економічних збитків.

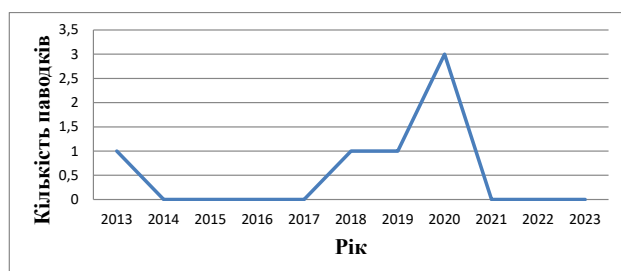


Рис. 4. Кількість випадків та інтенсивність паводків в Українських Карпатах та Передкарпатському прогині за період 2013-2023 рр.

Зібрані дані показали, що збільшення кількості випадків сильних дощів корелює зі збільшенням кількості шквальних вітрів (рис. 5).

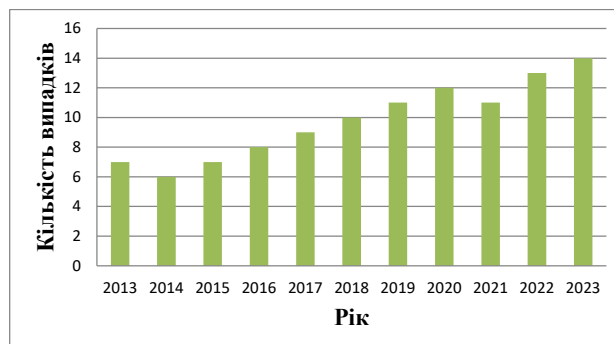


Рис. 5. Кількість випадків шквалів в Українських Карпатах та Передкарпатському прогині за період 2013-2023 рр.

Збільшення кількості сильних вітрів та шквалів поряд з сильними дощами провокує збільшення частоти та масштабності зсувів ґрунту на території Українських Карпат. Особливо це стосується Закарпаття та Передкарпатського регіону, оскільки на цих територіях переважає значна крутизна схилів, глиниста та вапнякова підстилаюча поверхня та суттєва розчленованість рельєфу річковими руслами.

Значний вплив на прояви екстремальних погодних умов також справляє температура повітря. За останні 10 років спостерігається загальносвітова тенденція до збільшення середньорічної температури повітря. Регіон Українських Карпат не є виключенням. У досліджуваний період тут спостерігалось значне підвищення кількості випадків екстремально високих температур повітря (рис. 6):

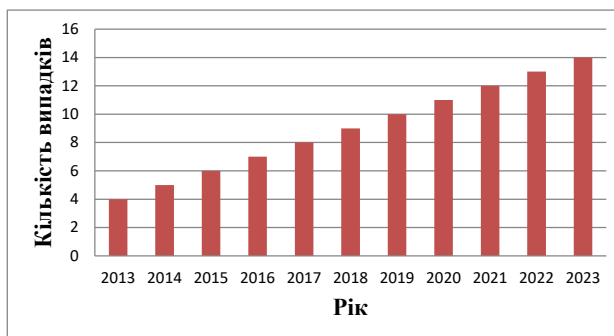


Рис. 6. Кількість випадків температурних аномалій (спек) в Українських Карпатах та Передкарпатському прогині за період 2013-2023 рр.

Рис. 6 демонструє чітку тенденцію до значного зростання температури повітря в Карпатському регіоні. Цьому сприяє не лише загальне потепління клімату, а й нераціональне ведення господарства, а саме: вирубування лісів, руслові роботи, розорювання земель тощо.

Відповідно до підвищення середньорічної температури повітря підвищується також і температура зимових місяців в Карпатському регіоні, отже, кількість випадків екстремально низьких температур суттєво зменшується. Хоча, не дивлячись на загальну тенденцію до збільшення вологості повітря та посилення дощів в Карпатському регіоні, кількість випадків снігових бур та заметів за досліджуваний період постійно зменшувалась (рис. 7):

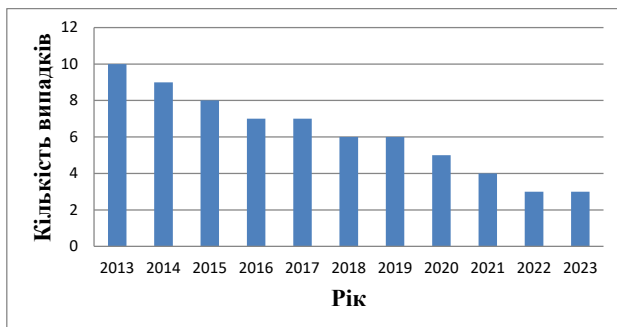


Рис. 7. Кількість випадків снігових бур в Українських Карпатах та Передкарпатському прогині за період 2013-2023 рр.

Як було зазначено вище, Передкарпатський прогин характеризується різноманітним рельєфом, що включає пластово-денудаційні височини, пасмо-во-горбисті форми, а також рівнини, розчленовані долинами і улоговинами. Основні геологічні особливості визначаються тектонічними порушеннями, а також відкладами верхніх молас, які залягають на епібайкальському та епіпалеозойському фундаменті. Ці геоморфологічні та геологічні особливості разом з впливом екстремальних погодних факторів формують передумови до почастішання зсувів в цьому регіоні Українських Карпат.

Геолого-геоморфологічні умови, інтенсивні опади та зміна температурного режиму в досліджуваний період сприяли розвитку селево-зсувних потоків та ерозійних річкових процесів та території Передкарпаття. Більшість новоутворених зсувів являють собою селево-зсувні потоки, які закладені в четвертинних елювіально-делювіальних та делювіальних відкладах, складених глинами та суглинками з уламками переважно пісковиків. Потужність порід, що деформуються, відповідає потужності четвертинних відкладів і може складати 1-5 м [4,11].

Крім того, для Передкарпаття характерною ознакою є наявність гірничо-та нафтодобувної промисловості, що також справляє значний вплив на активізацію зсувів. Для Івано-Франківської області цей техногенний фактор є одним з вирішальних при формуванні нових активних зсувних ділянок. В цьому районі Передкарпатського прогину особливу небезпеку також становить розробка піщано-гравійних відкладів у заплавах передгірської частини рік. Це спричиняє підвищення забруднення підземних вод

головного для використання водоносного горизонту, а також активізації ерозійних і зсувних процесів.

На території Івано-Франківської області зсуви за формою в плані глетчероподібні і фронтальні, їх площі коливалися від 0,1 до 1,2 га. За загаданих десятирічний період було відмічено збільшення зсувних ділянок змішаного та блокового типів. Найбільш активні зсувні процеси було помічено в районах с. Делятин, с. Левушик та с. Манява. В середньому за період 2013-2023 рр. в області виявлено 805 зсувних ділянок загальною площею 301 км² [3].

Одним з найбільш зсувонебезпечних районів Передкарпатського прогину є населені пункти Чернівецької області. Тут за досліджуваний період було в середньому зафіксовано 1450-1612 зсувних ділянок. Загальна площа активних зсувних ділянок в середньому складала 260,4 км². На даній території додатковим чинником прояву зсувів є наявність великої кількості карстонебезпечних ділянок (1,8 тис.). Найбільш небезпечна активізація карсту можлива на ділянках, де техногенне порушені існуючі гідрогеологічні умови, це в зонах впливу водовідборів (відкачка води з кар'єрів, водозабори та ін.), при порушенні шляхів природного стоку (заглиблення русел рік та струмків, будівництво ставків тощо). Найбільш зсувонебезпечною ділянкою в області є м.Чернівці та прилеглі населені пункти [9].

Частина Львівської області, яка також знаходиться в межах Передкарпатського прогину також характеризується наявністю активних зсувів. Найбільш зсувонебезпечними районами на даній території є Стрийський та Дрогобицький райони. За досліджуваний період було відмічено в середньому 1350 зсувних ділянок площею в середньому 530 км².

При природно-історичних умовах в межах Львівської області активізація зсувних процесів відмічається в місцях розповсюдження давніх зсувів. Новітні зсуви утворюються за техногенних обставин, наприклад, вздовж нафтопроводів «Дружба» та «Уренгой-Ужгород» [6].

Аналіз зібраних даних показує, що протягом досліджуваного періоду кількість зсувних ділянок на території Передкарпатського прогину збільшилась не значно, проте в умовах зміни клімату та активізації настання екстремальних метеоумов в Карпатському регіоні, слід очікувати активізації як старих зсувних ділянок в регіоні, так і утворення нових.

Саме тому крім звичайних методів захисту від зсувів, які базуються на зменшенні зсувних сил та збільшенні утримуючих сил (наприклад, зведення інженерних споруд) необхідно більшу увагу приділяти їх прогнозуванню та превентивним заходам.

Одним із сучасних та перспективних методів реєстрації та прогнозування зсувів є застосування технологій геоінформаційних систем (ГІС) та методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ).

В останні роки геоінформаційні системи стали універсальним інструментом для візуалізації, ана-

лізу, управління та моделювання просторових даних. Завдяки належному використанню ГІС, більшість підходів до прогнозу розвитку зсувів та оцінки зсувонебезпеки дозволяють повністю автоматизувати оцінку та стандартизацію методів управління даними, а застосування методів ДЗЗ на регіональному рівні може допомогти більш точному моніторингу та прогнозування зсувів за рахунок даних,

отриманих з супутникових знімків, літаків та безпілотників [5,10,11].

Висновки. На сучасному етапі важливим є застосування новітніх технологій прогнозування та моніторингу зсувів на місцях, розробка простих та не дорогих методів збору та аналізу інформації про зсуви на окремо взятих територіях та прийняття важливих законодавчих рішень у сфері управління екологічним благополуччям територій.

Література

1. Глушко, В. В., Ковальчук, І. П.. Передкарпатський прогин. *Енциклопедія Сучасної України*. Інститут енциклопедичних досліджень НАН України. 2023. URL: <https://esu.com.ua/article-879807> (дата звернення 18.05.2025)
2. Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». *Інформаційний щорічник щодо активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП*. URL: geoinf.kiev.ua (дата звернення 18.05.2025).
3. Івано-Франківська обласна державна адміністрація. *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Івано-Франківській області за 2013–2023 роки*. URL: https://www.if.gov.ua/storage/app/sites/24/uploaded-files/_%D0%94%D0%9E%D0%9F%D0%9E%D0%92%D0%86%D0%94%D0%AC_2023.pdf (дата звернення 19.05.2025).
4. Касіянчук, Д. В. Вивчення часових змін клімату у межах Карпатського регіону та їх взаємозв'язок з глобальними коливаннями температур. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2022. № 3(42). С. 131–135.
5. Линник, І. Е., & Шмуля, І. А. Аналіз зсувних процесів в Україні та заходи їхнього усунення. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. № 12. С. 92–101.
6. Львівська обласна державна адміністрація. *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Львівській області за 2013–2022 роки*. URL: https://www.if.gov.ua/storage/app/sites/24/uploaded-files/_%D0%94%D0%9E%D0%9F%D0%9E%D0%92%D0%86%D0%94%D0%AC_2023.pdf (дата звернення 21.05.2025).
7. Метеопост. (n.d.). *Архів погоди*. URL: <https://meteorpost.com/weather/archive/> (дата звернення 21.05.2025).
8. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. *Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році*. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (дата звернення 22.05.2025).
9. Чернівецька обласна державна адміністрація. *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Чернівецькій області за 2013–2022 роки*. URL: <https://bukoda.gov.ua/chernivecka-oda/structure/upravlinnya-ekologiyi-ta-prirodnih-resursiv/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolishnogo-seredovishcha-v-cherniveckij-oblasti> (дата звернення 22.05.2025).
10. Шехунова, С. Б., Сюмар, Н. П., Лобасов, О. П., Стадніченко, С. М.. Аналіз просторових закономірностей поширення зсувів у межах Закарпатської області засобами ГІС. *Український географічний журнал*. 2022. № 3 (119). С.11–20.
11. Штогрин, Л. В., Касіянчук, Д. В., Бараніченко, В. В., & Штогрин, М. В. Геоінформаційний аналіз природних чинників формування зсувів у регіоні Складчастих Карпат (у межах Закарпатської області). *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2023. № 1(27). С.75–84.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЦЕСИ В НАВАНТАЖЕННІ ПРИ РОБОТІ ВІД КОМБІНОВАНОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ З СУПЕРКОНДЕНСАТОРОМ І АКУМУЛЯТОРНОЮ БАТАРЕЄЮ

Білецький О.О., Петрученко А.О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Перемоги, 37, 03056, м. Київ

biletsky27@gmail.com

В даній роботі проведено аналіз енергетичних процесів в навантаженні при живленні від комбінованого джерела живлення з батареєю суперконденсаторів (СК) та літій-іонною акумуляторною батареєю (АБ). Проведено аналіз енергетичних характеристик розрядних кіл комбінованої системи електроживлення. Досліджено режими при яких умовах батарея СК забезпечує імпульсну потужність, а літій-іонна АБ стала довготривалими режимами споживання потужності. Доведено, що паралельне під'єднання батареї СК до АБ зменшує в ній імпульсні струми при всіх збільшеннях активної потужності в навантаженні, за умови, що внутрішній опір батареї СК менше внутрішнього опору літій-іонної АБ. Еквівалентна схема відображає гібридне джерело з СК та літій-іонною АБ. Батарея СК підключена до перетворювача Buck/Boost, в той час як літій-іонна АБ підключена до Boost (підвищувального) перетворювача. Пікова потужність літій-іонної АБ обмежена електронікою, а потужність в навантаженні при пікових режимах перекривається за рахунок батареї СК. Досліджено енергетичні характеристики батареї СК та літій-іонної АБ при їх роботі в складі комбінованого джерела енергії на спільне навантаження. Враховано, що ємність батареї СК становила $C_{СК} = 500$ (Ф), а ємність АБ відповідно $E_{АБ} = 6,6$ (Агод). Моделювання проведено в пакеті прикладних програм Matlab. Проведено порівняння результатів досліджень для різних діапазонів зміни імпульсної потужності в навантаженні. Встановлено, що імпульсна потужність в навантаженні на початку перехідного процесу при роботі на навантаження забезпечується на 95 % за рахунок батареї СК. АБ забезпечує необхідну максимальну потужність в діапазоні часу від 3,3 до 6 (с), в цей час батарея СК не працює на навантаження і вся потужність забезпечується АБ. **Ключові слова:** енергетичні процеси; навантаження; розряд; ємність; суперконденсатор; нелінійність; внутрішній опір; акумуляторна батарея.

Energy processes in load when operating from a combined power source with a supercapacitor and a battery.
Biletskyi O., Zaluskyi D.

In this work, an analysis of energy processes in the load when powered by a combined power source with a supercapacitor battery (SC) and a lithium-ion battery was performed. An analysis of the energy characteristics of the discharge circuits of the combined power supply system was performed. The modes under which the SC battery provides pulsed power and the lithium-ion battery maintains long-term power consumption modes were investigated. It was proved that parallel connection of the SC battery to the battery reduces pulsed currents in it at all increases in active power in the load, provided that the internal resistance of the SC battery is less than the internal resistance of the lithium-ion battery. It was analyzed that when the internal resistance of the SC battery decreases with the unchanged resistance of the battery, the pulse current in the load and the ratio of currents in the SC battery and the battery increase. The equivalent circuit shows a hybrid source with SC and a lithium-ion battery. The SC battery is connected to a Buck/Boost converter, while the lithium-ion battery is connected to a Boost (boost) converter. The peak power of the lithium-ion battery is limited by electronics, and the power in the load at peak modes is covered by the SC battery. The energy characteristics of the SC battery and the lithium-ion AB were studied when they operate as part of a combined energy source for a common load. It was taken into account that the capacity of the SC battery was $C_{SC} = 500$ (F), and the capacity of the AB, respectively, $E_{AB} = 6.6$ (Ah). The simulation was carried out in the Matlab package. The results of the research were compared for different ranges of pulse power changes in the load. It was established that the pulse power in the load at the beginning of the transient process when working on the load is provided by 95% by the SC battery. The AB provides the required maximum power in the time range from 3.3 to 6 (s), at this time the SC battery does not work on the load and all the power is provided by the AB. **Key words:** energy processes; load; discharge; capacity; supercapacitor; nonlinearity; internal resistance; rechargeable battery.

Постановка проблеми. Усталений розвиток електротехніки та електроніки потребує розробки і оновлення джерел живлення, які можуть забезпечувати накопичення електроенергії та швидко її передачу до споживачів. Електротехнічні пристрої повинні працювати мільйони циклів без суттєвого погіршення своїх характеристик. Нелінійні конденсатори – СК є сучасними ємнісними джерелами енергії. СК широко застосовується в комбінованих джерелах електричної енергії, електроніці та елек-

тротехніці. СК в електротехніці відомі як нелінійні конденсатори (НК), іоністори, двошарові конденсатори або ультраконденсатори [2, 4-10]. СК мають питому енергію, яка наближається до свинцевих акумуляторних батарей.

Показники по питомій потужності СК в 25 більші питомої потужності новітніх АБ [2]. Це досягається за рахунок значно меншого внутрішнього опору. При цьому ємність (Ф) для СК може бути до десятків тисяч (Ф), при напрузі в діапазоні до 4-5 (В).

Обмеження напруги для батареї СК є через поріг після якого відбувається електрохімічний розпад електроліту з подальшим розкладанням електроліту та поломкою через перегрів СК. Батареї СК використовуються для отримання напруг, які можуть становити декілька сотень вольт. Перевагою СК є те, що вони працюють до мільйона розрядних циклів без втрати електротехнічних характеристик. В свою чергу літій-іонні АБ працюють максимально до пари тисяч циклів заряд-розряд [2].

Враховуючи особливості АБ та СК, літій-іонні АБ використовують для забезпечення довготривалих режимів забезпечення енергії, а СК для перекривання імпульсних режимів споживання потужності в різноманітному навантаженні комбінованих систем [4, 6–9].

Актуальність дослідження. Огляд та аналіз енергетичних процесів в розрядних колах комбінованих джерел електроживлення енергетичних систем [2, 7–15] показав, що дослідження виконувалися без аналізу внутрішнього опору батареї СК та АБ та їх співвідношення при використанні з перетворювачами напруги. Також не виконувалася оптимізація розміру батареї СК та АБ при паралельній роботі в комбінованому джерелі живлення на навантаження.

Метою даної роботи є порівняння енергетичних характеристик в навантаженні при роботі від комбінованого джерела живлення з батареєю СК і АБ. Необхідно провести дослідження зміни імпульсних струмів в електричних колах навантаження, батареї СК та літій-іонної АБ при комбінованих режимах роботи.

Виклад основного матеріалу. Залежність ємності СК від напруги на його затискачах враховувалась при даних дослідженнях. Певна частина ємності СК залежить від напруги на затискачах СК, що описувалось в роботах [2–10] та підтверджено фізикою СК. Залежність ємності СК від напруги експериментально підтверджена в роботах [2–3, 9] при роботі від джерела постійної електрорушійної сили (ЕРС) та при ємностях СК 470, 1500 і 2600 Ф. Сумарна ємність батареї СК зумовлена послідовним підключенням великої кількості ємностей, що утворені завдяки подвійному електричному шару в пористому матеріалі обкладок СК.

Сумарна ємність СК збільшується при збільшенні напруги на клемі СК, дана особливість пояснюється підвищенням діелектричної проникності середовища електроліту та меншій товщині подвоєного електричного шару [2, 3, 9]. Значення ємності СК можна знайти за відомою формулою [2]

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (1)$$

відповідно ε – діелектрична проникність електроліту; S – загальна площа розвиненої поверхні нанопористого електроду; d – товщина подвійного електричного шару; ε_0 – діелектрична проникність вакууму [2].

При підвищенні напруги на клемі СК збільшується область накопичення зарядів в електродах НК, цим пояснюється нелінійність ємності СК. Це стає можливим через утворення зарядів в шарах нанопор малого діаметру [2–3]. Відбувається нелінійне відносно напруги збільшення накопиченого в СК заряду. Ємність СК визначається класичним виразом як абсолютна величина відношення заряду на одному з тіл до напруги між тілами [2–3]:

$$C = Q / U. \quad (2)$$

Одиниця розмірності ємності відповідно до визначення $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$. Два тіла матимуть ємність, якщо вони розмежовані діелектриком. Величина ємності буде незалежною від величини напруги та від величини заряду, бо напруга між тілами буде лінійно визначена через величину заряду в електростатичному полі [2]. Відомо, що величина ємності буде залежати від розмірів тіл, їхньої конфігурації, від діелектрика та від відстані між цими тілами [2–3]. Підтверджено рядом наукових досліджень, що для СК їх ємність також залежить від напруги на їх обкладках [2, 4, 7–10]. Формула (2) підходить як для СК, так і для конденсаторів, бо дає закономірність між напругою між обкладками та зарядом кожної з обкладок.

При проведенні дослідження СК заряджали від джерела постійної ЕРС [9]. Підтверджено, що значення ємності СК збільшувалося нелінійно в даному діапазоні зміни напруги. Можна проксимувати загальну ємність СК у вигляді суми постійної ємності $C_1 = \text{const}$ та частини ємності $C_v(U) = k |U|$, яка залежить лінійно від напруги, k – сталий коефіцієнт з розмірністю $[\text{Ф/В}]$.

Відповідно з даними особливостями фізики СК [2–3, 9–10], значення повної ємності СК можна записати виразом:

$$C(U) = C_1 + k |U|. \quad (3)$$

В даній роботі проведено аналіз енергетичних процесів в навантаженні при живленні від комбінованого джерела живлення з батареєю СК та літій-іонною АБ. Проведено аналіз енергетичних характеристик розрядних кіл комбінованої системи електроживлення. Досліджено режими при яких умовах батарея СК забезпечує імпульсну потужність, а літій-іонна АБ стала довготривалим режимом споживання потужності. Для цього було використано модель в середовищі чисельного моделювання Matlab (рис. 1) [11].

Еквівалентна схема відображає гібридне джерело з СК та літій-іонною АБ. Батарея СК підключена до перетворювача Buck/Boost, в той час як літій-іонна АБ підключена до Boost (підвищувального) перетворювача. Пікова потужність АБ обмежена електронікою, а потужність в навантаженні при пікових режимах перекривається за рахунок батареї СК [11].

Електричний струм відображає зміну заряду dQ за одиницю часу в момент заряду, відповідно маємо вираз [2]:

$$i(t) = dQ/dt, \quad (4)$$

з даного виразу маємо $dQ = i(t) dt$.

Диференціал заряду dQ для СК є нескінченно малим приростом для функції, що дорівнює добутку U на $C(U)$. Відповідна формула матиме вигляд [2]:

$$dQ = d[C(U) \cdot U] = (C_0 + 2 k \cdot U) \cdot dU. \quad (5)$$

Робимо підстановку формули (5) в формулу (4), звідки маємо вираз для електричного струму:

$$i(t) = (C_0 + 2 k \cdot U) \cdot (dU/dt). \quad (6)$$

Розрахунок диференційної ємності СК виконується за виразом [2-3]:

$$C_{\text{диф}}(U) = C_0 + 2 k \cdot U. \quad (7)$$

Дані багатьох експериментів підтверджують, що величина ємності СК нелінійно міняється при зміні напруги на його клеммах. При необхідності апроксимації дану криву можна замінити прямою лінією $C(U)$ за умови, що СК буде працювати при напрузі на його клеммах в діапазоні від $0,5U_n$ до U_n . В наукових роботах [1–10] зазначено, що при таких умовах за напругою СК накопичує до 70-80 % своєї енергії.

Для проведення аналізу енергетичних процесів в навантаженні при живленні від комбінованого

джерела живлення з батареєю СК та АБ проведено моделювання в Matlab. Параметри СК та АБ [2-5, 11], що використано в моделі зазначені в таблиці 1.

В роботі розглянуто гібридне джерело з СК та АБ. Батарея з шести СК підключена до перетворювача Buck/Boost (понижувально-підвищувальний), в той час як літій-іонна батарея підключена до Boost – підвищувального перетворювача. Понижувально-підвищувальний перетворювач пристроєм з напругами DC-DC. Даний перетворювач забезпечує вихідну напругу, що є більшою або меншою, ніж вхідна напруга. Він підходить для різних застосувань в сучасній силовій електроніці, бо є універсальним. В даному випадку регулювання величини вхідної напруги і вимоги до вихідної різні. З метою продовження терміну служби потужність АБ обмежується електронікою, а пікові режими споживання потужності в навантаженні забезпечуються батареєю з шести СК [2-4, 11].

Приймаємо, що початкова напруга на АБ $U_{AB} = 26,4$ (В), початкова напруга на батареї СК $U_{СК\text{бат}} = 16$ (В). Дослідження проводилось за умови, що ємність батареї СК становила 500 (Ф), ємність АБ становила 6,6 (А·год). Внутрішній опір СК $R_{СК} = 0,0021$ (Ом). Температура СК становила $t_{СК} = 25$ °C, температура АБ відповідно $t_{AB} = 30$ °C.

Для дослідження режимів роботи на навантаження гібридної системи живлення з батареєю СК та АБ проведено аналіз енергетичних характеристик.

Таблиця 1

Параметри схеми заміщення СК					Параметри літій-іонної АБ		
$R_{СК}$, Ом	$C_{СК}$, Ф	$U_{СК\text{бат}}$, В	$U_{СК1}$, В	$t_{СК}$, °C	U_{AB} , В	E_{AB} , А·год	t_{AB} , °C
0,0021	500	16	2,67	25	26,4	6,6	30

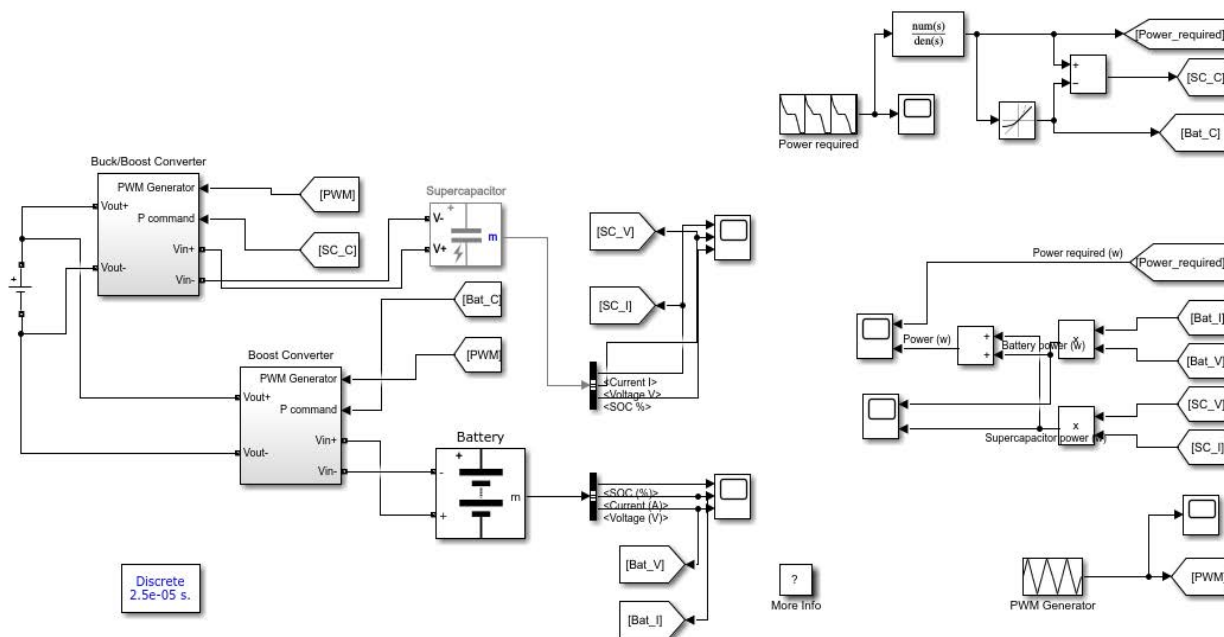


Рис. 1. Еквівалентна схема гібридного джерела з СК та АБ

Таблиця 2

t, c	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
SOC _{AB}	100	99,9	99,7	99,3	99,2	99,1	99,0	98,7	98,5	98,2	98,2
SOC _{CK}	100	90,2	89,9	89,9	90,1	90,3	88,4	88,0	88,0	88,4	88,6
I _{AB} , A	0	20,0	35,0	35,0	14,0	0	21,0	35,0	35,0	14,0	0
I _{CK} , A	0	40,0	0	0	-25,0	0	40,0	0	0	-25,0	0
U _{AB} , B	30,80	29,80	28,80	28,40	29,00	29,50	28,70	27,70	27,50	28,20	28,80
U _{CK} , B	16,00	15,60	15,62	15,62	15,72	15,71	15,30	15,32	15,32	15,42	15,40
P _{AB} , Вт	0	600,0	1000,0	1000,0	400,0	0	600,0	1000,0	1000,0	400,0	0
P _{CK} , Вт	0	650,0	0	0	-400,	0	650,0	0	0	-400,	0
P _н , Вт	0	1250,0	1000,0	1000,0	0	0	1250,0	1000,0	1000,0	0,0	0

Виконано аналіз зміни потужності батареї СК та АБ, потужності, яка необхідна в навантаженні. Проаналізовано: SOC % (стан заряду) батареї СК та АБ; зміну струму і напруги батареї СК та АБ.

Розглянуто 11 точок – таблиця 2.

Розглянуто 11 часових точок. Проаналізовано енергетичні характеристики батареї СК та АБ в процесі роботи гібридної системи на навантаження. З табл. 2 маємо, що при роботі на навантаження в діапазоні часу від 0 до 20 (с) SOC для СК змінюється від 100 % до 88,6 %, в порівнянні для АБ SOC змінюється від 100,0 % до 98,2 %. Відповідно для СК SOC зменшився на 11,4 %, а для АБ на 1,8 %. Це пояснюється більшою питомою енергією літій-іонної АБ.

При на навантаження від початку роботи до 4 с напруга на АБ зменшується на 3,2 %, в той час напруга на батареї СК зменшується на 2,4 %. При подальшій роботі на навантаження від 0 до 20 с напруга на АБ зменшується на 6,5 %, при цьому напруга на батареї СК зменшиться на 3,7 % (таблиця 2).

В перші моменти після комутації імпульсний струм через СК становить 125 (А), в той час як струм АБ наростає плавно, обмежується електронікою і доходить до 35 (А) за 3,2 (с). При роботі на навантаження максимальний струм СК в 3,57 рази більший за максимальний струм АБ.

Імпульсна потужність в навантаженні на початку перехідного процесу при роботі на навантаження забезпечується на 95 % за рахунок батареї СК. Максимальна імпульсна потужність в навантаженні становить 1950 (Вт). Максимальна імпульсна потужність батареї СК доходить до 1900 (Вт). Потужність АБ плавно наростає в діапазоні часу від 0 до 3,3 с і має максимальне значення 1000 (Вт). АБ забезпечує необхідну максимальну потужність в діапазоні часу від 3,3 до 6 (с), в цей час батарея СК не працює на навантаження і вся потужність забезпечується АБ. Відповідно батарея СК віддає в навантаження в 1,9 разів більше імпульсної потужності на початку перехідного процесу при даних умовах, ніж АБ.

Подібні енергетичні характеристики батарея СК може забезпечити за рахунок того, що питома енергія СК в тисячі разів перевищує питому енергію простих конденсаторів [1-10]. В свою чергу питома

енергія новітніх СК еквівалентна звичайним свинцевим АБ [1-3, 10]. По питомій потужності новітні СК більш ніж в 20 разів перевищують цю характеристику відомих літій-іонних АБ [1-3].

При появі новітніх зразків СК потрібно буде змінити еквівалентні схеми заміщення СК для їх досліджень і подальшого використання. Фізичні властивості СК необхідно досліджувати з врахуванням умов по температурі, напрузі та робочій частоті.

Головні висновки.

1. Досліджено енергетичні характеристики батареї СК та літій-іонної АБ при їх роботі в складі комбінованого джерела енергії на спільне навантаження. Враховано, що ємність батареї СК становила $C_{СК} = 500$ (Ф), а ємність АБ відповідно $E_{АБ} = 6,6$ (Агод). Моделювання проведено в пакеті програм Matlab.

2. Встановлено, що при роботі на навантаження в діапазоні часу від 0 до 20 (с) SOC для СК змінюється від 100 % до 88,6 %, в порівнянні для АБ SOC змінюється від 100,0 % до 98,2 %. Відповідно для СК SOC зменшився на 11,4 %, а для АБ на 1,8 %. Це пояснюється більшою питомою енергією літій-іонної АБ.

3. В перші моменти після комутації імпульсний струм через СК становить 125 (А), в той час як струм АБ наростає плавно, обмежується електронікою і доходить до 35 (А) за 3,2 (с). При роботі на навантаження максимальний струм СК в 3,57 рази більший за максимальний струм АБ.

4. Проведено порівняння результатів досліджень для різних діапазонів зміни імпульсної потужності в навантаженні. Встановлено, що імпульсна потужність в навантаженні на початку перехідного процесу при роботі на навантаження забезпечується на 95 % за рахунок батареї СК.

Перспективи використання досліджень.

Постійний розвиток та розробка нових технологій для СК привела до появи сучасних матеріалів для виготовлення електродів. Відомо про появу сучасних СК з електродами з графену та оновленої технології виготовлення електродів з поєднанням графену та азоту. Такий підхід забезпечив збільшення ємності в порівнянні зі звичайними зразками СК в 2 рази. Це стало можливим завдяки додаванню азоту в електроди.

Література

1. A. Burke Present and future supercapacitors: technology and applications. *Presented at the supercapacitor USA*. Santa Clara. California. 2014.
2. Білецький О. О. Енергетичні процеси в колах заряду суперконденсаторів зі змінними початковими напругами: дис. ...канд. техн. наук: 05.09.05. Київ, 2016. 195 с.
3. Білецький О. О., Супруновська Н. І., Щерба А. А. Залежність енергетичних характеристик кіл заряду суперконденсаторів від їх початкових і кінцевих напруг. *Технічна електродинаміка*. 2016. No. 1. с. 3–10.
4. A. Burke Ultracapacitors alone and in combination with batteries in hybrid- electric vehicles: system considerations and performance. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. Springer Publishing. 2011.
5. A. Burke, M. Miller, H. Zhao. Lithium batteries and ultracapacitors alone and in combination in hybrid vehicles: fuel economy and battery stress reduction advantages. *JSR*. 2010. 21.23: 15.
6. O.O. Biletskyi, V.I. Kotovskyi, N. Višniakov, A. Šešok Investigation of the Energy Characteristics of a Circuit under the Charge of a Supercapacitor and an Equivalent Linear Capacitor. *Applied Sciences* 12 (18), 9182.
7. O.O. Biletskyi, V.I. Kotovskyi Investigation of energy processes in circuits of oscillatory charge of supercapacitors Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. 2019. С. 5-14.
8. Білецький О. О., Котовський В.Й. Енергетичні процеси в колах із суперконденсаторами та неідеальними джерелами постійної напруги в комбінованих системах живлення електромобілів Науково-практичний журнал «Екологічні науки». 2018, с. 63-66.
9. L. Zubieta, R. Bonert. Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications. *IEEE Trans. on Ind. Appl.* 2000. Vol. 36. № 1. P. 199–205.
10. Білецький О. О., Щерба А. А., Супруновська Н. І. Енергетичні характеристики кіл аперіодичного заряду суперконденсаторів від акумуляторних батарей. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика*. 2015. No. 12 (1121). с. 379–383.
11. Matlab model. Pierre Clement Bland, L.-A. Dessaint (Ecole de technologie superieure, Montreal).

YOLO-БАЗОВАНА АВТОМАТИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ РОГІВ ОЛЕНІВ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ ПОПУЛЯЦІЙ

Воронова Н.В.¹, Горбань В.В.¹, Литвиненко А.В.², Височін Д.В.¹

¹Запорізький національний університет

вул. Університетська, 66, 69011, м. Запоріжжя

²Національний університет «Запорізька політехніка»

вул. Університетська, 64, 69011, м. Запоріжжя

180270n@gmail.com, valera251077@gmail.com, lytvart@ukr.net, dmytrovdv7@gmail.com

У сучасних дослідженнях дикої природи значну роль відіграють технології комп'ютерного зору та методи детекції об'єктів, зокрема із застосуванням фотопасток. Ці інструменти дозволяють автоматизувати процеси моніторингу, які раніше вимагали значних витрат часу та людських ресурсів. Автоматизований аналіз зображень сприяє глибшому розумінню екологічних факторів, що впливають на розподіл і поведінку тварин, а також забезпечує ефективне управління природними ресурсами та збереження біорізноманіття. Дослідження присвячене розробці та застосуванню алгоритму автоматичного розпізнавання морфологічних характеристик оленів, зокрема будови їхніх рогів, на основі зображень із фотопасток. Роги оленів є важливими індикаторами віку, статусу домінування, якості харчування та загального здоров'я особин. Автоматизований аналіз цих ознак дозволяє отримувати цінну інформацію про стан популяції без необхідності вилову тварин чи тривалого спостереження, що має практичне значення для мисливських господарств України. Для вирішення задачі детекції об'єктів використано алгоритм YOLO (You Only Look Once), який характеризується високою швидкістю та точністю завдяки одночасному передбаченню обмежувальних рамок і ймовірностей класів об'єктів за допомогою єдиної згорткової нейронної мережі. На відміну від традиційних методів, YOLO аналізує зображення цілком, враховуючи контекст, що забезпечує надійне розпізнавання об'єктів у складних природних умовах. У дослідженні алгоритм адаптовано для виявлення рогів оленів, що демонструє його універсальність і придатність до вузькоспеціалізованих задач екологічного моніторингу. Результати дослідження показують, що автоматичне розпізнавання морфологічних ознак рогів дає змогу швидко виявляти аномалії, оцінювати генетичну якість і стан здоров'я оленів, а також прогнозувати ризики для популяції. Це сприяє розробці ефективних стратегій збереження та управління популяціями копитних. Отримані дані можуть бути використані для оптимізації роботи мисливських господарств, зокрема для планування заходів зі збереження біорізноманіття та раціонального використання природних ресурсів. Перспективи подальших досліджень включають інтеграцію розробленого алгоритму в автоматизовані системи моніторингу, розширення аналізу на інші фенотипічні ознаки тварин, а також поширення цього підходу на інші регіони України. Подальший розвиток методології може сприяти створенню універсальних інструментів для моніторингу дикої природи, що матиме значення не лише для екології, але й для суміжних галузей, таких як біоінформатика та управління природокористуванням. Застосування алгоритмів комп'ютерного зору, подібних до YOLO, відкриває нові можливості для швидкої та точної оцінки стану популяцій у реальному часі, що є критично важливим для сталого розвитку екосистем. *Ключові слова:* моніторинг, фотопастка, аналіз розподілу, ратичні, популяції, моделювання, комп'ютерний зір, алгоритм YOLO.

YOLO-Based Automatic Deer Antler Identification for Population Assessment. Voronova N., Gorban V., Lytvynenko A., Vysochin D.

In modern wildlife research, computer vision technologies and object detection methods, particularly those employing camera traps, play a pivotal role. These tools facilitate the automation of monitoring processes that traditionally demanded considerable time and human resources. Automated image analysis enhances the understanding of ecological factors influencing animal distribution and behavior, while also supporting effective natural resource management and biodiversity conservation. This study focuses on the development and implementation of an algorithm for the automatic recognition of morphological characteristics of deer, specifically the structure of their antlers, using images captured by camera traps. Deer antlers serve as critical indicators of age, dominance status, nutritional quality, and overall individual health. The automated analysis of these traits provides valuable insights into population conditions without requiring animal capture or extended observation periods, which is particularly relevant for hunting farms in Ukraine. To tackle the object detection challenge, the YOLO (You Only Look Once) algorithm was utilized. This algorithm is distinguished by its high speed and accuracy, achieved through the simultaneous prediction of bounding boxes and class probabilities within a single convolutional neural network. Unlike conventional approaches, YOLO processes the entire image holistically, incorporating contextual information, which ensures robust object recognition under complex natural conditions. In this research, the algorithm was tailored to detect deer antlers, showcasing its adaptability and effectiveness for specialized tasks in ecological monitoring. The findings demonstrate that the automatic recognition of antler morphology enables rapid identification of anomalies, evaluation of genetic quality and health status of deer, and prediction of population risks. These outcomes support the formulation of effective conservation strategies and the management of ungulate populations. The resulting data can optimize the operations of hunting farms, particularly in planning biodiversity conservation measures and the sustainable use of natural resources. Future research prospects include integrating the developed algorithm into automated monitoring systems, extending the analysis to additional phenotypic traits of animals, and applying this approach to other regions of Ukraine. Further refinement of the methodology could lead to the creation of versatile tools for wildlife monitoring, with implications not only for ecology but also for related disciplines such as bioinformatics and natural resource management. The deployment of computer vision algorithms like YOLO unlocks new possibilities for rapid and precise real-time assessment of population status, a factor of critical importance for the sustainable development of ecosystems. *Key words:* monitoring, camera trap, distribution analysis, ungulates, populations, modeling, computer vision, YOLO algorithm.

Постановка проблеми. Застосування технологій комп'ютерного зображення та сучасних методів виявлення об'єктів за допомогою фотопасток набуває більшого значення в дослідженнях дикої природи. Ці технології дозволяють автоматизувати процеси моніторингу, які раніше вимагали значної участі людини, що сприяє оптимізації витрат часу та ресурсів. Наприклад, у роботі Бельда та співавт. [1] продемонстровано можливість використання даних фотопасток у поєднанні з ландшафтними індексами для моделювання розподілу копитних у середньоморському ландшафті. Отримані результати підкреслюють важливість таких даних для з'ясування екологічних чинників, що виділяють розподіл ратичних, і дають цінну інформацію для розробки стратегій управління дикою фауною та лісовими ресурсами.

Проте залишаються виклики, пов'язані з використанням цих технологій для точного й автоматизованого фенотипування ознак диких тварин, зокрема морфологічних характеристик рогів оленів, які є ключовими показниками віку, стану здоров'я та динаміки популяції. У контексті мисливських господарств України можливість ефективного моніторингу морфології рогів за допомогою зображення із фотопасток могла б спростити оцінку стану популяції, дослідження поведінки та аналіз здоров'я тварин. Ручний аналіз таких ознак є трудомістким і часто суб'єктивним, що зумовлює потребу в автоматизованих рішеннях, здатних швидко виявити аномалії та оцінити ризики для підтримки зусиль зі збереження популяції [2, 3].

Перспективним підходом до розв'язання цих проблем є використання передових алгоритмів виявлення об'єктів, таких як YOLO (You Only Look Once) [4]. На відміну від традиційних методів, які аналізують окремі фрагменти зображення, YOLO обробляє зображення цілісно, враховуючи контекст, що забезпечує точність розпізнавання об'єктів у складних природних умовах. Ця робота спрямована на подолання цієї прогалини шляхом застосування алгоритму YOLO для автоматизованого виявлення характеристик рогів на зображеннях із фотопасток, демонструючи адаптивність сучасних методів машинного навчання до специфічних потреб моніторингу популяції ратичних. Розв'язання цих викликів сприятиме розробці надійних інструментів для управління дикою природою та збереження біорізноманіття.

Актуальність дослідження. Дослідження, спрямовані на автоматизований аналіз морфологічних характеристик рогів оленів, мають високу актуальність у контексті сучасних екологічних і природоохоронних викликів. Роги оленів є важливими індикаторами віку, статусу домінування, якості харчування, генетичної здатності до виживання та загального здоров'я особин. Наприклад, розмір і симетрія рогів можуть відображати рівень доступу до поживних ресурсів і генетичну стійкість, що

є ключовими факторами для оцінки життєздатності популяцій. У сучасних умовах, коли антропогенний тиск на природні екосистеми зростає, а ресурси для традиційних методів моніторингу обмежені, автоматизовані підходи до аналізу зображень із фотопасток забезпечують швидке й ефективне отримання даних без необхідності вилову тварин чи тривалого польового спостереження.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Застосування комп'ютерного зору, зокрема алгоритмів YOLO, дозволяє дослідникам, екологам і працівникам мисливських господарств отримувати цінну інформацію про стан популяцій оленів, включаючи виявлення аномалій, оцінку генетичної якості та прогнозування ризиків для популяцій. Це сприяє розробці обґрунтованих стратегій управління природними ресурсами та збереження біорізноманіття. В Україні, де мисливські господарства відіграють значну роль у підтримці популяцій ратичних, такі дослідження мають особливе значення, оскільки вони дають змогу оптимізувати заходи зі збереження видів і раціонального використання ресурсів. Крім того, автоматизований аналіз фенотипічних ознак відкриває перспективи для масштабування методології на інші види та регіони, що робить такі дослідження актуальними не лише для екології, але й для суміжних дисциплін, таких як біоінформатика та управління природокористуванням. Алгоритм YOLO, на відміну від вільних двоетапних методів, використовує єдину згорткову нейронну мережу для одночасного визначення об'єктів та їх класів, значно прискорюючи детекцію [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Виявлення та оцінка стану об'єктів у реальному часі є ключовим елементом сучасних технологій у таких галузях, як автономні транспортні засоби, робототехніка, відеоспостереження та доповнена реальність. Серед різних алгоритмів виявлення об'єктів, фреймворк YOLO забезпечує швидку та надійну ідентифікацію об'єктів на зображеннях. Можливості YOLO щодо виявлення об'єктів у режимі реального часу описані в автономних транспортних системах, вони дозволяють швидко ідентифікувати та відстежувати різні об'єкти, такі як транспортні засоби, пішоходи [6, 7]. Ці можливості вже застосовані в багатьох галузях, включаючи розпізнавання дій [8]. Моделі YOLO використовувалися в сільському господарстві для виявлення та класифікації сільськогосподарських культур [9, 10], шкідників та хвороб [11]. Вони також були адаптовані для завдань розпізнавання обличчя в біометрії та системах безпеки [12, 13].

На рисунку 1 показано бібліометричну мережеву візуалізацію всіх статей, знайдених у Scopus, зі словом YOLO в назві та відфільтрованих за ключовим словом «виявлення об'єктів». Потім ми вручну відфільтрували всі статті, пов'язані із застосуваннями [14].

Архітектура YOLO розділяє зображення на сітку розміром $S \times S$ (наприклад, 13×13 клітин). Для кожної секції сітки алгоритм передбачає: в обмежувальних рамок (кожна рамка описується координатами центру, шириною, висотою); впевненість у наявності об'єкта в кожній рамці; ймовірності приналежності об'єкта до кожного з класів.

Основними перевагами YOLO є: швидкість роботи (YOLO обробляє зображення в режимі реального часу, що важливо для аналізу відео або роботи на мобільних пристроях у польових умовах); глобальне розуміння контексту (оскільки алгоритм аналізує все зображення цілком, він краще враховує контекст, що зменшує кількість помилкових спрацьовувань (наприклад, менше ймовірно, що гілка дерева буде помилково прийнята за ріг оленя); висока точність детекції [15-16]. Функція втрат YOLO (loss function) оцінює, наскільки передбачення моделі відрізняються від фактичних даних. Вона включає компоненти для оцінки точності локалізації, впевненості та класифікації. Під час навчання модель намагається мінімізувати цю функцію втрат, поступово покращуючи свої передбачення.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Для роботи з алгоритмом YOLO для розпізнавання рогів оленя, розроблено середовище на базі Python із використанням бібліотек PyTorch

(фреймворк глибокого навчання), OpenCV (обробка зображення), Matplotlib і NumPy (візуалізація та обчислення), а також Ultralytics (реалізація YOLO v8). Використання графічної карти використовується для прискорення навчання нейронних мереж. Ключовою проблемою є формування репрезентативного набору даних. Для цього зібрано понад 500 зображень оленів із різноманітними умовами: різне освітлення (сонце, хмарність, сутінки), пори року (літній і зимовий фон), ракурси (фронтальний, профіль, поза), вид оленів (благородний, лань, північний) та якість зображення (професійні фото, любительські знімки, фотопастки). Це забезпечує різноманітність даних, необхідну для ефективного навчання моделі [17].

Розроблено та адаптовано алгоритм YOLO v8 для розпізнавання рогів оленів, що є новим у контексті управління популяціями диких тварин в Україні. Створено набір даних (>500 зображень) із різноманітними умовами (освітлення, пори року, ракурси, види оленів, якість зображень) для підвищення узагальнюючої здатності моделі. Використано Python із бібліотеками PyTorch, OpenCV, Matplotlib, NumPy та Ultralytics, оптимізованими для GPU, що забезпечує ефективне навчання моделі. Створені анотації, які вказують точне розташування рогів оленя на кожному зображенні та розмітку обмежувальних рамок

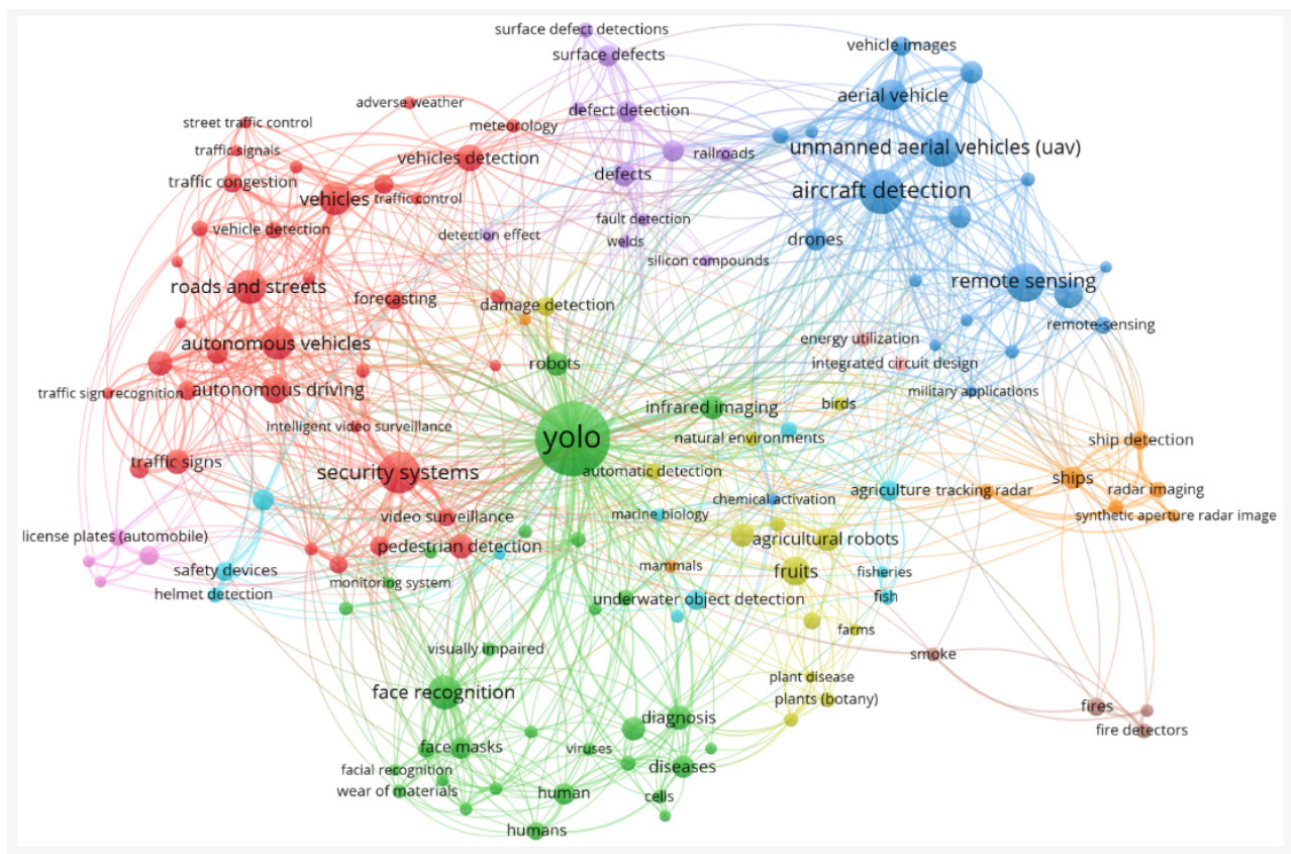


Рис. 1. Бібліометрична мережева візуалізація статей, знайдених у Scopus, зі словом YOLO

(bounding boxes) навколо рогів. Результати дають змогу автоматизувати моніторинг популяцій, оцінювати генетичну якість та прогнозувати ризики, сприяючи збереженню біорізноманіття та раціональному природокористуванню.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Використано Labellmg для створення анотацій у форматі YOLO. Принципи розмітки: щільне охоплення рогів без включення інших частин тіла, окрема розмітка для кожного набору рогів, врахування частково перекритих рогів.

Анотації зберігаються у текстових файлах із відносними координатами (class_id, x_center, y_center, width, height), що забезпечує універсальність.

Дані структуровано у папки: "images": зображення (.jpg, .png). та "labels": анотації у форматі YOLO.

Обґрунтовано поділ на:

1. тренувальну вибірку (70–80%) — для навчання моделі;
2. валідаційну вибірку (10–15%) — для оцінки та запобігання перенавчанню;
3. тестову вибірку (10–15%) — для фінальної оцінки.

Такий підхід забезпечує точність детекції, узагальнюючу здатність моделі та має значення для методології машинного навчання.

Виклад основного матеріалу. Для визначення класів, які модель повинна розпізнавати, було створено файл конфігурації у форматі YAML. У нашому випадку це досить простий файл, оскільки ми маємо лише один клас — «роги оленя». Цей файл визна-

час не тільки класи, але й шляхи до різних вибірок даних, що спрощує процес навчання моделі.

На рисунку 2 елементи відмічені різними кольорами для позначення контексту. Наприклад, роги оленя були відмічені червоним кольором. Також, для додаткової точності були додані відмітки контексту очей та носа, щоб додатково було знайдено голова оленя. Це допомагає уникнути неточностей, коли в кадрі є елементи дерев, які можна сплутати з рогами.

Нейронна мережа YOLO складається з багатьох шарів нейронів, кожен з яких виконує певні математичні операції над даними. Перші шари мережі виявляють прості особливості зображення (лінії, кути, текстур), а глибші шари комбінують ці особливості для розпізнавання складніших патернів і, зрештою, цілих об'єктів. Навчання нейронної мережі — це процес підбору оптимальних значень для мільйонів параметрів (ваг) мережі. Цей процес відбувається за допомогою алгоритму зворотного поширення помилки (backpropagation) та оптимізатора (наприклад, стохастичного градієнтного спуску), який коригує ваги для мінімізації функції втрат.

Для нашого проєкту було обрано модель YOLOv8s — це варіант алгоритму YOLO восьмої версії з «маленькою» (small) архітектурою, яка забезпечує хороший баланс між швидкістю роботи та точністю детекції. Важливим аспектом навчання є використання попередньо навченої моделі (pre-trained model). Це модель, яка вже була навчена на великому наборі даних (наприклад, MS COCO, що містить понад 200,000 зображень з 80 категоріями

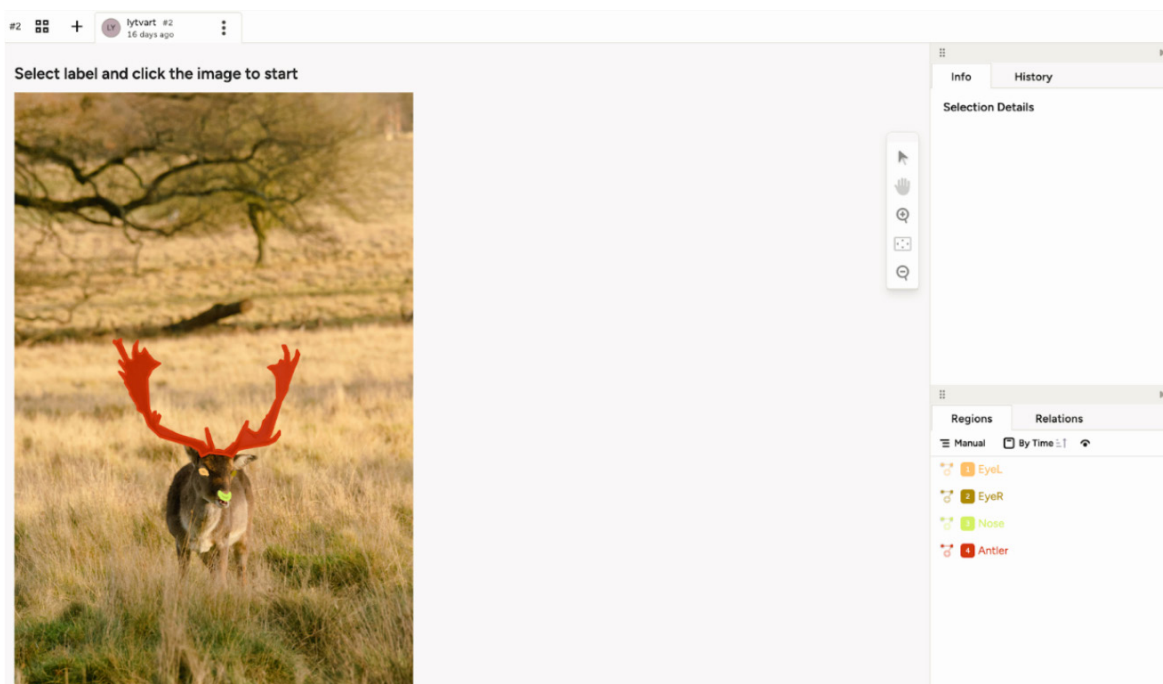


Рис. 2. Особливості позначення елементів для ефективного розпізнавання рогів оленя

об'єктів). Використання такої моделі як відправної точки дозволяє значно скоротити час навчання та покращити результати, особливо при обмеженому наборі даних.

Ми застосували підхід «трансферного навчання» (transfer learning), який базується на ідеї, що нижні шари нейронної мережі, які виявляють базові візуальні особливості (лінії, кути, текстури), можуть бути корисними для багатьох завдань комп'ютерного зору, не тільки для тих, на яких модель була початково навчена.

Для нашого проєкту було налаштовано наступні ключові гіпер параметри:

1. Швидкість навчання (learning rate): 0.01 з експоненційним зменшенням, яка визначає, наскільки сильно параметри моделі змінюються після кожної ітерації. Занадто висока швидкість може призвести до «перестрибування» оптимальних значень, а занадто низька – до повільної збіжності. Експоненційне зменшення означає, що швидкість навчання поступово зменшується з часом, що дозволяє спочатку швидко наблизитися до оптимуму, а потім точно його налаштувати.

2. Розмір групи (batch size): набір з 16 зображеннями – це група зображень, які обробляються одночасно. Більший розмір групи забезпечує стабільне навчання, але вимагає більше пам'яті. Значення 16 було обрано як компроміс між стабільністю та ефективністю використання ресурсів.

3. Кількість епох: 100 Епоха – це один повний прохід через усі тренувальні дані. Чим більше епох, тим довше відбувається навчання і тим краще модель може пристосуватися до даних. Однак занадто багато епох може призвести до перенавчання. Значення 100 було обрано з урахуванням специфіки задачі та обсягу даних.

4. Аугментація даних: включено Аугментація даних – це техніка, яка штучно збільшує різноманітність тренувальних даних шляхом застосування різних трансформацій до наявних зображень (горизонтальне відображення, зміна яскравості, контрасту, насиченості тощо). Це допомагає моделі краще узагальнювати та розпізнавати об'єкти в різних умовах.

Нижче наведено приклад коду для навчання моделі YOLO з використанням бібліотеки Ultralytics:

```
from ultralytics import YOLO
import os
import torch
# Перевіряємо доступність графічної карти
device = torch.device('cuda' if torch.cuda.is_
available() else 'mps')
# Шлях до конфігураційного файлу
config_path = 'data.yaml'
# Завантаження базової моделі
model = YOLO('yolov8s.pt')
# Навчання моделі
results = model.train(
    data=config_path, # шлях до конфігурацій-
ного файлу
```

```
epochs=100, # кількість епох
imgsz=640, # розмір вхідних зображень
batch=16, # розмір батчу
patience=15, # раннє зупинення навчання,
якщо немає покращення впродовж 15 епох
save_period=10, # збереження проміжних
моделей кожні 10 епох
name='deer_antlers_detection', # назва експе-
рименту
augment=True, # застосування аугмен-
тації даних
lr0=0.01, # початкова швидкість
навчання
lrf=0.001, # фінальна швидкість
навчання
cos_lr=True, # використання косинусного
розкладу швидкості навчання
cache=True, # кешування зображень для
прискорення навчання
device=device, # пристрій для навчання
(процесор або відеокарта)
pretrained=True, # використання попе-
редньо навченої моделі
optimizer='SGD', # тип оптимізатора
weight_decay=0.0005, # регуляризація L2
momentum=0.937, # момент для оптимі-
затора SGD
warmup_epochs=3, # кількість епох для
розігріву
close_mosaic=10, # вимкнення мозаїчної
аугментації на останніх епохах
val=True # проведення валідації після
кожної епохи)
# Виведення підсумкових метрик
print(f»Найкраще значення mAP@0.5: {results.
maps[0]}»)
print(f»Найкраще значення mAP@0.5:0.95:
{results.maps[1]}»)»)
```

Під час навчання модель проходить через наступні етапи для кожної епохи:

1. Прямий прохід (Forward pass): Модель обробляє батч зображень і робить передбачення щодо розташування рогів оленя.

2. Обчислення втрат (Loss calculation): Передбачення порівнюються з фактичними анотаціями, і обчислюється значення функції втрат, яке відображає, наскільки точними були передбачення.

3. Зворотне поширення (Backward pass): Обчислюються градієнти функції втрат відносно всіх параметрів моделі.

4. Оновлення параметрів (Parameter update): Параметри моделі оновлюються за допомогою оптимізатора для мінімізації функції втрат.

5. Валідація: Після обробки всіх тренувальних даних модель оцінюється на валідаційному наборі даних для моніторингу прогресу та запобігання перенавчанню.

Після завершення навчання модель зберігається у файл, який містить всю необхідну інформацію для розпізнавання рогів оленя на нових зображеннях:

1. Архітектура моделі. Це визначення структури нейронної мережі – кількість і типи шарів, як вони з'єднані між собою. У випадку YOLOv8s це специфічна архітектура, оптимізована для задач детекції об'єктів.

2. Ваги моделі. Це мільйони числових параметрів, які модель «вивчила» під час навчання. Саме ці параметри визначають, як модель реагуватиме на різні вхідні дані. Ваги – це основний результат процесу навчання, і вони займають найбільшу частину збереженого файлу.

3. Конфігурація. Це додаткова інформація, необхідна для правильної інтерпретації вхідних даних та вихідних результатів, наприклад: інформація про класи (у нашому випадку один клас – «роги оленя»), параметри попередньої обробки зображень (нормалізація, зміна розміру), параметри постобробки результатів (фільтрація передбачень за порогом впевненості, non-max suppression)

4. Метадані. Інформація про версію моделі, дату навчання, використані гіперпараметри, досягнуті показники якості тощо.

Файл моделі може мати різні формати (.pt, .pth для PyTorch; .h5 для Keras; .onnx для відкритого формату ONNX). У випадку YOLOv8 від Ultralytics моделі зазвичай зберігаються у форматі .pt (PyTorch).

Головні висновки. Після навчання, оптимізації та тонкого налаштування модель продемонструвала наступні показники на тестовому наборі даних:

1. Precision (точність): 91.4% – це означає, що з усіх об'єктів, які модель позначила як роги оленя, 91.4% дійсно були рогами оленя. Висока точність свідчить про низький рівень хибно-позитивних результатів.

2. Recall (повнота): 88.7% – це означає, що модель виявила 88.7% усіх рогів оленя, присутніх на тестових зображеннях. Цей показник вказує на те, що модель дуже рідко пропускає роги оленя.

3. F1-Score: 90.0% – це гармонічне середнє точності та повноти, яке дає збалансовану оцінку якості моделі. Високе значення F1-Score (близьке до 90%) свідчить про хороший баланс між точністю та повнотою.

4. mAP@0.5: 0.912 – це середня точність при порозі IoU 0.5. Це означає, що модель досягає середньої точності 91.2%, коли обмежувальна рамка вважається правильною, якщо вона перекривається з фактичною рамкою не менше ніж на 50%.

5. Швидкість інференсу: 45 кадрів/с на GPU Mac M3 MAX – це показник того, як швидко модель може обробляти зображення. Швидкість 45 кадрів в секунду означає, що модель може аналізувати відеопотік у режимі реального часу, що важливо для багатьох практичних застосувань.

Перспективи використання результатів дослідження. Для практичної демонстрації роботи системи було розроблено простий інтерфейс, що дозволяє обробляти як окремі зображення, так і відеопотік. Нижче наведено приклад коду для такої демонстрації:

```
from ultralytics import YOLO
model = YOLO('yolo8/deer-seg.pt')
model = YOLO('Users/artem/env/deer-detect/runs/segment/train3/weights/best.pt')
results = model('dataset/deer1.jpg')
results[0].show()
```

І маємо такий результат детекції рогів оленів, рисунок 3:

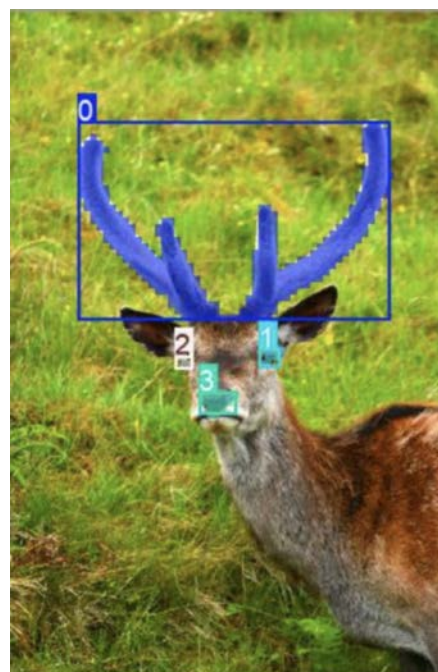


Рис. 3. Результат детекції рогів оленя для обробки фото- та відео

Майбутні напрямки досліджень включають інтеграцію алгоритму в автоматизовані системи моніторингу, аналіз інших фенотипічних ознак та поширення цього підходу на інші мисливські господарства в Україні.

Література

1. Belda A., Oltra-Crespo S., Miró-Martínez P., Zaragoza B. Can spatial distribution of ungulates be predicted by modeling camera trap data related to landscape indices? A case study in a fragmented mediterranean landscape. *Caldasia*. 42(1). 2020. P. 96–104. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v42n1.76384>
2. Височін Д.В., Горбань В.В. Популяційна динаміка та використання ресурсів ратичних у Полтавському регіоні (2010–2023). *XI Регіональна, I Всеукраїнська науково-практична конференція «Актуальні проблеми та перспективи розвитку природничих, медичних та фармацевтичних наук»*. 26 квітня 2025 р. 2025. С.113–114.

3. Vysochyn D.V., Lytvynenko A.V. Assessment of the ecological status of deer populations in the «taganchanske» hunting estate, divytsia tract, Cherkasy region, using antler phenotype analysis. XI Регіональна, I Всеукраїнська науково-практична конференції «Актуальні проблеми та перспективи розвитку природничих, медичних та фармацевтичних наук». 26 квітня 2025 р. 2025. С.115-116.
4. Казіонов М., Скрипник Т., Пасічник О., Вознюк, Л. Вдосконалений метод виявлення БПЛА за тепловізійними зображеннями на основі моделі глибокого навчання YOLO. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. 347(1), P. 571-575. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-79>
5. Тервен Х., Кордова-Еспарза Д.М., Ромеро-Гонсалес Х.-А. Повний огляд архітектур YOLO у комп'ютерному зорі: від YOLOv1 до YOLOv8 та YOLO-NAS. Mach. Learn. Knowl. Extr., 2023. 5(4), С. 1680–1716. DOI: <https://doi.org/10.3390/make5040083>.
6. Lan W.; Dang J.; Wang Y.; Wang S. Pedestrian detection based on YOLO network model. In *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. Changchun, China, 5–8 August 2018; P. 1547–1551.
7. Hsu W.Y.; Lin W.Y. Adaptive fusion of multi-scale YOLO for pedestrian detection. IEEE Access 2021. 9, P. 110063–110073.
8. Shinde S.; Kothari A.; Gupta V. YOLO-based human action recognition and localization. *Procedia Comput. Sci.* 2018. 133. P. 831–838.
9. Tian Y.; Yang G.; Wang Z.; Wang H.; Li E.; Liang, Z. Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model. *Comput. Electron. Agric.* 2019. 157. P. 417–426.
10. Wu D.; Lv S.; Jiang M.; Song H. Using channel pruning-based YOLO v4 deep learning algorithm for the real-time and accurate detection of apple flowers in natural environments. *Comput. Electron. Agric.* 2020. P. 178, 105742.
11. Lippi M.; Bonucci N.; Carpio R.F.; Contarini M.; Speranza S.; Gasparri A. A. Yolo-based pest detection system for precision agriculture. In *Proceedings of the 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. Puglia, Italy, 22–25 June 2021; P. 342–347.
12. Wang Y.; Zheng J. Real-time face detection based on YOLO. In *Proceedings of the 2018 1st IEEE International Conference on knowledge innovation and Invention (ICKII)*, Jeju, Republic of Korea. 23–27 July 2018; P. 221–224.
13. Chen W.; Huang H.; Peng S.; Zhou C.; Zhang C. YOLO-face: A real-time face detector. *Vis. Comput.* 2021. 37. P. 805–813.
14. VOSviewer. VOSviewer: Візуалізація наукових ландшафтів. 2023. Доступно онлайн: <https://www.vosviewer.com/> (дата звернення: 11.04.2025 р.).
15. Веб-технології для обробки відеоданих. URL: <https://surl.li/ydktej> (дата звернення: 07.04.2025).
16. Нейромережі, штучний інтелект, машинне навчання розробка і впровадження. URL: <https://surl.lu/cfuspj> (дата звернення: 10.04.2025).
17. Карпаті А., Фей-Фей Л. Глибокі візуально-семантичні вирівнювання для генерації описів зображень. *CVPR*. 2015. С. 3128–3137.

УДК 502:581.9

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.21>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИКОГО ЛУГУ ЯК МОДЕЛІ ДАВНЬОЇ ЕКОСИСТЕМИ

Іваненко М.К., Притула Н.М.

Запорізький національний університет

вул. Гоголя, 62, 69600, м. Запоріжжя

ivanenkom2000@gmail.com, prytulanataliam@gmail.com

Стаття присвячена комплексному дослідженню флористичного біорізноманіття території Великого Лугу – природного комплексу, який існував до затоплення внаслідок створення Каховського водосховища у середині XX століття. На основі історичних джерел, ботанічних описів, археоботанічних даних та порівняльного аналізу проаналізовано видовий склад флори цього унікального регіону, визначено його екологічну значущість і реконструйовано можливу структуру рослинності до гідротехнічного втручання. Основна увага приділяється злаковим родинам, як ключовим фітоелементам екосистеми, що відзначалися значною видовою різноманітністю та екологічною пластичністю.

Дослідження виявляє високу мозаїчність біотопів, що включали заплавні ліси, болотисті ділянки, степові та лугові угруповання, що в сукупності забезпечували стійкість екосистеми й підтримували складну мережу міжвидових взаємодій. Особливе місце відведено ендемічним і реліктовим видам, які свідчать про унікальність флористичної спадщини регіону. Аналіз також охоплює проблематику втрат, пов'язаних із затопленням, і виокремлює не до кінця досліджені аспекти – зокрема, недостатню вивченість видового складу до індустріальної трансформації, брак знань про екологічні зв'язки всередині угруповань та відсутність методології реконструкції історичних екосистем.

Наукова новизна статті полягає у систематизації та синтезі розрізнених джерел для створення цілісного бачення флористичного стану Великого Лугу до моменту радикальних ландшафтних змін. У роботі запропоновано підходи до прогнозування потенціалу природного відновлення флори після руйнування Каховської ГЕС у 2023 році, що дає змогу розглядати результати як базу для екологічної реставрації та створення нових заповідних об'єктів. Матеріали дослідження мають високу практичну цінність для розробки стратегії фіторе mediaції деградованих територій та виконання міжнародних зобов'язань України у сфері збереження біорізноманіття.

Робота також акцентує увагу на культурному значенні Великого Лугу, пов'язаного з історичною спадщиною Запорізької Січі, що надає додаткового змістового виміру екологічному дослідженню. Таким чином, результати статті є вагомим внеском у розуміння екологічної історії регіону, формування підходів до відновлення природних ландшафтів і реалізації інтегрованої стратегії сталого природокористування в умовах сучасних екологічних викликів. *Ключові слова:* рослинний світ, антропогенний вплив, заплавні угіддя, природоохоронні заходи.

Biodiversity of the flora of the Great Meadow prior to the construction of the Kakhovka hydroelectric station. Ivanenko M., Prytula N.

The article is dedicated to a comprehensive study of the floristic biodiversity of the Great Luh, a natural complex that existed before being flooded due to the creation of the Kakhovka Reservoir in the mid-20th century. Based on historical sources, botanical descriptions, archaeobotanical data, and comparative analysis, the species composition of the flora of this unique region is analyzed, its ecological significance is determined, and the possible vegetation structure before the hydrotechnical intervention is reconstructed. Special attention is given to the grass families, which were key phytocomponents of the ecosystem, characterized by significant species diversity and ecological plasticity.

The research reveals the high mosaicity of the habitats, which included floodplain forests, swampy areas, steppe, and meadow communities, all of which together ensured the resilience of the ecosystem and supported a complex network of interspecies interactions. Particular attention is paid to endemic and relict species, which indicate the uniqueness of the floristic heritage of the region. The analysis also addresses the issue of losses caused by the flooding and highlights under-researched aspects, including the insufficient study of the species composition before industrial transformation, the lack of knowledge about ecological connections within communities, and the absence of a methodology for reconstructing historical ecosystems.

The scientific novelty of the article lies in the systematization and synthesis of disparate sources to create a holistic view of the floristic state of the Great Luh before the radical landscape changes. The paper proposes approaches for forecasting the potential of natural flora recovery after the destruction of the Kakhovka Hydroelectric Power Station in 2023, which allows for considering the results as a basis for ecological restoration and the creation of new protected areas. The research materials are of high practical value for the development of strategies for phytoremediation of degraded territories and the fulfillment of Ukraine's international commitments in the field of biodiversity conservation.

The work also emphasizes the cultural significance of the Great Luh, associated with the historical heritage of the Zaporizhian Sich, adding an additional dimension to the ecological research. Thus, the results of the article make a significant contribution to understanding the ecological history of the region, forming approaches to restoring natural landscapes, and implementing an integrated strategy for sustainable natural resource management in the face of contemporary environmental challenges. *Key words:* flora, anthropogenic impact, floodplain wetlands, nature protection measures.

Постановка проблеми. До затоплення внаслідок будівництва Каховського водосховища, Великий Луг представляв собою одну з найбільш цінних природних територій південної частини України. Унікальне поєднання болотних, лучних та лісових біоценозів створювало умови для існування великої кількості ендемічних, рідкісних і реліктових видів рослин. Цей регіон був не лише осередком біологічного розмаїття, а й мав важливе історико-культурне значення, будучи пов'язаним із Запорізькою Січчю. Затоплення території призвело до масштабної трансформації екосистем, зникнення природних біотопів, а також порушення природного балансу в межах Нижньодніпровського ландшафтного поясу [6, 10].

У контексті сучасних екологічних викликів, спричинених як історичними змінами, так і новітніми подіями, такими як руйнація Каховської ГЕС у 2023 році, постає нагальна потреба у переосмисленні екологічного минулого цієї території. Вивчення флористичної спадщини Великого Лугу дозволяє сформулювати підґрунтя для розробки стратегій екологічної реабілітації та сталого управління природними ресурсами на посткатастрофічних територіях [10].

Актуальність дослідження. Дослідження флористичного різноманіття Великого Лугу в історичному контексті набуває особливої актуальності у зв'язку з глобальними процесами деградації природних екосистем, зміною клімату та наслідками військових дій на території України. Руйнування Каховської ГЕС у 2023 році спричинило чергову хвилю екологічної дестабілізації в регіоні, що вимагає наукового аналізу та практичних рішень щодо можливого відновлення зруйнованих ландшафтів.

Створення бази даних про видовий склад рослинності, яка існувала до затоплення, є критично важливим для реконструкції природного середовища та формування ефективних стратегій його реабілітації. Дослідження також має вагоме значення для реалізації положень Європейської стратегії збереження біорізноманіття до 2030 року, яка передбачає відновлення деградованих екосистем і підтримку стійких природних територій.

Зібрані дані слугують основою для фіторе mediaційних заходів на територіях, що зазнали антропогенного навантаження та втратили екологічну функціональність. Крім того, результати цього дослідження можуть бути використані для створення нових заповідних зон, формування еколого-просвітницьких програм і залучення місцевих громад до активної участі у збереженні природної спадщини регіону.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження флори Великого Лугу до створення Каховської ГЕС тісно пов'язане з ключовими науковими та практичними завданнями сучасної екології. Воно відповідає цілям «Стратегії біорізноманіття ЄС до 2030 року» щодо відновлення природних еко-

систем. Після руйнування гідроспоруди в 2023 році, вивчення історичного стану флори набуває особливої значущості для планування заходів з реабілітації ландшафту.

Знання про видовий склад рослин, які зростали до затоплення, дозволяє визначити найбільш доцільні напрямки відновлення екосистем, у тому числі шляхом фіторе mediaції [3]. Це дослідження також становить інтерес для збереження культурної спадщини, оскільки Великий Луг є історично значущою територією, пов'язаною із Запорізькою Січчю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Минуле Великого Лугу репрезентує втрачену частину природного багатства України. Відповідно до наявних історичних джерел, дана територія вирізнялася надзвичайним видовим різноманіттям, зокрема високою часткою ендемічних і реліктових видів. Наукові розвідки, присвячені вивченню рослинного світу до появи Каховського водосховища, підтверджують виключну флористичну цінність цього регіону.

Особливе значення мають дослідження нижньодніпровського регіону, відомого в історико-археологічному контексті як територія Малої Скіфії. Роботи таких дослідників, як Немцев (2014), Гаврилук і Матера (2016), Дайнеко та інші, засвідчують існування на цих землях мозаїчних екосистем, багатих на флористичні й фауністичні елементи. Залишки цих природних комплексів, що виникли ще в III–II століттях до н.е., досі не отримали вичерпного наукового осмислення. Археоботанічні й археологічні матеріали свідчать про високу екологічну складність природного середовища, яке слугувало основою для життя численних культур протягом століть [1, 2].

Виділяють два ключові екологічні вектори біорізноманіття Нижнього Дніпра: один асоціюється з кочовими громадами скіфського періоду, інший – із постскіфськими осередками осілого населення, що справили вплив на формування природних угруповань. Наукові джерела вказують на важливу роль політичної динаміки античного полісу Ольвія в еволюції біорізноманіття регіону, особливо після вимушеного переселення її мешканців унаслідок готських вторгнень у I столітті до н.е. [9, 11].

Матеріали, отримані внаслідок польових досліджень першої половини XX століття, підтверджують, що Великий Луг до індустріалізації вирізнявся надзвичайною структурною розмаїтістю. На території співіснували болота, степи, ліси й заплави, які створювали складну мозаїку біотопів з високим ступенем взаємозв'язків між видами [4, 5].

У процесі гідротехнічної трансформації середовища цінність цієї екосистеми була істотно підважена. Будівництво Каховської ГЕС призвело до безповоротних змін у ландшафті, що кардинально вплинуло на структуру флори та екологічну стабільність регіону, що неминуче позначилося на флорі.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується озна-

чена стаття. Попри значну кількість наукових праць, присвячених флорі Великого Лугу, низка критично важливих питань і досі залишається поза належною увагою дослідників. Одним з таких аспектів є відсутність цілісного системного аналізу видового складу до моменту гідротехнічного втручання, що суттєво ускладнює реконструкцію втрат у біорізноманітті та формування бази для порівняльних оцінок.

Недостатньо вивченими залишаються також трофічні, симбіотичні та екологічні взаємозв'язки між видами, що населяли довкілля Великого Лугу. Особливо брак наукових даних відчутний щодо ендемічних рослин, зникнення яких могло мати значні екологічні наслідки на локальному рівні. Крім того, залишаються прогалини в дослідженні впливу історичних форм землекористування на зміну флористичного складу, зокрема у контексті господарської діяльності різних історичних періодів.

Окремої уваги потребує аналіз потенціалу для природного відновлення окремих компонентів колишньої екосистеми після техногенної катастрофи 2023 року, спричиненої руйнуванням греблі Каховської ГЕС. Наразі не розроблено узгоджених методичних підходів до реконструкції історичного стану біорізноманіття, що стримує ефективне планування екоренатуралізаційних заходів.

Таким чином, запропоноване дослідження спрямоване на заповнення зазначених прогалин шляхом створення цілісної наукової картини флористичного різноманіття Великого Лугу до трансформацій, викликаних антропогенними чинниками, і надання нових аналітичних основ для практичної екологічної реставрації..

Новизна. Наукова новизна цього дослідження полягає в цілісному аналізі флористичного біорізноманіття Великого Лугу до створення Каховської ГЕС із залученням історичних, археоботанічних і екологічних джерел. Робота вперше систематизує дані про видовий склад, зниклі або трансформовані елементи флори, а також оцінює їхню екологічну роль у минулому. Запропоновано аналітичні підходи до прогнозування природного відновлення екосистем, що можуть бути застосовані для реабілітації подібних територій, зокрема тих, які постраждали від антропогенних катастроф.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне та загальнонаукове значення дослідження полягає у формуванні підходів до вивчення історичних екосистем у контексті антропогенного впливу, зокрема гідротехнічних змін. Робота створює основу для реконструкції флористичного складу минулого, що є критично важливим для розробки стратегій екологічної реставрації. Запропонована методологія може бути адаптована для вивчення інших трансформованих ландшафтів, сприяючи глибшому розумінню природних процесів та розробці рішень у сфері збереження біорізноманіття на національному й міжнародному рівнях.

Виклад основного матеріалу. У межах проведення дослідження застосовано міждисциплінарний підхід, що поєднує елементи історико-географічного аналізу, ботанічної інвентаризації, порівняльного методу та статистичної обробки даних. Такий підхід дозволив сформувати цілісне уявлення про стан флористичного різноманіття території Великого Лугу до затоплення її водами Каховського водосховища.

Особливу увагу приділено злаковим компонентам рослинного покриву, як таким, що мають високу екологічну адаптивність та значну роль у формуванні природних угруповань [6, 7]. У процесі аналізу було ідентифіковано 54 родини судинних рослин, кожна з яких представлена різною кількістю видів – від одного до тринадцяти. Найбільш чисельно репрезентованими виявилися родини *Bromus* L. (13 видів) та *Agropyrum* Gaertn. (12 видів), значну частку також становили види з родів *Avena* L., *Hordeum* L. і *Poa* L., які включають від 6 до 10 таксонів.

Цей видовий склад відображає високий рівень екологічної мозаїчності території: поряд існували болотисті ділянки, заплавні ліси, лучні зони та сухі степові фрагменти. Така мозаїчність біотопів забезпечувала умови для збереження численних екологічних ніш, що, своєю чергою, підтримувало стабільне функціонування природного середовища.

Окремо слід наголосити на виявленні ендемічних, реліктових та аборигенних видів, значення яких у структурі екосистеми було винятковим. Їхня присутність свідчить про тривалий процес природного формування флористичного комплексу, стійкість якого формувалася століттями у відповідь на регіональні кліматичні та геоморфологічні умови [8].

Таким чином, результати флористичного аналізу не лише документують видовий склад довоєнного природного комплексу Великого Лугу, а й створюють базу для оцінки втрат, спричинених гідротехнічним будівництвом, та формування підходів до його екологічної реконструкції.

Головні висновки. Результати дослідження засвідчують, що флора Великого Лугу до створення Каховської ГЕС характеризувалася високим рівнем біорізноманіття, складною структурою екосистем і значною кількістю адаптованих видів, зокрема злакових, ендемічних та реліктових. Комплексний аналіз історичних джерел і ботанічних матеріалів дозволив реконструювати загальну картину видової насиченості регіону та виявити ключові флористичні угруповання, які зазнали незворотних змін унаслідок гідротехнічного втручання.

Створення Каховського водосховища призвело до знищення природних біотопів, що спричинило суттєві втрати в екологічній структурі регіону, включаючи порушення водного режиму, зменшення чисельності окремих видів та зміну природного балансу. Отримані дані є важливим джерелом для подальшої розробки заходів з екологічного відновлення, оскільки формують підґрунтя для оцінки потенціалу

природної сукцесії та цілеспрямованих реабілітаційних дій.

Особливої уваги заслуговує інтеграція історико-культурної спадщини Великого Лугу у природоохоронні стратегії, що дозволяє розглядати його не лише як об'єкт біологічної, а й національної цінності. Перспектива відновлення природного ландшафту регіону може стати унікальним прикладом взаємодії природних процесів та цілеспрямованої людської діяльності у справі збереження довкілля.

Перспективи використання результатів дослідження. Зібрані у межах дослідження матеріали становлять цінну основу для практичної реалізації заходів з відновлення природного середовища на території колишнього Каховського водосховища. Отримані дані можуть бути використані для розробки науково обґрунтованих методичних рекомендацій щодо при-

родного відновлення флори, зокрема у частині добору видів для фіторекультиваци, моніторингу стану екосистем та оцінки їх сукцесійного потенціалу.

Окрім того, результати можуть слугувати інформаційною базою для створення нових природоохоронних об'єктів, таких як заказники, пам'ятки природи або регіональні ландшафтні парки. У контексті євроінтеграційних процесів України вони також сприятимуть реалізації положень Європейської стратегії біорізноманіття до 2030 року, зокрема у частині відновлення деградованих екосистем.

Значення дослідження виходить за межі суто екологічного аспекту, торкаючись і питань національної ідентичності, історичної пам'яті та культурного ландшафту, що робить його результати актуальними для міждисциплінарних досліджень і сталого розвитку території.

Література

1. Ancient settlements as natural heritage sites: the first occurrence dataset on vascular plant species from ancient settlements in the Lower Dnipro region (Ukraine) / P. Dayneko та ін. *Biodiversity Data Journal*. 2023. Т. 11. URL: <https://doi.org/10.3897/bdj.11.e99041> (дата звернення: 02.01.2025).
2. Dayneko P. Biomorphological structure of the flora of the ancient settlements of the Lower Dnipro. *Biologichni systemy*. 2020. Т. 12, № 2. С. 290–297. URL: <https://doi.org/10.31861/biosystems2020.02.290> (дата звернення: 02.04.2025).
3. Drivers of plant diversity in Bulgarian dry grasslands vary across spatial scales and functional-taxonomic groups / I. Dembicz та ін. *Journal of Vegetation Science*. 2020. URL: <https://doi.org/10.1111/jvs.12935> (дата звернення: 02.04.2025).
4. Gavrylyuk N., Matera M. «Late Scythian» or «Post-Scythian» Sites of the Lower Dnipro Region. *Archaeology*. 2016. № 4. С. 121–135. URL: <https://doi.org/10.15407/archaeologyua2016.04.121> (дата звернення: 02.04.2024).
5. Kotov M. The impact of the war on the distribution of animals and plants in Ukraine (a view from 1924). *Novitates Theriologicae*. 2023. Т. 2023, № 16. С. 144–147. URL: <https://doi.org/10.53452/nt1625> (дата звернення: 01.04.2025).
6. Дайнеко П. М. Систематична структура флори городищ Нижнього Придніпров'я. *Chornomorski Botanical Journal*. 2020. Т. 16, № 3. С. 230–239. URL: <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553x/2020-16-3-4> (дата звернення: 06.04.2025).
7. Загороднюк І.В. Степове фауністичне ядро Східної Європи: його структура та перспективи збереження. *Доповіді НАН України*. 1999. № 5. С. 203–210.
8. Кривульченко А.І. Олешківські піски як ієрархічно побудована природна система. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2019. Вип. 53. С. 197 – 209. URL: <https://doi.org/10.30970/vgg.2019.53.10666> (дата звернення: 06.04.2025).
9. На розі двох світів. Історична спадщина України та Литви на Херсонщині / С. Біляєва та ін. Київ : Гілея, 2018. 72 с.
10. Петроченко В.І. Природа Запорізького краю: довідник. Запоріжжя: Поліграф, 2009.
11. Щербак В.О. Великий Луг. В кн.: *Енциклопедія історії України*. Т. 1. Київ: Наукова думка, 2003. С. 466.

ЛІКАРСЬКІ РОСЛИНИ (ROSACEAE, ASTERACEAE, FABACEAE, APIACEAE) ОКОЛИЦЬ М. ЖИТОМИРА

Кононенко Р.О., Пацюк М.К.

Житомирський державний університет імені Івана Франка
вул. В. Бердичівська, 40, 10008, м. Житомир
kostivna@ukr.net

В околицях м. Житомира нами вивчено 48 видів лікарських рослин, які належать до 4-х родин (Rosaceae, Asteraceae, Fabaceae, Apiaceae) та 42 родів (*Filipendula*, *Crataegus*, *Sorbus*, *Potentilla*, *Fragaria*, *Rosa*, *Prunus*, *Aronia*, *Rubus*, *Agrimonia*, *Geum*, *Sanguisorba*, *Achillea*, *Echinacea*, *Solidago*, *Taraxacum*, *Arctium*, *Calendula*, *Inula*, *Tussilago*, *Artemisia*, *Matricaria*, *Cichorium*, *Centaurea*, *Bidens*, *Tanacetum*, *Gnaphalium*, *Helichrysum*, *Melilotus*, *Ononis*, *Trifolium*, *Robinia*, *Caragana*, *Astragalus*, *Securigera*, *Pisum*, *Lathyrus*, *Levisticum*, *Conium*, *Carum*, *Anethum*, *Daucus*). Це такі види рослин: *Filipendula vulgaris*, *Crataegus sanguinea*, *Sorbus aucuparia*, *Potentilla erecta*, *Argentina anserina*, *Fragaria vesca*, *Rosa canina*, *Prunus cerasus*, *Prunus avium*, *Prunus padus*, *Aronia melanocarpa*, *Rubus caesius*, *Rubus idaeus*, *Agrimonia eupatoria*, *Geum rivale*, *Sanguisorba officinalis*, *Achillea millefolium*, *Echinacea purpurea*, *Solidago virgaurea*, *Taraxacum officinale*, *Arctium lappa*, *Calendula officinalis*, *Inula helenium*, *Tussilago farfara*, *Artemisia absinthium*, *Matricaria recutita*, *Matricaria discoidea*, *Cichorium intybus*, *Centaurea cyanus*, *Bidens tripartita*, *Tanacetum vulgare*, *Gnaphalium uliginosum*, *Helichrysum arenarium*, *Melilotus officinalis*, *Ononis arvensis*, *Trifolium pratense*, *Trifolium repens*, *Robinia pseudoacacia*, *Caragana arborescens*, *Astragalus cicer*, *Securigera varia*, *Pisum sativum*, *Lathyrus pratensis*, *Levisticum officinale*, *Conium maculatum*, *Carum carvi*, *Anethum graveolens*, *Daucus carota*. Серед життєвих форм трапляються багаторічні, дворічні та однорічні рослини. Дуже часто трапляється 14 видів рослин, часто – 9, досить часто – 12, зрідка – 7, поодинокі – 6. Усі знайдені рослини багаті на вітаміни та мають лікувальні властивості. Червонокнижні види рослин у наших дослідженнях не реєструвалися. **Ключові слова:** лікарські рослини, Rosaceae, Asteraceae, Fabaceae, Apiaceae, м. Житомир.

Medicinal plants (Rosaceae, Asteraceae, Fabaceae, Apiaceae) in the vicinity of Zhytomyr city. Kononenko R., Patsyuk M.

We have studied 48 species of medicinal plants belonging to 4 families (Rosaceae, Asteraceae, Fabaceae, Apiaceae) and 42 genera (*Filipendula*, *Crataegus*, *Sorbus*, *Potentilla*, *Fragaria*, *Rosa*, *Prunus*, *Aronia*, *Rubus*, *Agrimonia*, *Geum*, *Sanguisorba*, *Achillea*, *Echinacea*, *Solidago*, *Taraxacum*, *Arctium*, *Calendula*, *Inula*, *Tussilago*, *Artemisia*, *Matricaria*, *Cichorium*, *Centaurea*, *Bidens*, *Tanacetum*, *Gnaphalium*, *Helichrysum*, *Melilotus*, *Ononis*, *Trifolium*, *Robinia*, *Caragana*, *Astragalus*, *Securigera*, *Pisum*, *Lathyrus*, *Levisticum*, *Conium*, *Carum*, *Anethum*, *Daucus*) in the vicinity of Zhytomyr city. This is such species: *Filipendula vulgaris*, *Crataegus sanguinea*, *Sorbus aucuparia*, *Potentilla erecta*, *Argentina anserina*, *Fragaria vesca*, *Rosa canina*, *Prunus cerasus*, *Prunus avium*, *Prunus padus*, *Aronia melanocarpa*, *Rubus caesius*, *Rubus idaeus*, *Agrimonia eupatoria*, *Geum rivale*, *Sanguisorba officinalis*, *Achillea millefolium*, *Echinacea purpurea*, *Solidago virgaurea*, *Taraxacum officinale*, *Arctium lappa*, *Calendula officinalis*, *Inula helenium*, *Tussilago farfara*, *Artemisia absinthium*, *Matricaria recutita*, *Matricaria discoidea*, *Cichorium intybus*, *Centaurea cyanus*, *Bidens tripartita*, *Tanacetum vulgare*, *Gnaphalium uliginosum*, *Helichrysum arenarium*, *Melilotus officinalis*, *Ononis arvensis*, *Trifolium pratense*, *Trifolium repens*, *Robinia pseudoacacia*, *Caragana arborescens*, *Astragalus cicer*, *Securigera varia*, *Pisum sativum*, *Lathyrus pratensis*, *Levisticum officinale*, *Conium maculatum*, *Carum carvi*, *Anethum graveolens*, *Daucus carota*. Life forms include perennial, biennial and annual plants. There are 14 plant species very often, 9 – often, 12 – quite often, 7 – occasionally, and 6 – singly. All the plants found are rich in vitamins and have medicinal properties. Red-listed plant species were not recorded in our surveys. **Key words:** medicinal plants, Rosaceae, Asteraceae, Fabaceae, Apiaceae, Zhytomyr city.

Постановка проблеми та актуальність дослідження. До лікарських рослин України належать близько 2219 видів [6-8], які трапляються в горах, лісах, степах, пустелях та болотах. Ці рослини містять речовини, що впливають на нервову й імунну системи та є регуляторами обміну речовин. В рослинах міститься цілий комплекс біологічно активних речовин, а саме: алкалоїди, сапоніни, флавоноїди, таніни, вітаміни, ефірні олії, лікувальні форми з яких позитивно впливають на різні системи органів людини (серцево-судинну, дихальну, травну, видільну та ін.). Більшість представників рослин мають антигіперліпідемічні, протизапальні, антиоксидантні, протимікробні, протипухлинні, гіпоглікемічні, седативні та спазмолітичні ефекти.

Рослини, які ми живасмо в їжу також мають лікувальні властивості. Лікарські рослини є основою сучасної та народної медицини й є об'єктом заготівлі сировини для профілактики та лікування хвороб. Причиною відсутності заготівлі сировини є незнання рослин своєї місцевості та низький рівень ботанічної грамотності. Оскільки флора м. Житомира має унікальний фонд лікарських рослин, метою нашої роботи є вивчити склад найпоширеніших видів лікарських рослин околиць м. Житомира.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Видовий склад лікарських рослин різних областей України, їх ботанічна характеристика та лікувальні властивості вказані в працях Мінарченко В. М., Гродзінського А. М., Довгополої І. Л., Клеpecь О. В., Байрак О. М., Сагайдак В. Р., Кречківської Г. В., Федорончука М. М. та ін. [1-4, 6-8, 11, 12, 14, 15].

Матеріал та методи дослідження. Дослідження проводили в 2024-2025 р.р. маршрутним методом в межах околиць м. Житомира. Всього закладено 65 облікових площ та 120 облікових ділянок. У вибраних точках здійснювали опис рослинності, на основі чого був складений флористичний конспект найбільш поширених видів лікарських рослин. Визначали рослини за [5, 13]. Складання списку видів рослин проводився таким чином: порядковий номер ділянки або маршруту; дата проведення дослідження; видова назва рослини; кількість представників окремого виду. Для встановлення частоти трапляння видів рослин використовували матеріали наведені в Червоній книзі України [16]. Життєві форми рослин визначали за [9,10].

Усі матеріали занесені до інформаційних таблиць, які створені в форматах MS Excel та MS Word.

Виклад основного матеріалу. Список найбільш поширених видів лікарських рослин околиць м. Житомира представлений нижче.

Родина Розові (Rosaceae)

Рід Гадючник (*Filipendula*)

Гадючник звичайний (*Filipendula vulgaris* Moench, 1794)

Рід Глід (*Crataegus*)

Глід криваво-червоний (*Crataegus sanguinea* Pall., 1784)

Рід Горобина (*Sorbus*)

Горобина звичайна (*Sorbus aucuparia* L., 1753)

Рід Перстач (*Potentilla*)

Перстач прямостоячий (*Potentilla erecta* Raeusch., 1797)

Перстач гусячий (*Argentina anserina* L., 1753)

Рід Суниці (*Fragaria*)

Суниці лісові (*Fragaria vesca* L., 1753)

Рід Шипшина (*Rosa*)

Шипшина собача (*Rosa canina* L., 1753)

Рід Слива (*Prunus*)

Вишня звичайна (*Prunus cerasus* L., 1753)

Вишня пташина, або черешня (*Prunus avium* L., 1753)

Черемха звичайна (*Prunus padus* L., 1753)

Рід Аронія (*Aronia*)

Горобина чорноплідна, або аронія (*Aronia melanocarpa* Michx., 1821)

Рід Ожина (*Rubus*)

Ожина сиза, або звичайна (*Rubus caesius* L., 1753)

Малина звичайна (*Rubus idaeus* L., 1753)

Рід Парило (*Agrimonia*)

Парило звичайне (*Agrimonia eupatoria* L., 1753)

Рід Гравілат (*Geum*)

Гравілат річковий (*Geum rivale* L., 1753)

Рід Родовик (*Sanguisorba*)

Родовик лікарський (*Sanguisorba officinalis* L., 1753)

Родина Айсторві (Asteraceae), або Складноцвіті (Compositae)

Рід Деревій (*Achillea*)

Деревій звичайний (*Achillea millefolium* L., 1753)

Рід Ехінацея (*Echinacea*)

Ехінацея пурпурова, або рудбекія (*Echinacea purpurea* L., 1753)

Рід Золотушник (*Solidago*)

Золотушник звичайний (*Solidago virgaurea* L., 1753)

Рід Кульбаба (*Taraxacum*)

Кульбаба лікарська, або звичайна (*Taraxacum officinale* L., 1753)

Рід Лопух (*Arctium*)

Лопух великий, або справжній (*Arctium lappa* L., 1753)

Рід Нагідки (*Calendula*)

Нагідки лікарські, або календула (*Calendula officinalis* L., 1753)

Рід Оман (*Inula*)

Оман високий (*Inula helenium* L., 1753)

Рід Підбіл (*Tussilago*)

Підбіл звичайний, або мати-й-мачуха (*Tussilago farfara* L., 1753)

Рід Полин (*Artemisia*)

Полин гіркий (*Artemisia absinthium* L., 1753)

Рід Ромашка (*Matricaria*)

Ромашка лікарська (*Matricaria recutita* L., 1753)

Ромашка пахуча (*Matricaria discoidea* DC., 1838)

Рід Цикорій (*Cichorium*)

Цикорій дикий, або петрові батоги (*Cichorium intybus* L., 1753)

Рід Волошка (*Centaurea*)

Волошка синя (*Centaurea cyanus* L., 1753)

Рід Череда (*Bidens*)

Череда трироздільна (*Bidens tripartita* L., 1753)

Рід Пижмо (*Tanacetum*)

Пижмо звичайне (*Tanacetum vulgare* L., 1753)

Рід Сухоцвіт (*Gnaphalium*)

Сухоцвіт багновий (*Gnaphalium uliginosum* L., 1753)

Рід Цмин (*Helichrysum*)

Цмин пісковий (*Helichrysum arenarium* Moench, 1794)

Родина Бобові (Fabaceae)

Рід Буркун (*Melilotus*)

Буркун лікарський (*Melilotus officinalis* L., 1779)

Рід Вовчуг (*Ononis*)

Вовчуг польовий (*Ononis arvensis* L., 1759)

Рід Конюшина (*Trifolium*)

Конюшина лучна, або червона (*Trifolium pratense* L., 1753)

Конюшина повзуча, або біла (*Trifolium repens* L., 1753)

Рід Робінія (*Robinia*)

Робінія звичайна (*Robinia pseudoacacia* L., 1753)

Рід Жовта акація (*Caragana*)

Жовта акація деревна (*Caragana arborescens* L., 1785)

Рід Астрагал (*Astragalus*)

Астрагал нутовий (*Astragalus cicer* L., 1753)

Рід В'язіль (*Securigera*)
 В'язіль барвистий (*Securigera varia* Lassen, 1989)
 Рід Горох (*Pisum*)
 Горох посівний (*Pisum sativum* L., 1753)
 Рід Чина (*Lathyrus*)
 Чина лучна (*Lathyrus pratensis* L., 1753)
Родина Окружкові (Аріасеае)
 Рід Любисток (*Levisticum*)
 Любисток лікарський (*Levisticum officinale* W.D.J.Koch, 1824)
 Рід Болиголов (*Conium*)
 Болиголов плямистий (*Conium maculatum* L., 1753)
 Рід Кмин (*Carum*)
 Кмин звичайний (*Carum carvi* L., 1753)
 Рід Кріп (*Anethum*)

Кріп запашний, або пахучий (*Anethum graveolens* L., 1753)

Рід Морква (*Daucus*)

Морква звичайна, або дика (*Daucus carota*)

Родина Rosaceae представлена 16 видами рослин, родина Asteraceae – 17, родина Fabaceae – 10, родина Аріасеае – 5.

Серед життєвих форм трапляються багаторічні (35 видів), дворічні (5 видів) та однорічні (8 видів) рослини. Дуже часто трапляється 14 видів рослин, часто – 9, досить часто – 12, зрідка – 7, поодинокі – 6 (табл. 1).

Усі види рослин, які зареєстровані нами в ході дослідження багаті на вітаміни, використовуються в медицині та промисловості. Червонокнижні види відсутні.

Таблиця 1

Лікарські рослини околиць м. Житомира

№ п/п	Вид рослини	Життєва форма	Поширення	Частота трапляння
1.	Гадючник звичайний	багаторічна	біля доріг та каналів	часто
2.	Глід криваво-червоний	багаторічна	як декоративна рослина в садах	зрідка
3.	Горобина звичайна	багаторічна	ліси, чагарники	часто
4.	Перстач прямостоячий	багаторічна	біля боліт, вологі луки	дуже часто
5.	Перстач гусячий	багаторічна	узлісся, чагарники	досить часто
6.	Суниці лісові	багаторічна	узлісся, ліси, чагарники	досить часто
7.	Шипшина собача	багаторічна	уздовж доріг, узлісся	досить часто
8.	Вишня звичайна	багаторічна	сади, палісадки	дуже часто
9.	Вишня пташина, або черешня	багаторічна	полезахисні смуги	зрідка
10.	Черемха звичайна	багаторічна	підлісок, чагарники, ліси	досить часто
11.	Горобина чорноплідна, або аронія	багаторічна	поодинокі посадки	поодинокі
12.	Ожина сиза, або звичайна	багаторічна	берег річки, на вирубках	зрідка
13.	Малина звичайна	багаторічна	підлісок, галявини	досить часто
14.	Парило звичайне	багаторічна	чагарники, узлісся, луки	дуже часто
15.	Гравілат річковий	багаторічна	вологі луки, берег річки	поодинокі
16.	Родовик лікарський	багаторічна	узлісся, берег річки	поодинокі
17.	Деревій звичайний	багаторічна	галявини, чагарники, уздовж доріг	дуже часто
18.	Ехінацея пурпурова, або рудбекія	багаторічна	декоративна рослина в садах	зрідка
19.	Золотушник звичайний	багаторічна	чагарники, кам'янисті відслонення	часто
20.	Кульбаба лікарська, або звичайна	багаторічна	луки, на полях, чагарники	дуже часто
21.	Лопух великий, або справжній	дворічна	сади, уздовж доріг, берег річки, ліси	часто
22.	Нагідки лікарські, або календула	однорічна	декоративна рослина в садах	досить часто
23.	Оман високий	багаторічна	чагарники	поодинокі
24.	Підбіл звичайний, або мати-й-мачуха	багаторічна	на схилах, берег річки	досить часто
25.	Полин гіркий	багаторічна	уздовж доріг	зрідка
26.	Ромашка лікарська	однорічна	уздовж доріг	досить часто
27.	Ромашка пахуча	однорічна	уздовж доріг, луки, берег річки	часто
28.	Цикорій дикий, або петрові батоги	багаторічна	засмічені місця, біля каналів, чагарники	дуже часто
29.	Волошка синя	однорічна	уздовж доріг, луки	досить часто
30.	Черета трироздільна	однорічна	луки, берег річки	досить часто
31.	Пижмо звичайне	багаторічна	галявини, чагарники, уздовж доріг, луки	дуже часто

Продовження таблиці 1

№ п/п	Вид рослини	Життєва форма	Поширення	Частота трапляння
32.	Сухоцвіт багновий	однорічна	заплавні, галявини	досить часто
33.	Цмин пісковий	багаторічна	ліси, галявини	дуже часто
34.	Буркун лікарський	дворічна	уздовж доріг, канами, схили балок	часто
35.	Вовчуг польовий	багаторічна	луки, чагарники, берег річки	досить часто
36.	Конюшина лучна, або червона	багаторічна	узлісся, чагарники, заплавні луки	дуже часто
37.	Конюшина повзуча, або біла	багаторічна	узлісся, чагарники, схили	дуже часто
38.	Робінія звичайна	багаторічна	полезахисні смуги, уздовж доріг	зрідка
39.	Жовта акація деревна	багаторічна	підлісок, лісосмуги	поодинокі
40.	Астрагал нутовий	багаторічна	лісові галявини, чагарники	часто
41.	В'язіль барвистий	багаторічна	чагарники, узлісся, луки	часто
42.	Горіх посівний	однорічна	городня культура	дуже часто
43.	Чина лучна	багаторічна	луки, узлісся, чагарники	часто
44.	Любисток лікарський	багаторічна	як декоративна рослина в садах	поодинокі
45.	Болитолов плямистий	дворічна	узлісся, лісові галявини	дуже часто
46.	Кмин звичайний	дворічна	луки, узлісся	дуже часто
47.	Кріп запашний, або пахучий	однорічна	городня культура	дуже часто
48.	Морква звичайна, або дика	дворічна	уздовж доріг, чагарники, луки	зрідка

Висновки. Таким чином, в околицях м. Житомира нами вивчено 48 видів найпоширеніших лікарських рослин, із них: 16 видів – з родини Rosaceae, 17 видів – Asteraceae, 10 видів – Fabaceae, 5 видів – Apiaceae. 35 видів рослин значно поширені в м. Житомирі (дуже часто, часто, досить часто) й мають необмежений ресурсний потенціал для використання; 7 видів трапляються фрагментарно (зрідка) й мають обмежений ресурсний потенціал для використання; 6 видів – поодинокі (збирання таких рослин у місцях їх зростання необхідно обмежити). Червонокнижні

види рослин у наших дослідженнях не реєструвалися.

Перспективи подальших досліджень. Встановлення видового складу лікарських рослин різних регіонів України, вивчення їх хімічних властивостей із залученням сучасних фізико-хімічних методів дослідження, сприятиме розробці сучасних фітопрепаратів для лікування та профілактики багатьох захворювань людини і тварин. Необхідна розробка системи заходів щодо охорони рідкісних та зникаючих видів лікарських рослин.

Література

- Байрак О. М., Стецюк Н. О. Атлас рідкісних і зникаючих рослин Полтавщини. Полтава : Верстка, 2008. 248 с.
- Довгопола І. Л. Лікарські рослини природної флори Переяславщини. Біорізноманіття, екологія та експериментальна біологія. 2020. Том 22, № 1. С. 27-38.
- Клепець О. В. Лікарські рослини водної флори м. Полтави та околиць. Біологія і екологія. 2022. Том 8, № 2. С. 51-65.
- Кречківська Г. В., Монастирська С. С., Волошанська С. Я. Видовий склад та ресурсна характеристика деяких видів лікарських рослин гірської місцевості Дрогобицького району. Науковий часопис Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова. Серія 20. Біологія. 2013. С. 10-20.
- Лікарські рослини : Енциклопедичний довідник / відп. ред. А. М. Гродзінський. Київ, 1992. 544 с.
- Мінарченко В. М., Тимченко І. А. Атлас лікарських рослин України. Київ, 2002. 172 с.
- Мінарченко В. М. Лікарські судинні рослини України (медичне та ресурсне значення). Київ, 2005. 323 с.
- Мінарченко В. М. Лікарські рослини України. Енциклопедія Сучасної України: електронний ресурс / редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2016.
- Морозюк С. С., Протопопова В. В. Трав'янисті рослини України: Навчальний посібник. Тернопіль: Навчальна книга. Богдан. 2007. 216 с.
- Мусієнко М. М. Екологія рослин. Підручник. Київ: Либідь. 2006. 432 с.
- Решетюк О. В., Терлецький В. К., Філіпенко А. Б. Лікарські рослини Полісся з основами фітотерапії. Луцьк : Твердиня, 2007. 190 с.
- Сагайдак В. Р., Перерва В. М., Голя Л. М., Харченко Л. П., Дяченко-Богун М. М. Лучні лікарські рослини околиць селища Голобородьківське Полтавського району Полтавської області. Біологія і екологія. 2022. Том 8, № 2. С. 82-92.
- Сафонов М. М. Повний атлас лікарських рослин. Тернопіль : Навчальна книга Богдан, 2010. 384 с.
- Федорончук М. М. Чекліст флори України. 2: родина Fabaceae (Fabales, Angiosperms). Чорноморський ботанічний журнал. 2022. № 18(2). С. 97-138. <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2022-18-2-1>
- Федорончук М. М. Чекліст флори України. 4: родина Rosaceae (Rosales, Angiosperms). Чорноморський ботанічний журнал. 2022. № 18(4). С. 305-349. <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2022-18-4-1>
- Червона книга України. Рослинний світ / за ред. Я.П. Дідуха. К.: Глобалконсалтинг. 2009. 900 с.

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Краснов В.П.,
Можарівська І.А., Іванюк Р.О., Весельський О.О.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
org_vvm@ztu.edu.ua

У статті здійснено комплексний аналіз екологічного стану лісових екосистем України в умовах воєнного часу, кліматичних змін та управлінських викликів. Основну увагу приділено вивченню використання лісових ресурсів, проблем незаконної вирубки, наслідків військових дій, лісових пожеж, поширення хвороб та шкідників, а також аналізу відтворення лісів. Українські ліси, що займають 15,9 % території країни, стикаються з комплексом екологічних, економічних та управлінських проблем, які поглибилися в умовах невизначеності та воєнних дій. Найбільш лісистими є Полісся (26,8 %) та Українські Карпати (42 %). Проте, значна частина лісів потерпає від незаконних рубок, які у 2022 році на неокупованих територіях сягнули 20,6 тис. м³. Це призводить до деградації ґрунтів, зміни мікроклімату та втрати біорізноманіття.

Особливо руйнівний вплив мають військові дії, внаслідок яких понад 30 % лісів пошкоджено. Знищено та випалено ракетами й снарядами понад 59 тис. га, а близько 500 тис. га потребують розмінування. Це унеможливорює господарську діяльність, обмежує доступ до лісів та позбавляє населення культурних та ресурсних екосистемних послуг. Лісові пожежі, спричинені як військовими діями (48 %), так і порушенням правил пожежної безпеки, становлять серйозну загрозу, охоплюючи тисячі гектарів. Проблеми також загострюються через радіоактивне забруднення лісів Чорнобильської зони, а також зміни клімату, що сприяють поширенню шкідників та хвороб лісу. Площа осередків шкідників та хвороб зросла у 1,5 рази у порівнянні з 2010 роком, що призводить до значної загибелі лісових насаджень, як, наприклад, 12390 га у 2022 році, майже половина з яких припала на Житомирську область.

Недостатнє фінансування та застаріле управління гальмують розвиток лісової галузі, інвестиції у лісовідновлення, моніторинг та впровадження сучасних технологій. Незважаючи на це, у 2022 році лісовідновлення проведено на площі 32,3 тис. га, переважно шляхом штучного садіння та висівання лісу. Найбільші обсяги відтворення зафіксовані у Волинській, Житомирській, Чернігівській та Рівненській областях.

Для сталого, екологічно орієнтованого ведення лісового господарства необхідно вдосконалити систему управління лісовими ресурсами, що поєднуватиме економічну доцільність, екологічну відповідальність та соціальну справедливість. Це включає відновлення пошкоджених лісів, перехід до природозберігаючих рубок, зміцнення лісового моніторингу, збереження біорізноманіття, адаптацію лісів до змін клімату, розвиток лісової освіти та міжнародну співпрацю. Такий комплексний підхід дозволить подолати виклики та забезпечити довготривалу екологічну й ресурсну стабільність лісів України. *Ключові слова:* лісове господарство, лісові ресурси, вирубка, хвороби, шкідники, військові дії, екосистемні послуги, кліматичні зміни, охорона лісів.

Environmental safety of forest ecosystems in the minds of investigation. Melnyk-Shamrai V., Shamrai V., Krasnov V., Mozharivska I., Ivaniuk R., Veselskyi O.

The article provides a comprehensive analysis of the ecological state of Ukraine's forest ecosystems in wartime, climate change, and management challenges. The focus is on studying the use of forest resources, the problems of illegal logging, the consequences of military operations, forest fires, the spread of diseases and pests, and the analysis of forest regeneration. Ukrainian forests, which occupy 15.9 % of the country's territory, face a complex of ecological, economic, and management problems that have deepened in conditions of uncertainty and military operations. The most forested are Polissya (26.8 %) and the Ukrainian Carpathians (42 %). However, a significant part of the forests suffers from illegal logging, which in 2022 in unoccupied territories reached 20.6 thousand m³. This leads to soil degradation, changes in the microclimate, and loss of biodiversity.

Military operations have a particularly destructive impact, because of which more than 30% of forests have been damaged. More than 59 thousand hectares have been destroyed and burned by missiles and shells, and about 500 thousand hectares need to be demined. This makes economic activity impossible, limits access to forests and deprives the population of cultural and resource ecosystem services. Forest fires, caused by both military actions (48%) and violations of fire safety rules, pose a serious threat, covering thousands of hectares.

The problems are also exacerbated by radioactive contamination of forests in the Chernobyl zone, as well as climate change, which contributes to the spread of forest pests and diseases. The area of pest and disease foci has increased 1.5 times compared to 2010, which leads to significant loss of forest stands, such as, for example, 12,390 hectares in 2022, almost half of which fell on the Zhytomyr region.

Insufficient funding and outdated management hinder the development of the forest sector, investments in reforestation, monitoring and implementation of modern technologies. Despite this, in 2022, reforestation was carried out on an area of 32.3 thousand hectares, mainly through artificial planting and seeding of forests. The largest volumes of reproduction were recorded in Volyn, Zhytomyr, Chernihiv and Rivne regions.

For sustainable, environmentally friendly forestry management, it is necessary to improve the forest resource management system, which will combine economic feasibility, environmental responsibility and social justice. This includes the restoration of damaged forests, the transition to conservation logging, strengthening forest monitoring, preserving biodiversity, adapting forests to climate change, developing forest education and international cooperation. Such a comprehensive approach will allow overcoming challenges and ensuring long-term ecological and resource stability of Ukrainian forests. *Key words:* forestry, forest resources, logging, diseases, pests, military actions, ecosystem services, climate change, forest protection.

Постановка проблеми. За даними Державного агентства лісових ресурсів України [1] лісистість України становить 15,9 %. Розподіл лісів по території країни дуже нерівномірний, найбільш лісистою є територія Полісся (26,8 %) та Українських Карпат (42 %). Сьогодні лісогосподарські господарства стикаються з комплексом екологічних, економічних, управлінських та соціальних проблем, які у сучасних умовах невизначеності зазнали ще більш загрозливого стану. Нинішня ситуація щодо деградації лісових екосистем є не лише екологічною катастрофою, а й загрожує сталому розвитку держави в цілому. Тому необхідно вжити невідкладних заходів для посилення контролю за веденням лісового господарства, реформування лісової галузі, відкритого обліку деревини, громадського моніторингу та правової відповідальності. Саме тому, для пошуку шляхів щодо сталого, екологічно орієнтованого ведення лісового господарства необхідно вивчити особливості використання лісових ресурсів та запропонувати шляхи оптимізації лісористування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Лісові екосистеми відіграють надзвичайно важливу роль та забезпечують екологічну рівновагу, економічну стійкість та якість життя. Їх збереження та сталий розвиток є необхідною умовою майбутнього екологічно безпечного суспільства. Проте, ліси країни потерпають від ряду проблем. До основних проблем лісових екосистем можна віднести: незаконні рубки, пошкодження та знищення лісів внаслідок військових дій, пожежі, радіоактивне забруднення, недостатнє фінансування та застаріле управління лісами, низький рівень лісистості та лісовідновлення, кліматичні зміни, які є основною причиною поширення шкідників та хвороб.

Незаконні рубки лісів, особливо на заході країни, призводять до втрати ряду екологічних функцій лісових екосистем (підвищується ерозія та деградація ґрунтів, змінюється мікроклімат, погіршується якість повітря та стан водних ресурсів), знищується біологічне різноманіття, спостерігається недоотримання коштів до бюджету за рахунок нелегальної лісозаготівлі. Так, в 2022 р. на неокупованих територіях зареєстровано 3406 випадків незаконних рубок об'ємом 20,6 тис. м³. Найбільші обсяги незаконних рубок виявлено в таких областях: Дніпропетровська 6840 м³, Харківська 3496 м³, Закарпатська 2343 м³, Київська область 1856 м³ [2].

Значний негативний вплив на лісові екосистеми спричиняють військові дії. Вплив проявляється за рахунок використання артилерійських та авіаційних снарядів, пожеж, забрудненні та засміченні лісів, несанкціонована заготівлі деревини, замінуванні території вибухонебезпечними предметами [3–5]. Встановлено, що понад 30,0 % лісів зазнали різного пошкодження. Так, понад 59 тис. га лісів та інших насаджень знищено та випалено ракетами і снарядами, їх відновлення триватиме протягом кількох

десятироків [6]; 2,9 млн га лісів мають різні рівні пошкодження; 1 млн га лісів розташовано в окупованій зоні, а понад 500 тис. га потребують розмінування [7]. За інформацією Міндовкілля, орієнтовна сума збитків, завданих українським лісам, складає близько 500 млн доларів, але ці дані потребують уточнення, оскільки поки що ми не маємо доступу до всіх лісів [8].

Лісові пожежі в Україні становлять одну з найнебезпечніших екологічних загроз, особливо в умовах змін клімату та воєнних дій [9, 10]. За результатами досліджень [4] в перші місяці повномасштабного вторгнення відбулася основна маса пожеж на територіях де велися військові дії, 67,0 % цих пожеж припали на березень.

З часу аварії на Чорнобильській АЕС минуло майже 40 років, але й досі лісові екосистеми залишаються вразливими територіями, не яких не проводиться належне ведення лісогосподарських заходів. В ряді публікацій розглядаються сучасні рівні радіоактивного забруднення ресурсів лісу. Так, вченими вивчено сучасний вміст радіонуклідів в дикорослих ягодах, грибах та лікарських рослинах [11, 12, 15, 17–19], досліджено закономірності розподілу питомої активності ¹³⁷Cs в деревних породах [13, 14] та вивчено санітарний стан лісів на радіоактивно забруднених територіях [16, 20–23].

Лісові екосистеми стикаються з рядом проблем, що пов'язані з кліматичними змінами. Так, підвищення середньорічних температур призводить до створення несприятливих умов для розвитку деревних порід, і як наслідок змінюється видовий склад лісів [31, 33, 35–37], підвищується розмноження інвазійних комах та грибкових інфекцій [24, 25], зростає кількість лісових пожеж [29, 32, 34], зменшується поглинають CO₂ [26–28].

Ключовими проблемами лісової галузі й досі є недостатнє фінансування, застаріле управління лісами, низький рівень лісистості та слабе лісовідновлення, які значно ускладнюють забезпечення сталого розвитку та екологічної безпеки. Відсутність належної фінансової підтримки гальмує інвестиції в лісовідновлення, моніторинг та інвентаризацію лісів, що не дає можливості впроваджувати сучасні технології лісогосподарських робіт і ефективно реагувати на виклики сучасності.

Лісові ресурси мають досить поширене використання та є додатковим джерелом фінансування населення, що в сучасних умовах набуває особливої соціально-економічної значущості. В умовах воєнного стану, економічної нестабільності та зростання безробіття лісові ресурси часто стають критично важливими для виживання місцевих громад, забезпечуючи не лише паливо чи продукти харчування (гриби, ягоди), а й джерело додаткового заробітку. Водночас зростає роль збірної, заготівельної та переробної діяльності в межах локальних ініціатив. У багатьох сільських районах заготівля та реа-

лізація другорядної лісової продукції (дикорослих ягід, лікарських рослин, деревини) стає фактичною формою самозайнятості. За умов правильно організованої та легалізованої діяльності лісові ресурси можуть бути потужним інструментом місцевого розвитку, зміцнення економіки та підтримки екологічного балансу. Вивчення особливостей використання лісових ресурсів є необхідним для належної організації ефективного лісокористування та сприятиме сталому розвитку лісових екосистем.

Метою статті є вивчення особливостей використання лісових ресурсів в Україні, а також пошук шляхів щодо сталого екологічно орієнтованого ведення лісового господарства. Об'єктом досліджень є лісові екосистеми. Предмет досліджень – закономірності використання лісових ресурсів у контексті сталого розвитку та екологічних загроз.

Новизна отриманих результатів полягає в тому, що отримано теоретичні відомості щодо сучасного використання лісових ресурсів в Україні та розглянуті шляхи для сталого екологічно орієнтованого ведення лісового господарства. Результати дослідження можуть бути використані лісгосподарськими підприємствами для організації виробничо-фінансової діяльності та впровадження інноваційних технологій у професійну діяльність.

Методика досліджень. Дослідження проводилися шляхом збирання інформації з статистичних щорічників щодо охорони та використання лісових ресурсів, опрацювання літературних джерел, інтернет-ресурсів та розробки пропозицій щодо сталого ведення лісового господарства в умовах невизначеності.

Виклад основного матеріалу. Аналізуючи основні показники ведення лісового господарства в Україні можна відмітити, що площа рубок лісу

в 2020 році становила 382 тис. га, що несуттєво менше в порівнянні з 2010 роком (402,2 тис. га). При вивченні площі рубок лісу в залежності від видів рубок (рис. 1) встановлено, що майже 89,0 % рубок припадає на рубки формування і оздоровлення лісів, де 67,0 % становлять санітарні рубки. Частка рубок головного користування становить лише 8,0 %, де переважають суцільні рубки на площі – 25,6 га в 2020 році. Рубки догляду в 2020 році скоротилися в двічі при порівнянні з 2010 роком, і становлять 46,5 га, де рубки проріджування та прохідні становлять – 40,5 га.

Аналіз заготівлі деревини за системами та видами рубок свідчить, що в 2022 році було заготовлено деревини – 15934,3 тис. м³ (табл. 1). Основна частка деревини 59,3 % була заготовлена за рахунок проведення рубок формування та оздоровлення лісів, що підтверджує отримані вище результати досліджень. При вивченні даних про заготівлю деревини за видами лісової продукції встановлено, що в 2022 році обсяги заготівлі круглого лісу становили 150815,1 тис. м³, де частка ділової деревини становить – 6395,8 тис. м³, з них 4823,3 тис. м³ – хвойні породи та 1572,5 тис. м³ – листяні породи. Майже 58,0 % припадає на заготівлю деревини в якості паливної, а частка неліквідної деревини – 5,6 %. Варто відмітити, що в 2022 році загальна кількість реалізованої лісової продукції становила 15360,1 тис. м³ на суму 20476,0 млн. грн. Так, ділова деревина хвойних порід мала середню ціну від реалізації одиниці лісової продукції 1836,1 грн/м³, листяних порід 3962,2 грн/м³, а паливна деревина коштувала 585,2 грн/м³.

При вивченні заготівлі деревини за видами лісової продукції за регіонами в 2022 році (рис. 2) відмічено, що найбільші обсяги заготівлі спостерігаються

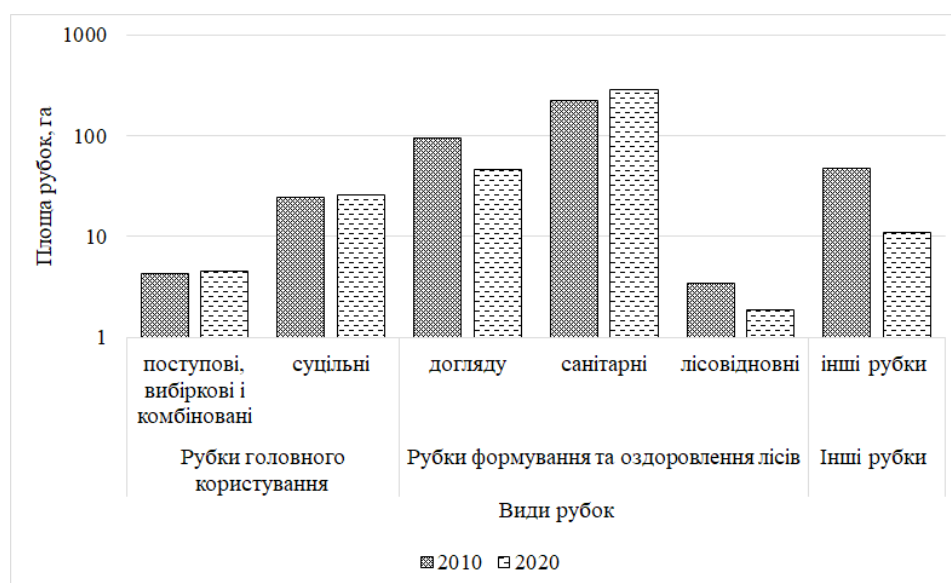


Рис. 1. Площа рубок лісу за системами та видами рубок

Джерело: побудовано авторами на основі аналізу [38]

в найбільш лісистих регіонах країни, що є цілком закономірним. Найбільші обсяги заготівлі круглої деревини відмічено в Житомирській області – 2410 тис. м³, де понад 50 % це деревина в якості паливної. Також значні обсяги понад 1000 тис. м³ відмічено в Київській, Львівській, Рівненській, Волинській та Чернігівських областях. Найменші обсяги заготівлі відмічені на півдні та південному сході країни, що пов'язано з низьким рівнем лісистості та військовими діями.

Таблиця 1

Кількість заготовленої деревини залежно від системи рубок	2010	2015	2022
	тис. м ³		
Рубки головного користування	7767,5	9097,7	6298,9
– поступові, вибіркові, комбіновані	751,6	935,4	617,1
– суцільні	7015,9	8162,3	5681,8
Рубки формування та оздоровлення лісів	10223,2	12702,7	9511,6
– рубки догляду:	1734,7	1680,5	2226,9
– освітлення	146,7	182,4	2,9
– очищення	193,5	261,7	29,8
– проріджування	393,5	346,5	266,8
– прохідні	1000,8	889,9	1927,4
– санітарні	7300,0	10204,8	6642,1
– лісовідновні	645,9	260,8	91,9
– переформування	33,9	16,4	324,7
– реконструктивні	30,7	5,5	7,6
– ландшафтні	2,6	8,5	1,0
Інші рубки	475,4	526,2	217,4

Джерело: створено авторами на основі аналізу [38]

Аналіз заготівлі деревини за породним складом деревостанів свідчить, що абсолютним лідером серед заготівлі деревини в Україні є сосна звичайна (7368,6 тис. м³), що підтверджується її високою часткою в українських лісах та попитом в деревообробній промисловості. Ялина також має значний показник – 1449,1 тис. м³, що свідчить про активну експлуатацію лісів Карпатського регіону. Серед твердолистяних порід найбільше використовується деревина дуба – 1904,2 тис. м³ та бука – 935,2 тис. м³, це вказує на високий попит на цінні породи деревини, які використовуються в меблевій промисловості, будівництві тощо. М'яколистяні породи переважно використовуються для целюлозно-паперової промисловості, фанери, паливних гранул, і зазвичай використовуються такі деревні породи як береза, вільха та осика, обсяг коливається від 363,0 до 700 тис. м³.

Важливим напрямком діяльності лісгосподарських підприємств та установ є здійснення комплексу організаційних та практичних заходів щодо захисту лісів від шкідників, хвороб та інших негативних впливів в сучасних умовах. Нами було здійснено, аналіз причин за якими були спричиненні загибелі лісових насаджень (рис. 3). У 2022 році всього по Україні за різних причин загинуло лісових насаджень на площі 12390 га. Найбільш поширеною причиною загибелі лісових насаджень є лісові пожежі, шкідники та хвороби.

Протягом останніх років відмічено зростання площі осередків шкідників та хвороб лісу. Так, площа нових осередків шкідників лісу в 2010 році становила 46669 га, а в 2022 році площа поширення шкідників зросла в 1,5 разів та становить – 72248 га.

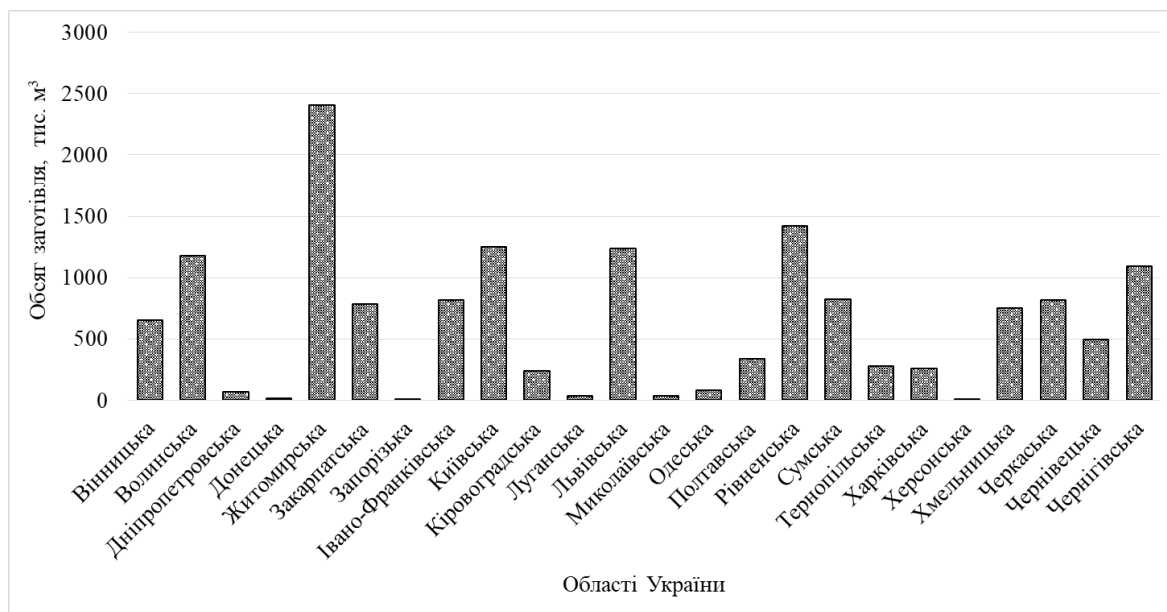


Рис. 2. Заготівля круглого лісу за регіонами

Джерело: побудовано авторами на основі аналізу [38]

Подібні закономірності відмічені і для виявлення осередків хвороб лісу. Так, в 2022 році площа становить 99144 га, що в 1,5 рази більше в порівнянні з 2010 роком.

Аналізуючи розподіл лісових пожеж за областями України [39], можна відмітити, що найбільша їх кількість у Харківській (площа лісів, що зазнали впливу 204,3 га), Київській (54,8 га), Миколаївській (151,6 га), Чернігівській (46,2 га), Дніпропетровській (51,7 га). Причинами таких пожеж в 2023 році були: військові дії (48 %), порушенням правил пожежної безпеки в лісах населенням (42 %) та інші причини (10 %). За 9 місяців 2024 року виявлено 1828 лісових пожеж на площі 23041,3 га.

Також нами було проаналізовано загибель лісових насаджень по регіонах України (рис. 4). Відмічено, що в 2022 році на площі 12390 га спостерігалась загибель лісових насаджень. Майже 50 % від загальної частки загибелі лісових насаджень припадає на Житомирську область, що пов'язано з значним поширенням шкідників та хвороб в даній області.

Російська військова агресія створює серйозні загрози для лісових ресурсів України. Через обстріли, мінування, вибухи боєприпасів, хаотичну заготовку деревини для військових цілей і спорудження фортифікаційних укріплень окупаційними силами порушується цілісність і стійкість лісових екосистем [3]. Внаслідок такого негативного впливу на лісові екосистеми екосистемні послуги можуть знижуватися, або взагалі можуть бути втраченими. Так, за перші 2 місяці війни [4] було понад 2036 лісових пожеж, що охопили площу понад 1 млн 72 тис. га.

Такі втрати лісових масивів сприятимуть створенню більш посушливих та вітряних умов, а також підвищать середньорічні температури. Як наслідок, суспільство не зможе користуватися рядом підтримуючих та регулюючих екосистемних послуг, які забезпечували ліси.

Відповідно до результатів досліджень [4] внаслідок військових дій на території України впливу зазнали 114 державних лісгосподарських підприємств, 20 агропідприємств, 14 комунальних та 12 інших лісокористувачів та власників лісів. Найбільші лісові масиви, що потрапили до зон підвищеного ризику внаслідок військових дій, знаходяться в Чернігівській (423,5 тис. га), Сумській (287,9 тис. га) та Луганській (205,1 тис. га) областях (рис. 5).

Ліси широко використовуються населенням для відпочинку, туризму, досліджень, а також мають історичне та духовне значення. Внаслідок повномасштабної війни в Україні значна частина лісів зазнала мінування. Наприклад, в Чернігівській області потенційно можуть бути забруднені вибухонебезпечними предметами – 249570,8 га лісів [4]. Такі території стають зонами підвищеного ризику, що робить неможливим відвідування лісів та парків та обмежує можливість отримання культурних екосистемних послуг. Варто відмітити, що на забруднених вибухонебезпечними предметами територіях лісах господарська діяльність припиняється або обмежується, і як наслідок стає недоступним отримання послуг забезпечення – деревини, грибів, ягід та лікувальної сировини.

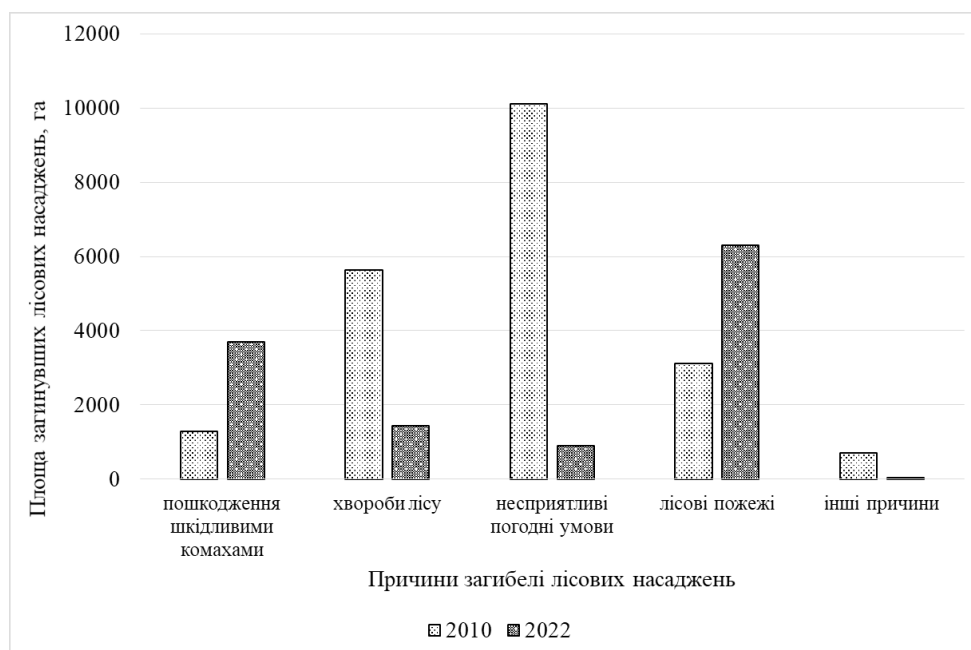


Рис. 3. Площа загибелі лісових насаджень за причинами

Джерело: побудовано авторами на основі аналізу [38]

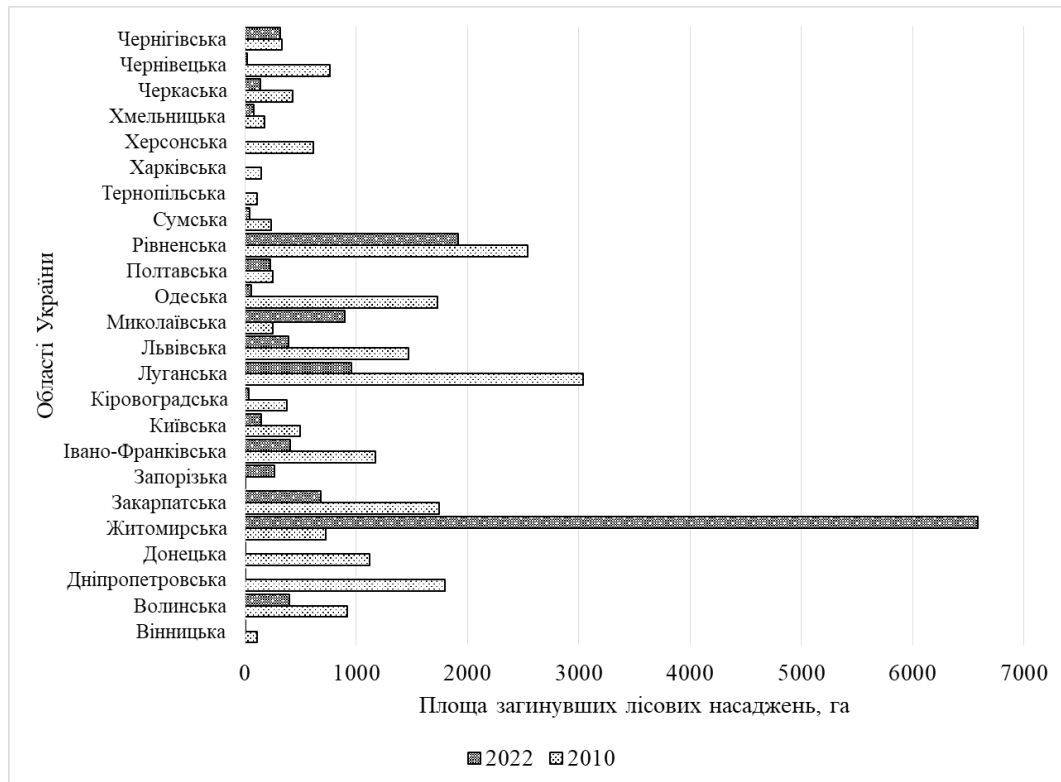


Рис. 4. Площа загибелі лісових насаджень за регіонами

Джерело: побудовано авторами на основі аналізу [38]

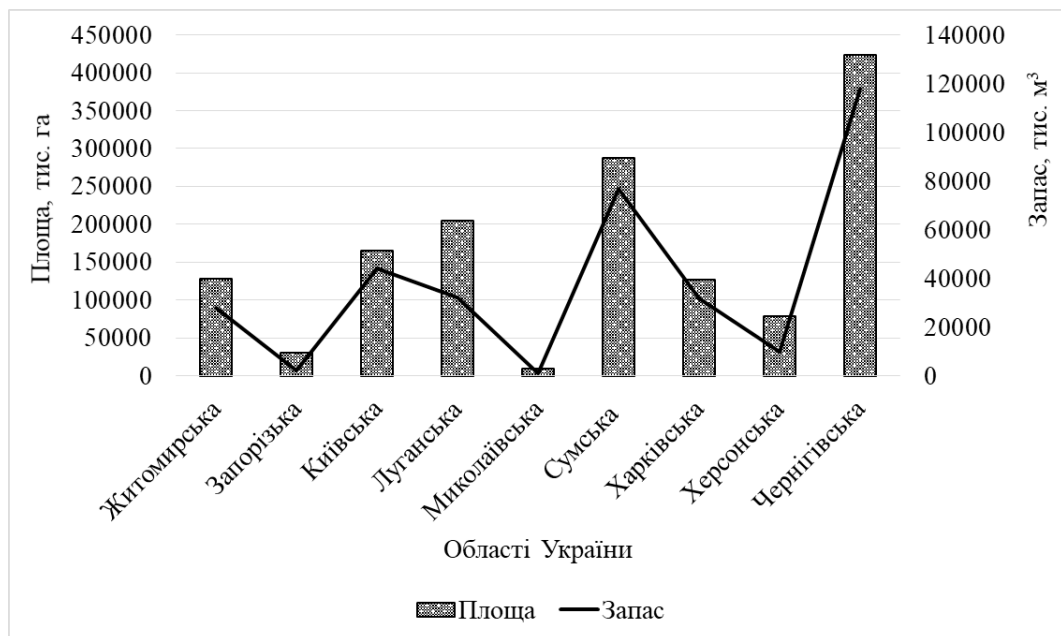


Рис. 5. Розподіл площі та запасу вкритих лісом ділянок, які опинилися в зоні впливу військових дій в Україні

Джерело: побудовано авторами на основі аналізу [4]

Заготівля другорядної лісової продукції (табл. 2) в Україні демонструє нерівномірну динаміку, що залежить від попиту, доступності, воєнних умов та

сезонності ресурсів. Найбільший попит зберігається на ягоди, лікарські рослини та гриби, тоді як інші продукти поступово втрачають економічне значення.

Таблиця 2

Заготівля другорядної лісової продукції, т

Другорядна сировина	2010	2015	2022
Кора	3	6	30,8
Дикорослі плоди	121	71	22
Гриби	474	68	499
Ягоди	5731	3325	3379
Длікарські рослини	211	125	592
Деревні соки	2909	2390	210
Сіно	2388	1142	301
Горіхи	23	35	25
Деревна зелень	14	30	42

Джерело: створено авторами на основі аналізу [38]

Відтворення лісів у 2022 році проведено на площі 32,3 тис. га, що становить 108,6 % до завдання, в тому числі висівання і садіння лісу – 24,0 тис. га (119,6 % до завдання), з яких 1,8 тис. га лісорозведення (73,1 % до завдання) та 8,3 тис. га природного поновлення, що становить 25,8 % від обсягу відтворення лісів. Так, у 2022 році в лісових розсадниках вирощено – 205,3 млн шт. стандартного садивного матеріалу (сіянців головних та супутніх лісоутворюючих порід), а саме: сосна звичайна, сосна Палласа, ялина європейська, модрина, дуб звичайний, ясен звичайний, бук, липа, клен, береза, вільха та інші [40]. Відтворення лісів здійснюється шляхом відновлення лісів (на лісових ділянках, що були вкриті лісовою рослинністю) та лісорозведення на землях що раніше не були зайняті лісом - малопродуктивні та деградовані. Найбільш сприятливі погодні умови для відтворення лісів – навесні та восени. Відтворення лісів здійснюється в максимально короткі строки для формування високопродуктивних та біологічно стій-

ких деревостанів різного цільового призначення та відповідності до вимог чинного законодавства.

Аналіз відновлення лісових насаджень в регіонах України (рис. 6) свідчить, що протягом 2022 року було відновлено лісів на площі 36852 га. Лідуючими областями щодо відновлення лісів є Волинська, Житомирська, Чернігівська та Рівненська, і значно менше відновлення в Дніпропетровська, Миколаївська та Одеська області.

Найпоширенішими методами для відтворення лісів є природне поновлення, садіння та висівання лісу. Площа лісів, що була відтворена шляхом природного поновлення становить 10324 га, а за рахунок садіння і висівання лісу – 26508 га, що свідчить про більш штучне відновлення лісових масивів.

Незважаючи на складну воєнну ситуацію, Україна демонструє високий рівень адаптації в управлінні лісовим господарством, зосереджуючи увагу на лісовідновленні, санітарному догляді за лісами та боротьбі з хворобами і шкідниками. Це дає підстави для помірного оптимізму щодо сталого розвитку лісового фонду країни. Проте, щоб забезпечити сталий, екологічно орієнтований підхід до ведення лісового господарства необхідно вдосконалити систему управління лісовими ресурсами, яка б поєднувала економічну доцільність, екологічну відповідальність і соціальну справедливість. Це дасть можливість забезпечити довготривале збереження біорізноманіття, продуктивності лісів та їх екосистемних функцій, не порушуючи можливостей майбутніх поколінь.

Враховуючі сучасні реалії в Україні для подолання викликів деградації лісів, змін клімату та післявоєнного відновлення природного середовища базовими напрямками є:

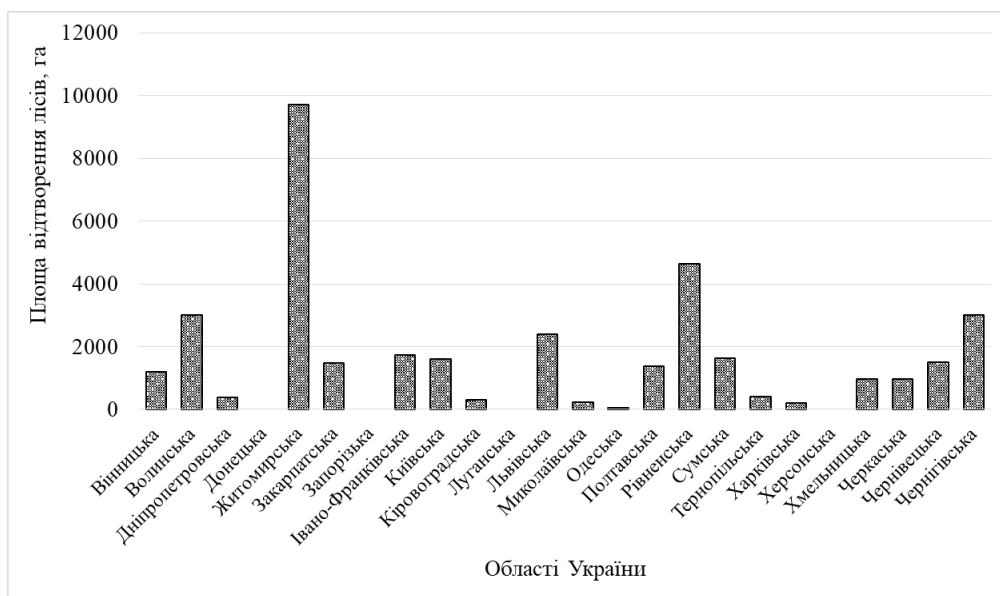


Рис. 6. Площа відтворення лісів за регіонами

Джерело: побудовано авторами на основі аналізу [38]

– відновлення пошкоджених та знищених лісів (проведення інвентаризації лісових площ, які зазнали втрат внаслідок бойових дій, впровадження національних програм лісорозведення, особливо у степовій зоні та зонах ризику опустелювання);

– екологічно орієнтоване лісоуправління (перехід до вибіркових і природозберігаючих рубок, мінімізація суцільних санітарних вирубок, забезпечення балансу між лісокористуванням та природною регенерацією);

– зміцнення системи лісового моніторингу (створення цифрових геоінформаційних систем для моніторингу стану лісів, встановлення онлайн-контролю за лісозаготівлею, переміщенням та реалізацією деревини);

– збереження біорізноманіття (розширення площі природно-заповідного фонду, охорона рідкісних та ендемічних видів);

– адаптація лісів до змін клімату (переорієнтація на більш стійкі місцеві породи, створення змішаних лісостанів, підвищення вогнестійкості та посухостійкості нових насаджень);

– розвиток лісової освіти та просвіти (формування екологічної культури у громадах та серед лісокористувачів, підтримка наукових досліджень у сфері лісової екології та кліматичної адаптації);

– міжнародна співпраця та інвестиції (участь у глобальних програмах з відновлення лісів і декарбонізації).

Такий підхід забезпечить досягнення цілей стратегії сталого розвитку лісів України, що дозволить не лише подолати наслідки війни та кліматичних змін, а й забезпечити екологічну та ресурсну стабільність у довгостроковій перспективі.

Висновки. Лісистість України становить 15,9%, з концентрацією в Поліссі (26,8%) та Українських Карпатах (42%). При цьому, у 2020 році площа рубок лісу склала 382 тис. га, з домінуванням рубок формування та оздоровлення лісів (майже 89%), з яких

67% припадає на санітарні рубки. Це свідчить про інтенсивну експлуатацію лісів, що може мати довгострокові негативні наслідки для екосистем.

У 2022 році заготовлено 15934,3 тис. м³ деревини, з них 59,3% – за рахунок рубок формування та оздоровлення лісів. Найбільші обсяги заготівлі спостерігаються в лісистих регіонах (Житомирська, Київська, Львівська, Рівненська, Волинська та Чернігівська області). Переважає заготівля сосни звичайної, ялини, дуба та бука, що відповідає їх частці у лісах та попиту промисловості. Значна частка деревини (майже 58%) використовується як паливна. Спостерігається нерівномірна динаміка заготівлі другорядної лісової продукції, зі стійким попитом на ягоди, лікарські рослини та гриби. В умовах воєнного стану це є важливим джерелом доходу для місцевого населення.

У 2022 році відтворено лісів на площі 32,3 тис. га, з яких 24,0 тис. га – шляхом висівання та садіння лісу, а 8,3 тис. га – природним поновленням. Лідируючими областями з лісовідновлення є Волинська, Житомирська, Чернігівська та Рівненська. Це свідчить про активні зусилля з відновлення лісів, але штучне відновлення переважає над природним.

Отже, проведений аналіз виявив критичний стан лісових ресурсів України, спричинений поєднанням інтенсивних рубок, масштабних руйнувань внаслідок воєнних дій, екологічних загроз (пожежі, шкідники, хвороби, радіоактивне забруднення) та системних недоліків в управлінні та фінансуванні галузі. Незважаючи на активні зусилля з лісовідновлення, поточні виклики вимагають негайних і комплексних рішень. Вкрай важливо перейти до екологічно орієнтованого лісокористування, посилити моніторинг та контроль, а також залучити міжнародну співпрацю для забезпечення сталого розвитку та збереження лісів як ключового елементу екологічної безпеки та економічної стійкості України.

Література

1. Загальна характеристика лісів України. URL: <https://surl.li/rdgsjj>. (дата звернення 01.04.2025 р.).
2. Підсумковий звіт: Підтримка відновлення і сталого управління лісами України й лісовим сектором України. URL: <https://surl.li/cc/iqrkzb>. (дата звернення 10.04.2025 р.).
3. Мельник-Шамрай В.В., Гончарук В.М., Романюк О.О. Вплив російсько-української війни на ліси України. Сучасний стан, проблеми і перспективи лісівничої освіти, науки та виробництва: матеріали IV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (Біла Церква, 19 квітня 2024 р.). Біла Церква: БНАУ, 2024. С. 169-171.
4. Зібцев С.В., Сошенський О.М., Голдаммер Й.Г., МIRONЮК В.В., Борсук О.А., Гуменюк В.В., Мешкова В.Л., Василюк О.В., Букша І.Ф. Лісоуправління на територіях, забруднених вибухонебезпечними предметами. WWF-Україна, 2022. 148 с.
5. Кузик А. Д., Товарянский В. І. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми України та їх післявоєнне відновлення. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2023. № 27. С. 16–20.
6. Державна екологічна інспекція України повідомляє. URL: <https://dei.gov.ua/post/2512> (дата звернення: 10.04.2025 р.).
7. Публічний звіт голови Державного агентства лісових ресурсів України за 2023 рік. URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik-2018/zvit2023/zvit_lis_%202023.pdf (дата звернення: 07.04.2025р.).
8. Вплив війни на ліси. URL: <https://day.kyiv.ua/article/suspilstvo/vplyv-viyny-na-lisy> (дата звернення: 07.04.2024р.).
9. 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. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 11. С. 270-279.
10. 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.
11. Краснов В. П., Косинський В. П., Струтинський О. В. Вміст ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr у продукції побічного користування в лісах Житомирської області (за даними 2017 р.). *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2017. Вип. 130. С. 179-184.
12. Krasnov V., Ivaniuk I., Zhukovskyi O., Kurbet T., Orlov O. Dynamics of ¹³⁷Cs Accumulation by Cranberry on Sphagnum Bogs of Polissia of Ukraine. *Scientific Horizons*. 2022. Vol. 25. №. 1. P. 68-75.

13. Krasnov V. P., Orlov O. O., Zhukovsky O. V. Dynamics of ^{137}Cs content in tissues and organs of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in moist fairly infertile pine type of Polissya of Ukraine after Chornobyl accident. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2021. Vol. 22(4). P. 382- 389.
14. Мельник-Шамрай В.В., Орлов О.О., Жуковський О.В., Курбет Т.В., Краснов В.П., Іванюк Р.О., Весельський О.О. Сучасне радіоактивне забруднення тканин і органів дуба звичайного у вологих сутрудах лісів Житомирського Полісся. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. К.: Видавничий дім «Гельветика», 2024. № 5(56). С. 144-152.
15. Zhukovskyi O., Krasnov V., Kurbet T., Orlov O., Veselskyi O. Dynamics of radioactive contamination of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea* L.) in the forests of Zhytomyr Polissia (Ukraine) since the Chornobyl Nuclear Accident. *Agroecological journal*. 2024. №1. P. 66-74.
16. Orlov O.O., Grabar I.G., Dolin V.V., Kurbet T.V. Toxicological study of moss cover in pine forests of biogeochemical landscape in background area of Ukrainian Polissia. *Geochemistry of Technogenesis. Part 2. Radionuclides – ^{137}Cs* . 2024. № 38. P. 6-19.
17. Краснов В.П., Орлов О.О., Жуковський О.В. Динаміка питомої активності ^{137}Cs у надземній фітомасі багна болотного (*Ledum palustre* L.) у лісах Полісся України після аварії на Чорнобильській АЕС. *Лісівництво і агролісомеліорація*. Харків: УкрНДЛГА. 2021. Вип. 138. С. 83-90.
18. Котелевич, В. А., Пінський О. В. Сучасний стан безпечності харчових продуктів щодо вмісту ^{137}Cs порівняно з 2010 роком у контексті продовольчої безпеки. *Scientific Progress & Innovations*. 2022. № 4. С. 246-258.
19. Казмерчук Д.Г. Накопичення радіонуклідів макроміцетами у віддалений період після аварії на ЧАЕС Розвиток наукової думки: актуальні питання, досягнення та інновації. Матеріали науковопрактичної конференції (Хмельницький, 28-29 квітня 2023 р.). Одеса: Видавництво «Молодий вчений», 2023. С. 60-63.
20. Romanchuk L. D., Ustylenko V. I. Effect of forest fires on forest plant complexes contaminated by radionuclides. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2022. volume 23, issue 3, p. 195-206.
21. Романчук Л.Д., Ковальова С.П., Можарівська І.А., Устименко В.І., Буднік І.П. Радіологічний моніторинг лісових екосистем Житомирського Полісся. *Таврійський науковий вісник*. Серія: Сільськогосподарські науки / Херсонський державний аграрно-економічний університет. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2025. Вип. 141. Ч. 2. С. 57-68.
22. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І. Оцінка екологічного стану соснових насаджень зони безумовного відселення у вологих суборах лісів Українського Полісся. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. Видавничий дім «Гельветика». 2022. № 5(44). С. 224-232
23. Мельник В.В. Оцінювання санітарного стану соснових насаджень зони безумовного відселення у свіжих борах лісів Українського Полісся. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, №3. С. 39-43.
24. 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.
25. Хрик В.М., Ситник О.С., Кімейчук І.В., Лозінська Т.П., Масальський В.П. Прогнозування розвитку збудників хвороб і шкідників на підставі кліматичних змін. *Лісівництва та агролісомеліорація*. 2024. Вип. 145. С. 134-142.
26. Халаїм О.О. Методи оцінки балансу вуглецю у лісових екосистемах: перспективи використання наземного газометричного камерного методу для Українських Карпат. Екологічні, соціально-економічні та історико-культурні аспекти розвитку прикордонних територій Мараморошину : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції з нагоди XXIII Міжнародного гуцульського фестивалю та відзначення 45-річчя Програми ЮНЕСКО «Людина і Біосфера», Україна, м. Рахів, 2-4 вересня 2016 року / [відп. ред. Гамор Ф. Д.]. Хмельницький : ФОП Петришин, 2016. - С. 311-315.
27. Писаренко Л. А., Краковська С. В. Основні напрямки сучасних досліджень взаємодії клімату і підстильної поверхні. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2020. Вип. 25. С. 38-52.
28. Мороз В. В., Никитюк Ю. А. Вуглецепоглиняльна здатність соснових лісових насаджень Чернігівського Полісся. *Вісник ПДАА*. 2020. № 1. С. 90-99.
29. Балабух В. О., Зібцев С. В. Вплив зміни клімату на кількість та площу лісових пожеж у північно-чорноморському регіоні України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 18. С. 60-71.
30. Пацева І.Г., Кагукіна А.М., Луньова О.В. Тенденції зміни клімату Житомирщини. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 6(51). С. 156-159.
31. Яворовський П. П. Вплив змін клімату на лісові екосистеми. Лісове і садово-паркове господарство : електрон. наук. фахове вид. 2015. № 6.
32. Зібцев С. В., Сошенський О. М., Гуменюк В. В., Корень В. А. Багаторічна динаміка лісових пожеж в Україні. *Ukrainian journal of forest and wood science*. 2019. 10(3). С. 27-40.
33. Волковська Ю.І., Дубовіч І.А. Сучасні еколого-економічні проблеми сталого ведення лісового господарства в умовах зміни клімату. *Forestry Education and Science: Current Challenges and Development Prospects. International Science-Practical Conference, October 23-25, 2024, Lviv, Ukraine*.
34. Яворовський П. П. Аналіз пожежостійкості лісів України в умовах змін клімату. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво. 2015. 216 (1). С. 88-92.
35. Шпарик Ю. С., Криницький Г. Т., Дебринюк Ю. М. Тенденції динаміки типів лісорослинних умов і породного складу деревостанів Українських Карпат у зв'язку зі змінами клімату. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2020. Вип. 20. С. 82-92.
36. Романенко В. А. Вплив змін клімату на насадження сосни звичайної: стан, проблеми, виклики. *Scientific Journal Ukrainian Journal of Forest & Wood Science*. 2021. v. 12, n. 3, P. 87.
37. Пацева І. Г., Барабаш О. В., Мельник-Шамрай В. В., Шамрай В. І., Пацев І.С. Аналіз сучасного стану лісових ресурсів у контексті сталого розвитку. *Збірника наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2023. № 4 (493) . С. 205-211.
38. Статистичний збірник: довкілля України. Режим доступу: <https://surl.li/dbmmrw> (дата звернення: 24.02.2025 р.).
39. Іванюк Р.О., Мельник-Шамрай В.В. Лісові пожежі в Україні. Тези Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування», 14 листопада 2024 року. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С.17.
40. Публічний звіт голови державного агентства лісових ресурсів України за 2022 рік. URL: <https://surl.li/czdofa> (режим звернення: 15.04.2025 р.).

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ АГРОЛАНДШАФТІВ ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Подзереї Р.В.

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини
вул. Садова 2, 20300, м. Умань
podzerej81@gmail.com

У статті розглянуто актуальні проблеми деградації агроландшафтів Черкаської області в контексті інтенсивного сільськогосподарського використання земель. Проаналізовано екологічний стан агроєкосистем регіону з урахуванням таких чинників, як ерозія ґрунтів, зниження гумусового шару, забруднення залишками агрохімікатів та кліматичні зміни. Особливу увагу приділено сучасним технологіям захисту агроландшафтів, що ґрунтуються на принципах сталого та екологічно збалансованого землекористування. Широкомасштабна деградація природного середовища (передусім агроландшафтів), основним чинником якої є екологічна недосконалість технологій вирощування сільськогосподарських культур і структури земельних угідь. Розглянуто проблеми оптимального поєднання процесу використання і охорони земельних ресурсів, що потребує системної орієнтації досліджень стратегії соціального та економічного розвитку держави, яка повинна бути зорієнтована на ефективне використання земельно-ресурсного потенціалу та досягнення стандартів життя, що відповідають кращим зразкам світового досвіду.

Обґрунтовано ефективність адаптивних технологій землеробства, які включають раціональне використання сівозмін, контурне землеробство, екологічне зонування та мінімізацію механічного обробітку ґрунту. Розкрито потенціал ґрунтозахисних рішень, таких як безвідвальний обробіток, агротехнічні заходи проти ерозії, використання сидеральних культур та впровадження буферних зон. Розглянуто перспективи органічного землеробства як екологічно безпечної альтернативи традиційним агротехнологіям, зокрема – через застосування біологічних добрив і засобів захисту рослин.

У статті підкреслено необхідність регіональної координації, наукового супроводу та залучення усіх учасників аграрного сектору до впровадження інноваційних практик.

Результати дослідження можуть слугувати науково-практичною основою для прийняття рішень щодо охорони агроландшафтів, оптимізації землекористування та збереження природного потенціалу сільських територій Черкащини. *Ключові слова:* агроландшафт, технології захисту, ґрунтозахисне землеробство, Черкаська область, адаптивне управління, сталий розвиток.

Modern technologies for the protection of agricultural landscapes in Cherkasy region. Podzerei R.

The article discusses the current problems of degradation of agricultural landscapes in Cherkasy region in the context of intensive agricultural land use. The ecological state of the region's agroecosystems is analyzed, taking into account such factors as soil erosion, humus layer decline, pollution by agrochemical residues, and climate change. Special attention is paid to modern technologies for protecting agricultural landscapes based on the principles of sustainable and environmentally balanced land use. Large-scale degradation of the natural environment (primarily agricultural landscapes), the main factor of which is the environmental imperfection of crop cultivation technologies and the structure of land. The problems of the optimal combination of land use and protection are considered, which requires a systematic orientation of research on the strategy of social and economic development of the state, which should be focused on the efficient use of land and resource potential and the achievement of living standards that meet the best international practices.

The effectiveness of adaptive farming technologies, including the rational use of crop rotations, contour farming, ecological zoning, and minimization of mechanical tillage, is substantiated. The potential of soil protection solutions, such as no-till farming, erosion control measures, the use of green manure crops, and the introduction of buffer zones, is revealed. The prospects of organic farming as an environmentally friendly alternative to traditional agricultural technologies, in particular through the use of biological fertilizers and plant protection products, are considered.

The article emphasizes the need for regional coordination, scientific support and involvement of all participants in the agricultural sector in the implementation of innovative practices.

The results of the study can serve as a scientific and practical basis for making decisions on the protection of agrolandscapes, optimization of land use and preservation of the natural potential of rural areas of Cherkasy region. *Key words:* agrolandscape, protection technologies, soil protection agriculture, Cherkasy region, adaptive management, sustainable development.

Постановка проблеми. Сучасні агроландшафти України, зокрема Черкаської області, зазнають значного антропогенного навантаження внаслідок інтенсивного сільськогосподарського виробництва. Надмірна оранка, недотримання сівозмін, застосування агрохімікатів, розорювання ерозійно небезпечних схилів призводять до деградації ґрунтів, зниження їх родючості, втрати біорізноманіття та погіршення водного режиму. Особливо загострюються ці процеси на тлі кліматичних змін, урбаніза-

ційного тиску та недостатньої екологічної обізнаності землекористувачів.

Наявні підходи до землекористування часто не відповідають принципам сталого розвитку, що загрожує вичерпанням природного потенціалу агроландшафтів і втратами продуктивності в середньотривалій перспективі. Це потребує перегляду підходів до ведення господарства, зокрема – впровадження сучасних, екологічно орієнтованих технологій захисту та відновлення агроєкосистем[6].

Таким чином, актуальною є наукова оцінка сучасного стану агроландшафтів Черкаської області та обґрунтування комплексу заходів, які поєднують адаптивні, ґрунтозахисні, біологічні та цифрові рішення. Їхнє застосування повинно не лише зменшити екологічне навантаження, а й забезпечити довготривалу продуктивність агросектору на засадах сталого розвитку.

Актуальність дослідження. Сучасна ситуація в аграрному секторі України, зокрема в Черкаській області, характеризується високим рівнем антропогенного тиску на агроландшафти. Більша частина земель використовується в режимі інтенсивного сільськогосподарського виробництва, що супроводжується зменшенням природної родючості ґрунтів, розвитком ерозійних процесів, ущільненням ґрунту, зниженням біорізноманіття та хімічним забрудненням агроєкосистем. Ці негативні явища посилюються внаслідок кліматичних змін, зростання вартості ресурсів, нераціонального використання добрив і засобів захисту рослин.

Особливої актуальності набуває проблема в умовах Черкащини, де орні землі займають значну частку загальної площі, а ґрунтово-кліматичні умови є вразливими до ерозійного виснаження. Традиційні методи ведення землеробства виявляються малоефективними в умовах сучасних викликів і потребують переорієнтації на екологічно безпечні, адаптивні та ресурсозберігаючі технології.

У зв'язку з цим дослідження сучасних технологій захисту агроландшафтів, які забезпечують оптимальне поєднання продуктивності, економічності доцільності та екологічної стійкості, є вкрай необхідним. Інноваційні рішення в агровиробництві, зокрема точне землеробство, біологізація, контурне зонування, впровадження сівозмін та ґрунтозахисного обробітку, повинні стати основою сталого землекористування[2].

Таким чином, дана наукова робота спрямована на обґрунтування необхідності трансформації підходів до землекористування в Черкаській області та висвітлення потенціалу сучасних технологій для збереження агроландшафтів як просторово-екологічних систем. Її результати мають практичну цінність для фермерських господарств, аграрних підприємств, екологічних служб і органів регіонального управління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми охорони агроландшафтів, раціонального використання земельних ресурсів та впровадження екологічно безпечних агротехнологій активно досліджуються вітчизняними та зарубіжними науковцями. Зокрема, значний внесок у розробку теоретичних основ сталого землекористування зроблено в працях В. Медведєва, О. Титенка, М. Ромащенко, О. Уварової, які акцентують увагу на необхідності адаптації сільського господарства до сучасних кліматичних і економічних умов, з урахуванням збереження природного середовища.

У наукових роботах П. Саблука, М. Білявського, І. Іщенка досліджуються питання формування збалансованої агроландшафтної політики, інтеграції екологічних принципів в аграрну практику, оцінки впливу землеробських технологій на стан ґрунтів та біорізноманіття. Актуальним є також досвід досліджень, присвячених ерозійним процесам та методам їх стримування (Ю. Лисюк, Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ), впровадженню контурного та ландшафтно-адаптивного землеробства (І. Кравченко, О. Руденко).

Окремий напрям наукового пошуку становлять питання біологізації агровиробництва, зокрема застосування біологічних препаратів, органічних добрив і зелених сидератів, що висвітлено в роботах Л. Берника, В. Патики, С. Соловей. Дослідження у сфері точного землеробства, цифрового моніторингу стану ґрунтів і агроєкосистем набувають все більшого значення в контексті розвитку інноваційних підходів до управління природокористуванням (праці С. Зінченка, А. Зубця, В. Краснолуцького).

Разом з тим, незважаючи на наявність значного теоретичного напрацювання, специфіка реалізації сучасних технологій захисту агроландшафтів в умовах окремих регіонів, зокрема Черкаської області, досліджена недостатньо. Існує потреба у глибшому аналізі регіональних особливостей природного середовища, структури землекористування, рівня антропогенного навантаження та потенціалу впровадження новітніх технологій, адаптованих до локальних умов.

Таким чином, зазначене зумовлює необхідність проведення дослідження, спрямованого на виявлення ефективних технологічних рішень для забезпечення екологічної стійкості агроландшафтів Черкаської області, з урахуванням сучасного стану, наукових тенденцій та практичних викликів регіону.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість наукових досліджень, присвячених збереженню ґрунтів, оптимізації агровиробництва та розвитку сталого землекористування, низка важливих аспектів захисту агроландшафтів Черкаської області залишається недостатньо вивченою. Зокрема, потребує подальшого дослідження регіональна специфіка впровадження сучасних екологічно орієнтованих технологій в умовах інтенсивного землекористування.

На сьогодні не до кінця узагальнено і не систематизовано дані щодо практичного застосування адаптивно-ландшафтного землеробства, біологізації виробництва, цифрових інструментів моніторингу стану ґрунтів та використання технологій точного землеробства саме на території Черкаської області.

Новизна. У даному дослідженні вперше здійснено комплексну характеристику сучасних технологій захисту агроландшафтів з урахуванням специфіки природно-кліматичних умов, структури землекористування та екологічного стану агроєко-

систем Черкаської області. Наукова новизна полягає в інтеграції теоретичних положень щодо екологічної стабілізації агроландшафтів з практичним аналізом можливостей впровадження адаптивних, біологічних і цифрових технологій у межах конкретного регіону.

Мета статті. Обґрунтувати необхідність застосування сучасних екологічно орієнтованих технологій для збереження та відновлення агроландшафтів Черкаської області, проаналізувати їх ефективність у контексті сталого землекористування та визначити перспективи інтеграції цих технологій у регіональну аграрну політику.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення даного дослідження полягає в розвитку міждисциплінарного підходу до вивчення процесів трансформації агроландшафтів під впливом сучасного агровиробництва та впровадження екологічно орієнтованих технологій їх захисту[6].

Наукове значення дослідження полягає в удосконаленні понятійно-категоріального апарату щодо функціонування агроландшафтів як складних соціо-еколого-економічних систем. Запропонований підхід базується на принципах адаптивності, інтегрованого управління земельними ресурсами та ландшафтно-екологічного планування, що може бути використано як теоретична основа для подальших досліджень у сфері сталого землекористування.

Результати дослідження можуть бути інтегровані в практику регіонального планування, в розробку екологічних програм, агроекологічного моніторингу та формування рекомендацій для фермерських господарств і місцевих органів влади. Науково-методична база, сформована в ході дослідження, має потенціал до застосування не лише в умовах Черкаської області, а й для інших регіонів із подібними агроекологічними характеристиками.

Викладення основного матеріалу. Черкаська область є одним із провідних аграрних регіонів України, де близько 70% території зайнято сільськогосподарськими угіддями. Домінування орних земель у структурі землекористування призводить до високого рівня антропогенного навантаження, що проявляється в ерозії ґрунтів, втраті гумусу, деградації агроландшафтів та зниженні стійкості екосистем. У зв'язку з цим застосування сучасних технологій захисту агроландшафтів є ключовою умовою збереження продуктивного потенціалу сільських територій регіону.

Одним із пріоритетних напрямів є впровадження адаптивно-ландшафтного землеробства, яке базується на диференційованому підході до обробітку ґрунтів залежно від особливостей мікрорельєфу, ґрунтового покриву та рівня ерозійної небезпеки[3]. Наприклад, в Звенигородському районі господарства поступово переходять до контурно-меліоративної організації території, зокрема – смугового розміщення сільськогосподарських культур і залу-

ження схилів, що дозволяє зменшити змив ґрунту на 25–40%.

Значне поширення набувають технології точного землеробства, які передбачають використання GPS-навігації, супутникового моніторингу, автоматичного картографування врожайності та агрохімічних показників ґрунтів. Так, у Городищенському районі деякі агрофірми впроваджують змінне внесення добрив, що дозволяє підвищити ефективність удобрення, скоротити витрати ресурсів та знизити ризик локального забруднення ґрунту та вод.

Екологічно безпечним і перспективним напрямом є біологізація землеробства, яка включає застосування органічних добрив, сидеральних культур, мікробіологічних препаратів та відмову від надмірного використання пестицидів[2]. У Христинівському та Монастирищенському районах поширюється практика сидерації, зокрема висівання гірчиці білої та ріпаку як сидератів, що дозволяє підвищити рівень гумусу, пригнітити бур'яни й покращити структуру ґрунту.

У контексті збереження агроландшафтів важливу роль відіграє відновлення польових захисних лісосмуг та елементів природної рослинності. У низці громад, зокрема в Уманському та Тальнівському районах, реалізуються місцеві проекти з ревіталізації лісосмуг, створення буферних зон навколо водних об'єктів, що зменшує дефляцію, покращує мікроклімат і сприяє біорізноманіттю[5].

Також важливою складовою є моніторинг стану ґрунтів та агроєкосистем, який здійснюється за допомогою лабораторних досліджень, ГІС-аналізу, використання дронів для оцінки просторової неоднорідності посівів. Дані методи дозволяють оперативно реагувати на зміни в агроландшафтах та приймати обґрунтовані рішення щодо управління ними[1].

Таким чином, сучасні технології захисту агроландшафтів, адаптовані до умов Черкаської області, сприяють підвищенню екологічної стійкості, збереженню родючості ґрунтів та забезпеченню сталого розвитку сільських територій. Їхнє впровадження потребує міжсекторальної співпраці, наукового супроводу, державної підтримки та екологічної свідомості місцевих землекористувачів.

Агроландшафти Черкаської області, як і більшості центральних регіонів України, зазнають інтенсивного антропогенного навантаження, що спричиняє низку гострих екологічних проблем. Основними серед них є деградація ґрунтів, забруднення компонентів довкілля, порушення гідрологічного режиму, зменшення біорізноманіття та зниження адаптивного потенціалу агроєкосистем (табл. 1) [4].

Карта екологічних проблем агроландшафтів Черкаської області ілюструє комплексну картину основних екологічних загроз у різних частинах регіону.

Головні висновки. Агроландшафти Черкаської області, як і в багатьох регіонах України, зазнали суттєвих трансформацій під впливом інтенсивної господар-

Таблиця 1

Карта екологічних проблем агроландшафтів Черкаської області

№	Тип проблеми	Географічна локалізація	Основні прояви / коментарі
1	Ґрунтова ерозія (водна, вітрова)	Правобережна частина (Уманський, Христинівський, Монастирищенський р-ни)	Розорані схили, слабка лісосмугова захищеність
2	Втрата гумусу / дегуміфікація	Звенигородський, Тальнівський р-ни	Рівень гумусу нижче 3%, інтенсивне землеробство
3	Хімічне забруднення	Канівський, Золотоніський, Чорнобаївський р-ни	Пестициди, залишки нітратів у воді
4	Осушення і меліорація	Ірдинське болото (Черкаський р-н), Смілянський р-н	Порушення водного режиму
5	Забруднення малих річок	Річки Тясмин, Ірдинь, Гнилий Тікич	Агровитоки, замулення, евтрофікація
6	Зниження біорізноманіття	Центральна та південна частина області	Знищення степових острівців, полезахисних смуг
7	Урбанізаційний тиск	Околиці м. Черкаси, Сміла, Умань	Вилучення орних земель, логістичне будівництво
8	Кліматичні ризики (посухи)	Звенигородський, Уманський р-ни	Нерівномірне зволоження, ризик неврожаїв
9	Низька екологічна культура	Загально по області, особливо приватні фермерські господарства	Порушення сівозмін, недотримання охоронних зон

ської діяльності. Традиційне землеробство, орієнтоване на максимальне використання земельних ресурсів, призвело до руйнування природної структури ландшафтів, знищення мозаїчності екосистем, зменшення площ природних угідь, а також зникнення екологічно важливих перехідних елементів – таких як лісосмуги, болота, заплавні луки та балки.

Найбільш критичним наслідком таких змін стало зменшення біорізноманіття – як флористичного, так і фауністичного. З ландшафту витіснені багато видів, що раніше виконували ключові екологічні функції, а екосистеми втратили здатність до саморегуляції. Поширення монокультур, широке застосування агрохімікатів, механічне порушення ґрунтового покриву і фрагментація середовищ існування призвели до деградації як видового, так і ландшафтного різноманіття.

Ще одним важливим аспектом стало порушення водного балансу – ключового чинника екологічної стабільності агроекосистем. Осушення природних вологих територій, спрямлення русел малих річок, зменшення лісистості та знищення природних буферів (балок, заплав, водойм) спричинили зміну режиму поверхневого й ґрунтового зволоження. Унаслідок цього знизився рівень ґрунтових вод, зросли ризики посух, а також посилилися ерозійні процеси, які додатково поглиблюють деградацію земель.

Важливо наголосити, що ці проблеми взаємопов'язані та мають системний характер. Руйнування однієї складової природного середовища автоматично провокує порушення інших: зміна гідрологічного режиму впливає на видовий склад біоценозів, а зменшення біорізноманіття – на стійкість ландшафту до кліматичних стресів. Такий замкнутий цикл деградації вимагає не фрагментарного, а комплексного підходу до охорони агроландшафтів.

У контексті Черкаської області необхідним є не лише збереження залишків природних екосистем, але й активне впровадження відновлювальних заходів: екологічної меліорації, рекультивативної деградації земель, біоорієнтованих агротехнологій, створення нових природоохоронних територій та інтеграції екосистемного підходу в місцеву аграрну політику. Такі кроки дозволять забезпечити екологічну рівновагу, покращити якість життя населення, стабілізувати кліматичні умови регіону та зберегти ландшафтну спадщину для майбутніх поколінь.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеного дослідження мають широкі перспективи практичного застосування в аграрному секторі Черкаської області та інших регіонів із подібними природними умовами. Вони можуть слугувати науково-методичною основою для розробки та впровадження програм збереження і відновлення агроландшафтів, включаючи елементи контурного та адаптивно-ландшафтного землеробства, біологізації агровиробництва та інтеграції цифрових технологій моніторингу. Отримані дані можуть використовуватись у практиці місцевих органів влади, при формуванні регіональних планів розвитку сільських територій, а також у підготовці екологічно обґрунтованих рішень для аграрних підприємств та фермерських господарств. Зокрема, вони мають значення для вдосконалення системи агроекоекологічного моніторингу, підготовки освітніх програм для фахівців аграрної сфери та підвищення екологічної свідомості землекористувачів. Наукова база, закладена у цій роботі, може також слугувати основою для подальших досліджень з оцінки та оптимізації впровадження інноваційних технологій сталого землекористування в умовах кліматичних і соціально-економічних викликів.

Література

1. Гуцуляк В.М. Ландшафтна екологія: навчальний посібник. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2020. 350 с.
2. Лазеба Є. С. Підвищення ефективності використання земель сільськогосподарського призначення в Україні. URL: <http://www.economy.nauka.com.ua/?op=1&z=3062>
3. Міняйло Н.В. Вплив біотичних та абіотичних чинників і порушення агроландшафтів на ентомологічне біорізноманіття: дис. ... канд. біол. наук: 03.00.16 екологія. Київ: НУБіП України, 2023. 180 с.
4. Черкаська обласна державна адміністрація. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Черкаській області за 2021 рік. Черкаси: Черкаська ОДА, 2022. 120 с.
5. Черкаська обласна державна адміністрація. Звіт про стратегічну екологічну оцінку Програми економічного і соціального розвитку Черкаської області на 2022 рік. Черкаси: Черкаська ОДА, 2021. 85 с.
6. Фурдичко О.І., Дребот О.І., Дем'янюк О.С., Євтушенко Д.О. Екологія агросфери: підручник. Київ: Центр учбової літератури, 2022. 400 с.

ПОТЕНЦІАЛ ЛІСОСТЕПОВИХ ЕКОСИСТЕМ У БІОМІ СХІДНО-ЄВРОПЕЙСЬКОЇ РІВНИНИ УКРАЇНИ

Руденко С.В.¹, Руденко В.П.²

¹ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Гагаріна, 72, 49010, м. Дніпро

² Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
вул. Коцюбинського, 2, 58002, м. Чернівці
rudenkostepan@gmail.com, v.rudenko@chnu.edu.ua

Обґрунтовується, що дослідження природно-ресурсного потенціалу (ПРП) Лісостепової зони – однієї з найважливіших складових біому Східно-Європейської рівнини у межах України є актуальною проблемою, що потребує свого вирішення. Висвітлити на підставі проведених абсолютної вартісної і відносної порівняльної оцінок місце і значення ПРП екосистем Лісостепу на тлі Східно-Європейської рівнини як біому – головна мета запропонованого дослідження. Встановлено, що серед чотирьох природних зон Східно-Європейської рівнини Лісостепова зона займає лідируючі позиції, зосереджуючи 28,1% території, 29,8% населення, 24,6% природно-ресурсного потенціалу цієї рівнинної країни. У Лісостеповій зоні концентрується 5,68% потенціалу мінеральних, 24,10% - водних, 36,35% - земельних, 29,68% - лісових, 37,17% - фауністичних та 25,74% природних рекреаційних ресурсів від усієї Східно-Європейської рівнини України. Подільсько-Придніпровська провінційна екосистема є вмістилищем 12,7%, Лівобережно-Дніпровська – 8,5%, Східно-Українська – 3,4% всього обсягу ПРП Східно-Європейської рівнини. Серед 14 екосистем обласного рівня Лісостепової зони найбільшим ПРП володіють: Північно-Полтавська височинна – 3,14%, Центральнопридніпровська височинна – 2,57%, Північно-Придніпровська терасова низовинна – 2,45%. Найменшим ПРП характеризуються: Сумська схилово-височинна (1,17%), Південно-Придніпровська терасова низовинна (1,13%) та Придністровсько-Східно-Подільська височинна (1,11%) області. Потенціал кожного з окремих видів природних ресурсів, як і сумарний (інтегральний) ПРП Східно-Європейської рівнини, прийнятий за 100%, є мірилом (критерієм) порівняльної оцінки значущості того чи іншого природного ресурсу екосистем нижчого рівня на тлі усього біому загалом. Крізь призму такого бачення на фоні біому - Східно-Європейської рівнини першими за рівнем значущості у Лісостеповій зоні загалом є фауністичні ресурси (37,17%), де виокремлюються Лівобережно-Дніпровська провінційна екосистема, Північно-Полтавська височинна та Східно-Полтавська височинна області. Друге місце на тлі Східно-Європейської рівнини займає потенціал земельних ресурсів Лісостепової зони. Третім у порівняльній (зіставній) оцінці ПРП Лісостепу у Східно-Європейській рівнині є потенціал лісових ресурсів. Далі йдуть природно-рекреаційні, водні та мінеральні ресурси. Стверджується, що при розробці схем збалансованого використання, охорони та відтворення природних ресурсів екосистем, безсумнівно, слід базуватися як на абсолютній еколого-економічній, так і на відносній порівняльній оцінках їх ПРП.

Ключові слова: природно-ресурсний потенціал екосистем, Лісостепова зона, Східно-Європейська рівнина як біом.

Potential of forest-steppe ecosystems in the biome of the east-european plain within Ukraine. Rudenko S., Rudenko V.

It is substantiated that the study of the nature-resource potential (NRP) of the Forest-Steppe Zone – one of the most important components of the biome of the East-European Plain within the territory of Ukraine – represents an immediate problem that requires its early solution. Enlightenment, on the basis of absolute cost and relative comparative assessments, of the place and significance of NRP in the Forest-Steppe ecosystems against the background of the East-European Plain as the biome, is the main objective of this study. It is established that, among four natural zones of the East-European Plain, the Forest-Steppe Zone takes leading position having concentrated 28,1% of the territory, 29,8% of population, and 24,6% of nature-resource potential of this horizontal country. The Forest-Steppe Zone accumulates 5,68% of the potential of mineral, 24,10% - water, 36,35% - land, 29,68% - forest, 37,17% - fauna, and 25,74% of the potential of natural recreation resources of the whole East-European Plain in Ukraine. The Podilsko-Prydniprovskaya Provincial Ecosystem is home for 12,7%, the Left-Bank-Dnieper – 8,5%, and the East-Ukrainian Provincial Ecosystem – 2,4% of the total East-European Plain NRP's capacity. The biggest NRPs among 14 oblast-level ecosystems of the Forest-Steppe Zone are possessed by the North-Poltava Upland Oblast (3,4%), the Central-Prydniprovskaya Upland Oblast (2,57%), and the Northern Prydniprovskaya Terrace Lowland Oblast (2,45%). The least NRP-wealthy natural ecosystems are as follows: the Sumy Slope-Upland Oblast (1,17%), the Southern Prydniprovskaya Terrace Lowland Oblast (1,13%), and the Prydnistrovsko-East-Podillia Upland Oblast (1,11%). The potential of each single type of nature resources, as well as the total (integral) NRP of the East-European Plain, if taken as 100%, shall represent the measure (criterion) of the comparative assessment of the gravity of this or that type of nature resources of the lower-level ecosystem against the background of the whole biome. Through this lens and against the background of the biome of the East-European Plain, the fauna resources are the most significant nature resources in the Forest-Steppe Zone (37,17%), where the Left-Bank-Dnieper Provincial Ecosystem, the North-Poltava Upland Oblast, and the East-Poltava Upland Oblast are the most distinctive in this respect. The second-significant place against the background of the East-European Plain is taken by the potential of land resources of the Forest-Steppe Zone. The third place in the comparative (contrastive) assessment of the Forest-Steppe within the East-European Plain is given to the potential of forest resources. The above-mentioned resources are followed by natural recreation, water and mineral resources. It is maintained that both the absolute ecological-economic and the relative comparative NRP assessments should undoubtedly be based upon in the development of schemes of balanced use, protection and reproduction of natural resources of ecosystems. **Key words:** nature-resource potential of ecosystems, Forest-Steppe Zone, East-European Plain as the biome.

Вступ. У сучасних умовах розвитку глобалізації взаємин між суспільством і природою, в умовах наростання екологічної кризи через ігнорування людством екологічних законів, коли прагнення до всезростаючого споживання енергії, нових матеріалів, виробництво зброї можуть призвести до самого зникнення людини з планети Земля, як ніколи раніше, актуальним стає «макроекологічний підхід». Макроекологія, як вважають Г.І. Рудько та О.І. Бондар, «передбачає поглиблене дослідження еколого-економічних зв'язків, можливостей організації і конструювання збалансованих еколого-економічних систем на основі порівняння й узгодження природних і виробничих потенціалів як на глобальному рівні, так і на рівні окремих територій. У цьому контексті головні завдання макроекології пов'язані з розробкою стратегії послідовної екологізації виробництва та економіки» [1, с.23]. У той час, як далі стверджують названі автори, коли більшість екологів детально досліджують особливості взаємовідносин видів на невеликих ділянках протягом короткого часу, макроекологічний підхід спонукає мислити і діяти широкомаштабно [1]. Таке бачення взаємодії складових екосистем особливо проявляється на рівні біомів – великих системно-географічних підрозділів біотичних угруповань у межах географічної зони [2]. Серед таких біомів Лісостепова зона України займає важливе місце, зосереджуючи у своєму комплексі 26,1% території, 26,5% населення, 22,6% природно-ресурсного потенціалу (ПРП) держави [3, с.104].

Лісостепові природно-ресурсні комплекси досліджувались багатьма науковцями. Назвемо серед них праці О.М. Маринича [4], М.Д. Гродзинського [5], М.А. Голубця [6; 7], С.І. Азарова та О.С. Задуня [8], О.Г. Голубцова зі співавторами [9], В.М. Петліна [10], Г.І. Денисика з колективом [11]. Методичні підходи до кількісних оцінок впливу природно-ресурсного потенціалу на збалансований розвиток галузей природокористування, екологічну інтенсифікацію, впровадження екосистемних послуг в природно-господарських регіонах розглядаються в дослідженнях В. Самойленка зі співавторами [12], Т.С. Кіннамана [13], А.Е. Мартіна з колективом [14], С. Рамірес-Маркеса зі співавторами [15], Г. Грекусіса [16] та ін.

У той же час недостатньо, на нашу думку, уваги приділяється дослідженням, у яких би Лісостепова зона як біом з її природно-ресурсним потенціалом розглядалася б на тлі Східно-Європейської рівнини – таксону вищого ієрархічного рівня. Висвітлити це питання – **головна мета нашої публікації**.

Матеріали і методи дослідження. Результати вартісної переоцінки ПРП України станом на 1.01.2022р. покладені в основу нашого подальшого викладу [17]. ПРП Східно-Європейської рівнини, що включає мінеральні, водні, земельні, лісові, фауністичні, природно-рекреаційні ресурси визначені в обсязі 1279,745 млрд. грн. Цей показник прийнятий нами за 1000,000%, для того щоб більш точно оціню-

вати малі за величиною потенціалу природні ресурси (див. табл.1). Табл.2 висвітлює місце провінційних екосистем, екосистем обласного рівня, Лісостепової зони загалом у біомі Східно-Європейської рівнини за величиною їх ПРП, коли кожна зі складових сумарного ПРП Східно-Європейської рівнини в межах України приймається за 100%.

Результати та їх обговорення. Отже, як видно з поданих таблиць, у Лісостеповій зоні зосереджується 24,62% інтегрального (сумарного) ПРП Східно-Європейської рівнини, у тому числі: 5,68% потенціалу мінеральних, 24,10% - водних, 36,35% - земельних, 29,68% лісових, 37,17% - фауністичних та 25,74% природних рекреаційних ресурсів. Три провінційні екосистеми Лісостепової зони за величиною ПРП розмістилися так (у порядку спадання величини потенціалу): Подільсько-Придніпровська – 12,7%, Лівобережно-Дніпровська – 8,5%, Східно-Українська – 3,4%.

Серед 14 екосистем обласного рівня Лісостепової зони найбільшим ПРП володіють: Північно-Полтавська височинна – 3,14%, Центральнопридніпровська височинна – 2,57%, Північно-Придніпровська терасова низовинна – 2,45%, Харківська схилово-височинна – 2,27%, Південно-Придніпровська височинна – 1,95%, Східно-Полтавська височинна – 1,79% та Північно-Східна Придніпровська височинна – 1,69% області. У той же час найменшим потенціалом природних ресурсів у Лісостеповій зоні характеризуються: Північно-Західна Придніпровська височинна (1,25%), Київська височинна (1,17%), Сумська схилово-височинна (1,17%), Південно-Придніпровська терасова низовинна (1,13%) та Придніпровсько-Східно-Подільська височинна (1,11%) області.

Табл.2 є дуже важливою для науковців і практиків, принаймні, з двох причин: по-перше, в ній оцінюється місце того чи іншого потенціалу природного ресурсу всієї Лісостепової зони, її провінційних екосистем, екосистем обласного рівня у ПРП біому Східно-Європейської рівнини, а по-друге, вона чітко, наочно відображає своєрідність, специфічні особливості природно-ресурсного комплексу кожної конкретної з 18 оцінюваних екосистем Лісостепової зони різного ієрархічного рівня. Потенціал Східно-Європейської рівнини є мірилом (критерієм) порівняльної оцінки значущості того чи іншого природного ресурсу екосистеми нижчого рівня на тлі усього біому загалом. Так, здавалося б досить несподівано, першими за рівнем значущості у Лісостеповій зоні загалом на фоні Східно-Європейської рівнини є фауністичні ресурси (37,17%). Це ж стосується і Лівобережно-Дніпровської провінційної екосистеми (16,2%), Північно-Східної Придніпровської височинної (3,67%), Північно-Придніпровської терасової низовинної (4,07%), Північно-Полтавської височинної (5,9%), Східно-Полтавської височинної (4,39%), Південно-Придніпровської терасової низовинної (1,84%) областей.

Таблиця 1

Природно-ресурсний потенціал Лісостепової зони на тлі Східно-Європейської рівнини

Лісостепова зона (біом), провінційні екосистеми, природні області	Потенціал ресурсів, % від біому – Східно-Європейської рівнини						
	мінеральних	водних	земельних	лісових	фауністичних	природних рекреаційних	інтегральний
Лісостепова зона (біом)	17,027	28,839	167,951	9,395	1,884	21,056	246,152
Подільсько-Придніпровська провінційна екосистема	6,059	13,416	92,134	<u>4,972</u>	<u>0,849</u>	<u>9,249</u>	<u>126,679</u>
XII. Північно-Західна Придніпровська височинна область	0,340	1,815	9,027	0,344	0,077	0,864	12,467
XIII. Північно-Східна Придніпровська височинна область	0,614	1,548	12,366	0,748	0,186	1,447	16,909
XIV. Київська височинна область	0,465	1,500	7,438	0,489	0,045	1,811	11,748
XV. Придністровсько-Східно-Подільська височинна область	0,266	0,760	9,199	0,355	0,044	0,446	11,070
XVI. Середньобузька височинна область	0,352	2,175	11,836	0,841	0,073	1,350	16,627
XVII. Центральнопридніпровська височинна область	1,778	3,395	17,310	1,209	0,186	1,795	25,673
XVIII. Південно-Подільська височинна область	0,352	0,602	10,535	0,521	0,113	0,610	12,733
XIX. Південно-Придніпровська височинна область	1,892	1,621	14,423	0,465	0,125	0,926	19,452
Лівобережно-Дніпровська провінційна екосистема	8,134	<u>10,910</u>	<u>56,852</u>	<u>2,615</u>	<u>0,821</u>	<u>5,772</u>	<u>85,104</u>
XX. Північно-Придніпровська терасова низовинна область	1,253	3,004	17,011	0,614	0,206	2,389	24,477
XXI. Північно-Полтавська височинна область	3,242	3,412	21,703	1,015	0,299	1,750	31,421
XXII. Східно-Полтавська височинна область	1,282	3,694	10,768	0,813	0,223	1,160	17,940
XXIII. Південно-Придніпровська терасова низовинна область	2,357	0,800	7,370	0,173	0,093	0,473	11,266
Східно-Українська провінційна екосистема	<u>2,834</u>	<u>4,513</u>	<u>18,965</u>	<u>1,808</u>	<u>0,214</u>	<u>6,035</u>	<u>34,369</u>
XXIV. Сумська схилово-височинна область	0,364	1,694	7,709	0,954	0,113	0,865	11,699
XXV. Харківська схилово-височинна область	2,470	2,819	11,256	0,854	0,101	5,170	22,670
Східно-Європейська рівнина (біом)	299,757	119,673	462,052	31,652	5,069	81,797	1000,000

Таблиця 2

Місце складових ПРП біому Лісостепової зони у потенціалі Східно-Європейської рівнини

Лісостепова зона (біом), провінційні екосистеми, природні області	Потенціал ресурсів, %						
	мінеральних	водних	земельних	лісових	фауністичних	природних рекреаційних	інтегральний
Лісостепова зона (біом)	5,68	24,10	36,35	29,68	37,17	25,74	24,62
Подільсько-Придніпровська провінційна екосистема	<u>2,02</u>	<u>11,21</u>	<u>19,94</u>	<u>15,71</u>	<u>16,74</u>	<u>11,31</u>	<u>12,67</u>
XII. Північно-Західна Придніпровська височинна область	0,11	1,52	1,95	1,09	1,51	1,06	1,25
XIII. Північно-Східна Придніпровська височинна область	0,20	1,29	2,68	2,36	3,67	1,77	1,69
XIV. Київська височинна область	0,16	1,25	1,61	1,55	0,88	2,21	1,17
XV. Придністровсько-Східно-Подільська височинна область	0,09	0,64	1,99	1,12	0,88	0,54	1,11
XVI. Середньобузька височинна область	0,12	1,82	2,56	2,66	1,43	1,65	1,66
XVII. Центральнопридніпровська височинна область	0,59	2,84	3,75	3,82	3,67	2,19	2,57
XVIII. Південно-Подільська височинна область	0,12	0,50	2,28	1,65	2,23	0,76	1,27
XIX. Південно-Придніпровська височинна область	0,63	1,35	3,12	1,46	2,47	1,13	1,95
Лівобережно-Дніпровська провінційна екосистема	<u>2,71</u>	<u>9,12</u>	<u>12,31</u>	<u>8,26</u>	<u>16,20</u>	<u>7,06</u>	<u>8,51</u>
XX. Північно-Придніпровська терасова низовинна область	0,42	2,51	3,68	1,94	4,07	2,92	2,45
XXI. Північно-Полтавська височинна область	1,07	2,85	4,70	3,20	5,90	2,14	3,14
XXII. Східно-Полтавська височинна область	0,43	3,09	2,34	2,57	4,39	1,42	1,79

Продовження таблиці 2

Лісостепова зона (біом), провінційні екосистеми, природні області	Потенціал ресурсів, %						
	мінеральних	водних	земельних	лісових	фауністичних	природних рекреаційних	інтегральний
XXIII. Південно-Придніпровська терасова низовинна область	0,79	0,67	1,59	0,55	1,84	0,58	1,13
Східно-Українська провінційна екосистема	0,95	3,77	<u>4,10</u>	<u>5,71</u>	<u>4,23</u>	<u>7,37</u>	<u>3,44</u>
XXIV. Сумська схилово-височинна область	0,12	1,42	1,66	3,01	2,24	1,06	1,17
XXV. Харківська схилово-височинна область	0,83	2,35	2,44	2,70	1,99	6,31	2,27
Східно-Європейська рівнина (біом)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Друге місце на тлі Східно-Європейської рівнини займає потенціал земельних ресурсів Лісостепоної зони (у дев'ятьох з 18 таксонів), що в принципі зрозуміло (див. табл. 2).

Третім у компонентній структурі ПРП Лісостепу є потенціал лісових ресурсів. Це характерно як для зони загалом, так і для Подільсько-Придніпровської провінційної екосистеми, Північно-Східної Придніпровської височинної, Київської височинної, Південно-Подільської височинної, Південно-Придніпровської височинної, Північно-Полтавської височинної, Східно-Полтавської височинної областей. При цьому за часткою у потенціалі лісових ресурсів біому Східно-Європейської рівнини цей вид ресурсів є першим у Середньобузкій височинній, Центральнопридніпровській височинній, Сумській схилово-височинній областях.

Потенціал природних рекреаційних ресурсів Лісостепоної зони – четвертий за величиною у ПРП Східно-Європейської рівнини – 25,74%. Однак, серед інших видів природних ресурсів у Київській височинній області він є доміантним, як і у всій Східно-Українській провінційній екосистемі, Харківській схилово-височинній області (7,37%).

Хоча водний потенціал Лісостепоної зони є п'ятим у ПРП біому Східно-Європейської рівнини, проте, у Північно-Західній Придніпровській височинній та Східно-Полтавській височинній областях він займає другу позицію серед інших складових потенціалу, а у Середньобузкій височинній області і в Лівобережно-Дніпровській провінційній екосистемі є третім.

Нарешті, потенціал корисних копалин Лісостепу – 5,68% ПРП Східно-Європейської рівнини. Найвищі його показники – у Лівобережно-Дніпровській провінційній екосистемі, у Північно-Полтавській височинній та Харківській схилово-височинній областях.

Висновки.

1. Лісостепова зона серед чотирьох природних зон біому – Східно-Європейської рівнини в межах України – займає лідируючі позиції, зосереджуючи 28,1% території, 29,8% населення, 24,6% природно-ресурсного потенціалу цієї рівнинної країни.

2. У Лісостеповій зоні концентрується 5,68% потенціалу мінеральних, 24,10% - водних, 36,35% - земельних, 29,68% - лісових, 37,17% - фауністичних та 25,74% природних рекреаційних ресурсів від усієї Східно-Європейської рівнини України.

3. Подільсько-Придніпровська провінційна екосистема є вмістилищем 12,7%, Лівобережно-Дніпровська – 8,5%, Східно-Українська – 3,4% всього обсягу ПРП Східно-Європейської рівнини. Серед 14 екосистем обласного рівня Лісостепоної зони найбільшим ПРП володіють: Північно-Полтавська височинна – 3,14%, Центральнопридніпровська височинна – 2,57%, Північно-Придніпровська терасова низовинна – 2,45%. Найменшим ПРП характеризується: Сумська схилово-височинна (1,17%), Південно-Придніпровська терасова низовинна (1,13%) та Придністровсько-Східно-Подільська височинна (1,11%) області.

4. Потенціал кожного з окремих видів природних ресурсів, як і сумарний (інтегральний) ПРП Східно-Європейської рівнини, прийнятий за 100%, є мірилом (критерієм) порівняльної оцінки значущості того чи іншого природного ресурсу екосистем нижчого рівня на тлі усього біому загалом. Крізь призму такого бачення на фоні біому – Східно-Європейської рівнини першими за рівнем значущості у Лісостеповій зоні загалом є фауністичні ресурси (37,17%), де виокремлюються Лівобережно-Дніпровська провінційна екосистема, Північно-Полтавська височинна та Східно-Полтавська височинна області. Друге місце на тлі Східно-Європейської рівнини займає потенціал земельних ресурсів Лісостепоної зони. Третім у порівняльній (зіставній) оцінці ПРП Лісостепу у Східно-Європейській рівнині є потенціал лісових ресурсів. Далі йдуть природно-рекреаційні, водні та мінеральні ресурси. При розробці схем збалансованого використання, охорони та відтворення природних ресурсів екосистем, безсумнівно, слід базуватися як на абсолютній еколого-економічній, так і на відносній порівняльній оцінках їх ПРП.

Література

1. Рудько Г.І., Бондар О.І. Макроекологія України / За ред. Г.І. Рудька. Київ-Чернівці: Букрек. 2020. 520 с.
2. Ємельянов І.Г. Біом. Енциклопедія Сучасної України. Київ, 2004. Т.3 : Біо-Бя. С.27.
3. Руденко С.В., Руденко В.П., Пахомов О.Є. Екорегіони України: територія, населення, природно-ресурсний потенціал. *Природнича освіта та наука*. 2024. Випуск 4. с.102-107. DOI: <https://doi.org/10.32782/NSER/2024-4.16>.
4. Олександр Мефодійович Маринич – видатний український географ. До 100-річчя від дня народження. *Фізична географія та геоморфологія*. 2020. Випуск 5-6 (103-104). С.7-10.
5. Гродзинський М.Д. Еволюція ландшафтів України: ландшафтознавство-географічний вимір проблеми: монографія. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2023. 432 с. URL: https://geo.knu.ua/wp-content/uploads/2024/12/grodzynskij_evolyucziya-landshaftiv-ukrayiny.pdf.
6. Голубець М.А. Екосистемологія. Львів: Поллі, 2000. 316 с.
7. Голубець М.А., Марискевич О.Г., Крок Б.О., Козловський М.П., Башта А.-Т.В., Гнатів П.С., Гринчак М.М., Шпаківська І.М., Яворницький В.І. Екологічний потенціал наземних екосистем. Львів: Поллі, 2003. 180 с.
8. Азаров С.І., Задунай О.С. Аналіз надійності екосистем. *Екологічні науки*. 2020. Випуск 1 (28). С.90-96. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.13>.
9. Голубцов О.Г., Сорокіна Л.Ю., Тимуляк Л.М. Чехній В.М., Фаріон Ю.М., Рога І.В., Батова Н.І., Петров М.Ф., Назарчук Н.І. Геоінформаційний аналіз антропогенних змін ландшафтів Лісостепової зони України. *Український географічний журнал*. 2021. № 3. С.38-53. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2021.03.038>.
10. Петлін В.М. Синергетичні залежності в організації природних територіальних систем. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка. 2013. 396 с.
11. Denysyk Hr. I., Yatsentiuk Yu. V., Denysyk B. Hr., Chyzh O. P., & Voia I. M. Modern Anthropogenic Hydrosphere of Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*. 2024. No. 4: 12-21. DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2024.04.012>.
12. Samoilenko V., Bilous L., Havrylenko O., Dibrova I. Geoinformation model cause-effect analysis of anthropogenic impact in the Podilsko-Prydniprovskyi region. European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021. 2021. Vol. 2021, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521006>.
13. Kinnaman T.C. A New Perspective on the Natural Resource Curse. *World*, 2023. 4(4). 670. DOI: <https://doi.org/10.3390/world4040042>.
14. Martin, A.E., Collins, S.J., Crowe, S., Girard, J., Naujokaitis-Lewis, I., Smith, A.C., Lindsay, K., Mitchell, S., Fahrig, L. Effects of farmland heterogeneity on biodiversity are similar to – or even larger than – the effects of farming practices. *Agriculture. Ecosystems and Environment*. 2020. Vol. 288. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106698>.
15. Ramirez-Marquez C., Posadas-Paredes T., Raya-Tapia A.Y., Ponce-Ortega J.M. Natural Resource Optimization and Sustainability in Society 5.0: Comprehensive Review. *Resources*. 2024. 13(2). 19. <https://doi.org/10.3390/resources13020019>.
16. Grekousis G. Spatial Analysis Methods and Practice Describe-Explore-Explain GIS. Cambridge: University Press, 2020, 518. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108614528>.
17. Rudenko S., Rudenko V. Nature-resource potential of natural regions of Ukraine in present-day figures. *Екологічні науки*. 2023. №6(51). С.84-89. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.13>.

ЕКОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИДІВ РОДУ *RIBES* L. У ПРАВОБЕРЕЖНОМУ ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ

Солошенко В.С.

Державний дендрологічний парк «Олександрія»

Національної академії наук України

09113, м. Біла Церква

miss456@ukr.net

У роботі висвітлено результати оцінювання важливих екологічних особливостей деревних рослин: зимостійкості та посухостійкості восьми видів роду *Ribes* L., а саме: *Ribes alpinum*, *Ribes aureum*, *Ribes spicatum*, *Ribes komarovii*, *Ribes mandschuricum*, *Ribes nigrum*, *Ribes rubrum*. Упродовж 2020-2024 рр. ми проводили візуальні спостереження з використанням уніфікованої 9-ти бальної шкали зимостійкості та посухостійкості В. М. Меженського. З'ясовано, що досліджені види роду *Ribes* в умовах Правобережного Лісостепу України стійкі до впливу низьких температур взимку та мають високу зимостійкість (7 балів) – вимерзли всі квітки або плоди осипалися внаслідок зимових ушкоджень; однорічний приріст не вимерз; дуже високу зимостійкість (8 балів) – вимерзло до 50 % квіткових бруньок. Серед досліджених видів рослини роду *Ribes* Східноазійського та Північноамериканського походження мають середній бал зимостійкості – 7 балів, а природні види (Циркумбореального походження) – мають дуже високу зимостійкість – 8 балів.

Досліджені види роду *Ribes* в умовах Правобережного Лісостепу України мають посухостійкість від середньої до високої (6 балів) – окремі листки мають локальні походження, до дуже високої (8 балів) – згортання або зміна орієнтації листової пластинки. Види Східноазійського походження та природні (Циркумбореального походження) види мають середній та високий бали посухостійкості, а найвищу посухостійкість нами зафіксовано у виду Північноамериканського походження – 8 балів.

Дослідження проводилися у рамках комплексної оцінки успішності інтродукції видів роду *Ribes*, враховуючи, що саме вплив низьких температур взимку, часті відлиги, перепади плюсових та мінусових температур, нестійкий режим зволоження, посуха влітку та інші показники – є тими лімітуючими екологічними чинниками, які забезпечують успішну адаптацію та ріст і розвиток видів в умовах інтродукції. **Ключові слова:** *Ribes*, види, дендропарк «Олександрія», Правобережний Лісостеп, зимостійкість, посухостійкість.

Ecological features of species of the genus *Ribes* L. in the right-bank forest-steppe of Ukraine. Soloshenko V.

The paper reflects the results of the assessment of important ecological features of woody plants: winter hardiness and drought resistance of eight species of the genus *Ribes* L., namely: *Ribes alpinum*, *Ribes aureum*, *Ribes spicatum*, *Ribes komarovii*, *Ribes mandschuricum*, *Ribes nigrum*, *Ribes rubrum*. During 2020-2024 we conducted visual observations on the model base of the dendropark "Olexandria" of the National Academy of Sciences of Ukraine (Bila Tserkva, Kyiv Region) using a unified 9-point scale of winter hardiness and drought resistance V. M. Mezhen'sky. It was found that the studied species of the genus *Ribes* are resistant to the effects of low temperatures in winter in the conditions of the Right Bank Forest Steppe of Ukraine and have high winter hardiness (7 points) – all the flowers froze or the fruits fell off due to winter damage; annual growth did not freeze; and very high winter hardiness (8 points) – up to 50% of flower buds froze. Among the studied species of plants of the genus *Ribes* of East Asian and North American origin, they have an average winter hardiness score (7 points), and natural species (of Circumboreal origin) have very high winter hardiness (8 points).

Most of the researched species of the genus *Ribes* in the conditions of the Right Bank Forest Steppe of Ukraine have moderate to high drought resistance (6 points) – individual leaves have local damage, very high (8 points) – curling or changing the orientation of the leaf blade. Species of East Asian origin and natural (Circumboreal origin) species have medium and high drought tolerance scores, and the highest drought tolerance was recorded by us in the species of North American origin – 8 points.

The research was conducted as part of a comprehensive assessment of the success of the introduction of species of the genus *Ribes*, taking into account that the influence of low temperatures in winter, frequent thaws, changes in plus and minus temperatures, an unstable humidification regime, resistance to drought in summer and other indicators are limiting environmental factors that ensure adaptation. **Key words:** *Ribes*, species, dendropark "Olexandria", Right-Bank Forest-Steppe, winter hardiness, drought tolerance.

Постановка проблеми. Під *Ribes* L. охоплює понад 150 видів, які природно поширені у Північній і Південній півкулях, здавна культивуються у культурі, інтродуковані в Україні та Європі та мають цінність для садівництва, фармакології та паркобудівництва [1]. В сучасних умовах змін клімату вивчення екологічних особливостей для з'ясування екологічної пластичності рослин, зокрема видів роду *Ribes*, набуває особливого значення, зокрема й у регіоні наших досліджень – Правобережному Лісостепу України. Лісостепова зона України, хоча і належить

до зон із помірно-континентальним кліматом, але характеризується нестабільними гідротермічними умовами, значною амплітудою температур, періодичними проявами літніх посух. Ці фактори створюють додаткові виклики та перешкоди для нормального росту і розвитку деревних рослин, особливо в умовах урбанізованих і рекреаційних територій, де необхідні види з високими адаптивними властивостями. Незважаючи на значний інтерес до культури смородин, екологічні дослідження спрямовані на оцінку зимостійкості та посухостійкості окре-

мих видів роду *Ribes* у Правобережному Лісостепу України, залишаються не до кінця досліджені. Недостатньо вивчені адаптивні механізми, які забезпечують виживання рослин у несприятливих умовах, що ускладнює їх ефективне використання у зеленому будівництві та природоохоронних проектах.

Актуальність дослідження. Вивчення екологічних особливостей роду *Ribes* є необхідністю для створення генофонду перспективних видів з високою зимостійкістю, які буде використано в подальшій інтродукції та селекції, з'ясування механізмів стійкості до літніх посух, буревіїв, які посилюються внаслідок кліматичних змін.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проводилися у рамках науково – дослідної фундаментальної теми «Інтродукція рослин та наукові основи збереження генофонду природної та культурної флори Державного дендрологічного парку «Олександрія» НАН України» та дисертаційного дослідження ««Види роду *Ribes* L. у Правобережному Лісостепу України: інтродукція, біоекологічні особливості, перспективи використання»».

Аналіз останніх джерел досліджень і результатів. Було ретельно проаналізовано дослідження науковців Інституту садівництва НААН О. І. Китаєва, О. Т. Лагутенка (2015) [2], опрацьовано карту зон морозостійкості «Кліматичні зони USDA в Україні» [3], усі наявні описи оцінки зимостійкості та посухостійкості, виконані дослідниками: О. Г. Хороших (1999) [4], О. А. Калініченко (2003) [5], В. В. Грохольський (2003) [6], В. М. Меженський (2007) [7], М. О. Бублик (2013) [8], В. А. Кривошапка (2016) [9], К. Preedy (2020) [10], М. Freya (2025) [11].

Метою наших досліджень було охарактеризувати екологічну стійкість видів роду *Ribes* у Правобережному Лісостепу України за показниками зимостійкості та посухостійкості для визначення перспективних видів з високим адаптивним потенціалом для використання у різних галузях.

Об'єкти і методи досліджень. Об'єктами досліджень були 8 видів роду *Ribes*: *Ribes alpinum* (Циркумбореального походження, природний вид), *Ribes aureum* (Північноамериканського походження), *Ribes spicatum* (Циркумбореального походження, природний вид), *Ribes komarovii* (Східноазійського походження), *Ribes mandschuricum* (Східноазійського походження), *Ribes nigrum* (Циркумбореального походження, природний вид), *Ribes rubrum* (Циркумбореального походження, природний вид), які з II половини XX ст. культивуються у колекції Державного дендрологічного парку «Олександрія» НАН України (м. Біла Церква, Київська область) у Правобережному Лісостепу України. Зимостійкість та посухостійкість оцінювали візуально за уніфікованою 9-ти бальною шкалою В. М. Меженського (2007) [7].

Виклад основного матеріалу. Зимостійкість виключно важлива умова, яка визначає можливість та перспективність інтродукції загалом – це складний процес взаємозв'язку умов місцезростання, фізіологічного стану та стійкості деревних рослин до дії низки зимових факторів: низьких температур, вітрів, снігопадів тощо. Хоча успішна перезимівля залежить від інтенсивності та тривалості несприятливих факторів зимового періоду, проте, вирішальне значення належить самій рослині [10, 11]. Головними чинниками, які впливають на ступінь зимостійкості, є своєчасне закінчення вегетації (формування верхівкової бруньки та здерев'яніння пагонів), зниження активності фізіологічних процесів, перехід до стану спокою та накопичення у клітинах захисних речовин (цукрів). Відомо, що здатність рослинного організму протистояти дії низьких температур є спадковою видовою властивістю, проте вагомим лишається і вплив метеорологічних чинників [11, 12].

Стан глибокого спокою певною мірою нейтралізує або значно зменшує вплив нестійкого температурного режиму. Пізніше глибокий спокій переходить у фазу вимушеного спокою, який вже характеризується високою здатністю рослини до відновлення ростових процесів, супроводжується комплексними змінами у тканинах та органах, необхідних для початку вегетації. Характерно, що виключно після завершення фази глибокого спокою у репродуктивних бруньках деревних рослин відбуваються основні фази спорогенезу і гаметогенезу. Період глибокого спокою у деревних ягідних культур, до яких належить і рід *Ribes*, тісно пов'язаний із ступенем зимостійкості. Розуміння цієї властивості допоможе спрогнозувати успішність акліматизації видів у даній місцевості [4, 5].

Загальну тривалість періоду спокою ми визначали шляхом підрахунку днів від дати вступу смородин у фазу спокою до дати фази масового розпускання листя (II декада квітня – I декада травня). Більшість з досліджених видів роду *Ribes* в умовах Правобережного Лісостепу входять у фазу глибокого спокою у I-II декадах жовтня. У представника секції *Eucoreosma* Jancz. *Ribes nigrum* L. – період глибокого спокою є найкоротшим.

В умовах України рід *Ribes* вважають морозостійким (без видимих пошкоджень тканин витримує морози до – 40 °C), проте, після частих і різких змін погоди можуть спостерігатися пошкодження бруньок [2, 6, 8].

За результатами досліджень морозостійкості смородин, виконаних в Інституті садівництва шляхом проморожування відомо, що для *Ribes aureum* (секція *Calobotrya* Spach) та *Ribes rubrum* (секція *Ribesia* (Berl.) Jancz) – сумарний індексований бал морозного пошкодження тканин не перевищує 200, пошкодження не вплинули на майбутній ріст рослин, отже представники секцій *Ribesia* та *Calobotrya* мають високу потенційну морозостій-

кість, хоча інтродуцент північноамериканського походження *Ribes aureum* характеризується нижчим ступенем морозостійкості, у порівнянні з природним (Циркумбореальним) видом *Ribes rubrum*, проте, цілком достатнім для нормального розвитку інтродуцента. Показники проморожування тканин пагонів *Ribes nigrum* (секції *Eucoreosma* Jancz.) були значно вищими, порівняно з іншими видами. Різні частини та різні тканини пагона пошкоджуються під час проморожування неоднаково, так, найчутливішою до дії низьких температур виявилася центральна частина бруньки, потім – верхня (апикальна) частина. Найвразливішими є зовнішні шари тканин – кора та камбій. Найменшого пошкодження зазнають деревина та серцевина [2].

За картою зон морозостійкості «Кліматичні зони USDA в Україні» [3], Правобережний Лісостеп (Центральна Україна) знаходиться у VI зоні морозостійкості, з помірним кліматом, у якому рослини здатні витримувати температури від ...-23 °C без видимих пошкоджень.

У природно-кліматичних умовах Правобережного Лісостепу, де знаходиться наша модельна база дендропарк «Олександрія», рослини роду *Ribes* вважають зимостійкими та морозостійкими рослинами, проте, під час різких змін погоди (часті відлиги у зимовий період або весняні похолодання, наявність пізньовесняних та ранньоосінніх заморозків, перепади температур у зимовий період, холодний поривчастий вітер, ожеледь та заledenіння рослин тощо) фіксуються пошкодження однорічних пагонів морозами, які добре відновлюються у вегетаційний період.

Результати нашого візуального оцінювання видів родів *Ribes* в умовах Правобережного Лісостепу України за уніфікованою шкалою В. М. Меженського відображено у таблиці 1.

Як видно з табл. 1, види роду *Ribes* в умовах Правобережного Лісостепу мають високу (вимерзають всі квітки або плоди осипаються внаслідок зимових ушкоджень; однорічний приріст не вимерзає) та дуже високу (вимерзає до 50 % квіткових бруньок) зимостійкість. Види Східноазійського та Північноамериканського походження мають серед-

ній бал зимостійкості 7, а природні в Україні види мають дуже високу зимостійкість. За період наших спостережень не було зафіксовано випадків пошкодження пізньовесняними або ранньоосінніми заморозками.

Для дослідження оцінки успішності інтродукції видів роду *Ribes*, які культивуються у Правобережному Лісостепу України, було оцінено їх посухостійкість, яка також є важливим показником пристосувальної здатності рослин до впливу посухи (жаростійкість, водоутримуюча здатність під час відсутності опадів тощо). Здатність рослин добре переносити дефіцит вологи під час вегетації, є одним з основних критеріїв життєздатності інтродуцентів, тому найперспективнішими є рослини, які під впливом дії високих температур характеризуються стійкістю тканин до зневоднення, здатні зберігати оптимальний рівень метаболічних процесів в умовах водного дефіциту. За літературними даними, переважна більшість представників роду *Ribes* мають високу водоутримуючу здатність при посуху, а найчутливішими до змін навколишнього середовища у смородин є листок, завдяки особливостям анатомічної будови [9].

Види роду *Ribes* належать до мезофітів, для яких характерною є загальна закономірність потовщення листя з II декади травня до II декади липня – це прояв еволюційно набутого захисного механізму, який відбувається за рахунок збільшення обсягу повітроносних порожнин, а загальна кількість гомеостатичної води варіює від 35-50 % [11, 14].

Упродовж 2020-2024 рр. ми проводили візуальне оцінювання посухостійкості видів роду *Ribes* в умовах Правобережного Лісостепу України за уніфікованою 9-ти бальною шкалою посухостійкості В. М. Меженського [7]. Результати висвітлено у таблиці 2.

Як видно з табл. 2, більшість досліджених видів роду *Ribes* в умовах Правобережного Лісостепу України мають середню посухостійкість: види Східноазійського та природні (Циркумбореального походження) мають середній бал посухостійкості від 5,5 до 6,5 (пошкодження і обпадання листків до 50 % – окремі листки мають локальні пошкодження), за

Таблиця 1

Показники польової зимостійкості видів роду *Ribes* L. у регіоні досліджень 2020-2024 рр.

№ з/п	Назва виду	2020	2021	2022	2023	2024	Середній бал
		бал	бал	бал	бал	бал	
1	<i>Ribes alpinum</i>	8	8	8	8	8	8
2	<i>Ribes aureum</i>	7	7	7	7	7	7
3	<i>Ribes komarovii</i>	7	7	7	7	7	7
4	<i>Ribes mandschuricum</i>	7	7	7	7	7	7
5	<i>Ribes nigrum</i>	8	8	8	8	8	8
6	<i>Ribes spicatum</i>	8	8	8	8	8	8
7	<i>Ribes tenue</i>	7	7	7	7	7	7
8	<i>Ribes rubrum</i>	8	8	8	8	8	8

Таблиця 2

Показники польової посухостійкості рослин роду *Ribes* L. у регіоні досліджень 2020-2024 рр.

№ з/п	Назва виду	2020	2021	2022	2023	2024	Середній бал
		бал	бал	бал	бал	бал	
1	<i>Ribes alpinum</i>	7	6	7	7	6	6,6
2	<i>Ribes aureum</i>	8	8	8	8	8	8
3	<i>Ribes komarovii</i>	6	6	6	5	5	5,6
4	<i>Ribes mandschuricum</i>	6	6	6	5	5	5,6
5	<i>Ribes nigrum</i>	6	5	6	6	6	5,8
6	<i>Ribes spicatum</i>	6	6	6	5	5	5,6
7	<i>Ribes tenue</i>	5	6	6	5	5	5,4
8	<i>Ribes rubrum</i>	6	6	6	6	6	6

винятком *Ribes aureum*, яка має дуже високу посухостійкість – 8 балів (згортання або зміна орієнтації листової пластинки). Саме *Ribes aureum* найчастіше культивується у Південно-Східних та Південних регіонах України. Східноазійські види *Ribes tenue*, *Ribes komarovii*, *Ribes mandschuricum* у природних умовах ростуть вздовж річок, тому в умовах інтродукції потребують вологіших умов зростання.

Проте, навіть рослини природних видів роду *Ribes* в сучасних умовах зростаючої ксирофілізації клімату Правобережного Лісостепу України часто страждають від посухи, тому потребують додаткового поливу.

Висновки. За результатами виконаних досліджень встановлено, що представники роду *Ribes* в умовах регіону наших досліджень (Правобережний Лісостеп України) характеризуються загалом високим ступенем екологічної стійкості. Найвищі бали зимостійкості мають природні в Україні види (*Ribes*

alpinum, *Ribes spicatum*, *Ribes nigrum*, *Ribes rubrum*). Середнім рівнем посухостійкості характеризуються природні види і види-інтродуценти (*Ribes tenue*, *Ribes komarovii*, *Ribes mandschuricum*) у колекції дендропарку «Олександрія», а найвищий бал (дуже висока посухостійкість) має північноамериканський вид *Ribes aureum* має – 8 балів. Загалом, екологічні особливості усіх представників роду *Ribes* забезпечують нормальний ріст і розвиток рослин та добре узгоджені з погодно-кліматичними умовами регіону наших досліджень.

Перспективи використання результатів досліджень. Отримані результати підтверджують доцільність більш широкого впровадження видів роду *Ribes* у практику декоративного садівництва та ландшафтного озеленення у Правобережному Лісостепу України, як перспективного генетичного матеріалу для селекційної роботи в сучасних умовах змін клімату.

Література

- Genes Ribes. POWO: веб-сайт. URL: <https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:30002461-2> (дата звернення: 20.05.2025)
- Кітасв О. І., Лагутенко О. Т., Чорний І. Б., Дідичук М. О. Морозостійкість рослин видів роду *Ribes* L. в умовах Північного Лісостепу України. Київ, 2015. 10 с.
- Кліматичні зони USDA в Україні: веб-сайт. URL: <https://redberry.kiev.ua/blog-morozostiykist-roslyn-v-ukrajini> (дата звернення: 20.05.2025)
- Хороших О. Г., Хороших О. В. Шкала комплексної оцінки декоративних ознак деревних рослин. *Науковий вісник УкрДЛТУ: Дослідження, охорона та збагачення біорізноманіття* 1999 р. Вип. 9.9. С. 300-303.
- Калініченко О. А. Декоративна дендрологія. К.: Вища школа. 2003. 199 с.
- Грохольський В. В. Методи визначення пошкодження плодів культур рослин умовами зимівлі, весняними та осінніми приморозками. Моніторинг плодів культур. К.: Наукова думка, 2003. 127-135 с.
- Меженський В. М. Уніфікування шкал оцінок, що застосовуються при інтродукції деревних рослин. *Інтродукція рослин*. 2007. Вип. 4. С. 26–37.
- Лабораторні та польові методи визначення морозостійкості плодів порід і культур. Методичні рекомендації / М. О. Бублик, Т. І. Патика, О. І. Кітасв, Д. Г. Макарова. К.: Інститут садівництва НААН України, 2013. 26 с.
- Кривошапка А. В., Ярещенко О. М., Терещенко Я. Ю. Оцінка посухостійкості сортів і відбірних форм чорної смородини (*Ribes nigrum* L.) і червоної порічок (*Ribes rubrum* L.). *Актуальні проблеми ботаніки та екології: матеріали міжнар. конф. молодих учених*. Херсон, 2016. 125 с.
- Improved models of the effects of winter chilling on black currant (*Ribes nigrum* L.) show cultivar specific sensitivity to warm winters / Preedy K. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020. Vol. 280. №4. P. 107. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107777>
- Кохно М. А., Трофименко Н. М., Пархоменко Л. І. та ін. Дендрофлора України. Дикорослі й культивовані дерева і кущі. Покритонасінні. Частина II: довідник. Київ, 2005. 716 с.
- Weigend M., Binder M. Three new species of *Ribes* L. (*Grossulariaceae*) from Central and South America. *Syst. Bot.* 2001. Vol. 26. P. 727-732.
- A full genome assembly reveals drought stress effects on gene expression and metabolite profiles in blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) / M. Freya et. al. *Horticulture Research*. 2025. Vol. 12, № 2, P. 313. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac313>
- Анатомічна будова листя смородини чорної / О. В. Криворучко та ін. *Вісник фармації*. 1995. № 3-4. С.104-106.

ПОСУХОСТІЙКІСТЬ ДЕРЕВНИХ РОСЛИН В ПАРКОВИХ НАСАДЖЕННЯХ ПРОМИСЛОВИХ МІСТ СТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

Суслова О.П.

Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України
вул. Маршаків 50, 50089, м. Кривий Ріг
elenasuslova2901@gmail.com

В статті наведено результати дослідження видів деревно-кущових рослин в парковому насадженні м. Покровськ, розташованого в північно-степовій зоні України. Визначено посухостійкість видів та ушкодження листя рослин в період посухи, проведено порівняльний аналіз отриманих даних показника в різні роки досліджень. Встановлено, що в міському парку зростає 63 види і культивари деревно-кущових рослин, серед яких частка мезофітів становить 62%, ксерофітів – 33%, гігрофітів – 5%. З'ясовано, що в період дії високих температур і тривалої посухи 2024 року найбільш витривалими до таких умов з відсутністю ознак впливу кліматичних показників на їхній стан виявилися 57% видів-ксерофітів (4–5 балів за шкалою посухостійкості, розробленою С.С. П'ятницьким). До високо посухостійких віднесено *Picea pungens* Engelm., *Acer tataricum* L., *Gleditsia triacanthos* L., *Ulmus campestris* L. Серед мезофітів 51% видів відповідають вищому балам посухостійкості. До таких видів віднесено *Fraxinus excelsior* L., *Malus domestica* L., *Populus bolleana* Lauche, *Ulmus laevis* L. До посухотолерантних видів серед гігрофітів віднесено 33% рослин – *Picea abies* (L.) Karst. Визначено, що найбільш чутливими до посухи 2024 року виявилися види-мезофіти, оскільки середній бал їхньої посухостійкості знизився на 9% від даних 2023 року; видів-гігрофітів – на 5%; видів-ксерофітів – на 2%. Серед візуальних ознак зниження ступеня посухостійкості видів виявлено втрату тургору листками в денні години та їхнє в'янення, некрози та висушення листя. За нашою оцінкою 81% досліджуваних видів цілком посухостійкі, що свідчить про їх стійкість до кліматичних змін в північно-степовій зоні України та доцільність їхнього використання при створенні та реконструкції паркових зон населених пунктів досліджуваного регіону. **Ключові слова:** тривала посуха, посухостійкість, ксерофіти, мезофіти, гігрофіти, північно-степова зона України.

Drought tolerance of woody plants in park plantations of industrial cities of the steppe zone of Ukraine. Suslova O.

The article presents the results of the study of tree and shrub species in the park of the city of Pokrovsk, located in the northern steppe zone of Ukraine. The drought resistance of species and damage to plant leaves during drought were determined and a comparative analysis of the obtained data of the indicator in different years of research was conducted. It was established that 63 species and cultivars of woody and shrubby plants grow in the city park, among which the share of mesophytes is 62%, xerophytes – 33%, hygrophytes – 5%. It was found that during the period of high temperatures and prolonged drought in 2024, 57% of xerophyte species were the most resistant to such conditions with no signs of the influence of climatic indicators on their condition (4–5 points on the drought tolerance scale developed by C.C. Pyatnitsky). Highly drought-resistant species include *Picea pungens* Engelm., *Acer tataricum* L., *Gleditsia triacanthos* L., *Ulmus campestris* L. Among mesophytes, 51% of species correspond to the highest drought-resistant scores. Such species include *Fraxinus excelsior* L., *Malus domestica* L., *Populus bolleana* Lauche, *Ulmus laevis* L. Among hygrophytes, 33% of plants are classified as drought-tolerant species – *Picea abies* (L.) Karst. It was determined that the most sensitive to the drought in 2024 were mesophyte species, since the average score of their drought tolerance decreased by 9% from the data of 2023; hygrophyte species – by 5%; xerophyte species – by 2%. Among the visual signs of a decrease in the degree of drought tolerance of species, the loss of turgor by leaves during the daytime and their wilting, necrosis and drying of leaves were detected. According to our estimate, 81% of the studied species are completely drought-resistant, which indicates their resistance to climate change in the northern steppe zone of Ukraine and the feasibility of their use in the creation and reconstruction of park areas of settlements in the studied region. **Key words:** prolonged drought, drought tolerance, xerophytes, mesophytes, hygrophytes, northern steppe zone of Ukraine.

Постановка проблеми. Кліматичні зміни, що відбуваються в останні десятиріччя, значно впливають на ріст та розвиток деревних рослин. Визначення їхньої стійкості до підвищених температур та довготривалих посух дає змогу визначити еколого-біологічні особливості видів і доцільність впровадження їх в урбодендрозенотозу [1, 8]. Здатність дерев витримувати дію високих температур оцінюється їхньою посухостійкістю – генетично зумовленою ознакою, що тісно пов'язана з місцем вирощування рослин та їх адаптацією до водного дефіциту. Вона відображає можливість рослин витримувати значне зневоднення при збереженні функціональної активності

клітинних структур, а також за рахунок адаптивних морфологічних особливостей стебла, листків і генеративних органів [6]. Виходячи з цього, за умов глобального потепління, посухостійкість дерев у міських насадженнях є важливим елементом в адаптації рослин до кліматичних умов. Її визначення за сучасних умов існування сприятиме збереженню біорізноманіття, забезпечить формування стійких довговічних деревних насаджень та дозволить розробити заходи щодо їхнього раціонального утримання.

Актуальність дослідження. Кліматичні зміни в степовій зоні України, що характеризуються високими температурами і частими посухами, призво-

дять до дефіциту вологи в ґрунті. Наслідком цього є порушення водного балансу в рослинних організмах, що спричиняє пригнічення фізіолого-біохімічних процесів, скорочення вегетаційного періоду та зниження стійкості рослин до дії стресових біотичних і абіотичних чинників [5, 9, 10, 19]. Зазначені зміни надалі призводять до зниження життєздатності рослин та їхнього передчасного старіння і загибелі. Тому при створенні міських зелених насаджень за сучасних кліматичних змін слід враховувати посухостійкість рослин, яка має важливе значення для їхнього життєзабезпечення. Виходячи з цього, дослідження посухостійкості деревних рослин, що зростають в міських насадженнях набуває особливої актуальності з метою визначення видів, найбільш адаптованих та стійких до кліматичних умов Степової зони України.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. Представлені результати є висновками в межах комплексної науково-дослідної роботи, що виконується у відділі інтродукції та акліматизації рослин Криворізького ботанічного саду НАН України за темою «Стійкість та адаптивна спроможність деревно-чагарникових рослин в умовах урбоекосистем Правобережного степового Придніпров'я у зв'язку з глобальними кліматичними змінами», державний номер реєстрації 0117U00082883.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питаннями визначення посухостійкості деревних рослин в населених пунктах за умов кліматичних змін займаються фахівці наукових установ Світу. Китайськими науковцями визначено морфо-біохімічні реакції деревних рослин на стрес від довготривалих посух на рівні листя, стебла та кореня [18] та розроблено практичні рекомендації щодо тривалого утримання води в ґрунті, оскільки це затримує прояв візуальних симптомів впливу посухи на дерева в міському середовищі майже на 10 днів [20]. За їхніми даними 60% видів деревних рослин в різних насадженнях Пекіна цілком посухостійкі [16]. Австралійськими фахівцями проведено комплексне дослідження посухостійкості 12 видів деревних рослин за різними показниками, як то водоутримуюча здатність листків і втрата ними тургору в денні часи, розраховано водний потенціал рослин в певних умовах та виділено найбільш стійкі до високих температур і посух [15]. Європейськими науковцями досліджено посухостійкість 120 видів та сортів деревно-кущових рослин в міських насадженнях на основі розрахованого водного потенціалу в точці втрати тургору листками, як ключової ознаки для оцінки посухостійкості, та виділено найбільш стійкі за умов кліматичних змін [17]. В вітчизняних наукових виданнях наведено результати досліджень *Fraxinus excelsior* L., його чотирьох декоративних форм і *Robinia pseudoacacia* L. в умовах Правобережного Лісостепу та на основі отриманих даних виділено

три групи з показниками високої, середньої та низької посухостійкості [2, 3]. З метою виявлення найперспективніших посухотолерантних декоративних видів, інтродукованих із зон помірного та континентального клімату в зону Полісся і Лісостепу України, досліджено 13 видів деревно-кущових рослин, малопоширених в культурі та виділено найбільш посухостійкі, які можна рекомендувати для включення їх в екосистеми урбанізованого середовища [11]. Наразі досліджено посухостійкість деревних екзотів, інтродукованих в умови Правобережного Степового Придніпров'я і деяких видів хвойних у вуличних насадженнях м. Дніпро. Виділено види, найбільш стійкі до умов зростання [4, 8]. Проведено порівняльний аналіз оводненості листків 10 видів *Acer* L. в міських умовах Дніпра та зроблено висновки про протилежну реакцію досліджуваних видів з різною спрямованістю водообмінних процесів на тривалий та гострий водний стрес. З'ясовано, що у мезофільних видів відбувається поступова адаптація до тривалої посухи та її відсутність при гострому водному стресі, у ксерофільних видів – значне зниження оводненості у першому випадку та адаптивні властивості у другому [12]. Визначено особливості сезонної динаміки водообмінних процесів у п'яти видів роду *Populus* L. в умовах Кривого Рогу та встановлено, що найстійкішими до несприятливих умов зволоження виявилися *Populus bolleana* Lauche і *P. italica* (Du Roi) Moench, в яких співвідношення процесів водного обміну є оптимальним [7]. За умов Лівобережної степової зони визначено посухостійкість хвойних видів та водоутримуючу здатність культиварів *Thuja occidentalis* L. [13, 14].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Одним з найважливіших показників стану деревних рослин вважають їхню посухостійкість. Втім, дані досліджень зазначеного показника в міських паркових насадженнях північно-степової зони України відсутні, а інформація щодо адаптації видів до кліматичних змін носить фрагментарний характер. Вважаємо, що при проведенні комплексних досліджень життєвого стану видів деревних рослин в міських парках, визначення їхньої посухостійкості сприятиме збереженню паркових дендроценозів та розвитку науково-обґрунтованих підходів до міського озеленення.

Наукова новизна. Представлені матеріали ґрунтуються на результатах власних спостережень. Вперше визначено посухостійкість видів деревних рослин в міських паркових насадженнях за умов кліматичних змін в північно-степовій зоні України.

Матеріали та методи досліджень. Об'єктом досліджень були паркові насадження Покровська, розташованого в промисловому регіоні північно-степової зони України. Обстежено 1618 дерев. Посухостійкість видів дерев визначали впродовж 2023–2024 рр за 6-бальною шкалою

С. С. П'ятницького [9], де 0 балів – рослина гине від посухи; 1 бал – листки опадають, всихають кінці пагонів; 2 бали – всихає більше 75% листків; 3 бали – вражено до 50% листків; 4 бали – в денні години листки втрачають тургор, в'януть, але за ніч його відновлюють; 5 балів – рослина не страждає від посухи. Статистичну обробку отриманих результатів проводили за допомогою програми Excel.

Викладення основного матеріалу. Вегетаційний період 2024 року в північно-степовій зоні України відзначився довготривалою посухою. Кількість опадів з січня по листопад становила 209 мм, що в 2 рази менше від даних за 2023 рік. Загалом, в період досліджень від травня до жовтня 2024 року середньомісячні показники опадів на 73–76% були менші від 2023 року (рис. 1 А). Середньомісячні температури повітря 2024 року перевищували дані 2023 року: травня – на 7,6%; червня – на 17,0%; липня – на 0,8%; серпня – на 2,7%; вересня – на 6,0%. (рис. 1 Б). За таких умов під дією високих температур види деревних рослин виявили зниження посухостійкості.

Відомо, що найбільшою посухостійкістю відзначаються ксерофіти, які відрізняються морфологічною та анатомічною будовою; мезофіти характеризуються помірною стійкістю до посухи, яка зумовлена здатністю регулювати інтенсивність транспірації за допомогою продихового апарату, шляхом обпадання листків і зав'язі плодів; гігрофіти нестійкі до посухи.

В паркових насадженнях Покровська найбільшу частку деревних рослин становлять мезофіти (62%); ксерофіти відповідають 33%; гігрофіти – не перевищують 5%. Серед видів-ксерофітів в 2024 році 57% видів виявили найвищий бал посухостійкості та відсутність ознак впливу кліматичних показників на їхній стан (5 балів). До високо посухостійких віднесено *Picea pungens* Engelm., *Acer tataricum* L., *Gleditsia triacanthos* L., *Ulmus campestris* L. тощо (таблиця). Для 43% ксерофітів в найбільш посушливі

місяці (липень–вересень) було характерно часткову втрату листками тургору. Однак, ці види також можна вважати посухостійкими; середній показник їх становить 4,4–4,8 бали. До таких рослин віднесено *Armeniaca vulgaris* L., *Morus alba* L., *Fraxinus lanceolata* Borkh., *Ligustrum vulgare* L. тощо.

Частка посухостійких видів серед мезофітів становить 51% від всіх досліджуваних рослин цієї екологічної групи. Це такі види, як *Fraxinus excelsior* L., *Malus domestica* L., *Populus bolleana* Lauche, *Ulmus laevis* Pall. тощо. Види, у яких визначено втрату листками тургору та в'янення 50% листків в окремі місяці (3 бали) становить 41%: *Catalpa bignonioides* Walter, *Betula pendula* Roth, *Pyrus communis* L., *Salix alba* L., *Juglans regia* L., *Forsythia europaea* Deg. et Bald. (рис. 2 А). Також серед мезофітів визначено 8% видів, серед яких у вересні при середньомісячній кількості опадів у 4 мм спостерігаються некрози (рис. 2 Б), побуріння листових пластинок та їхнє опадання: *Aesculus hippocastanum* L., *Spiraea japonica* L., *Buxus sempervirens* L. (рис. 2 В).

До гігрофітів віднесено три види деревних рослин, які за посухостійкістю розподіляються в такий спосіб: *Picea abies* (L.) Karst. – 4,8 бали, що свідчить про високу посухостійкість виду в досліджуваних умовах; *Prunus ×domestica* L. та *Philadelphus coronarius* L. – 3,4–3,8 балів за наявності втрати тургору та всихання до 50% листків.

При порівнянні даних, отриманих за два роки досліджень, визначено, що найбільш чутливими до тривалої посухи 2024 року виявилися види-мезофіти, оскільки середній бал їхньої посухостійкості знизився на 9% від даних 2023 року; видів-гігрофітів – на 5%, видів-ксерофітів – на 2% (рис. 3).

Узагальнюючи отримані дані щодо посухостійкості деревно-кущових рослин в парковому насадженні промислового міста північно-степової зони України встановлено, що 81% від всіх досліджуваних видів

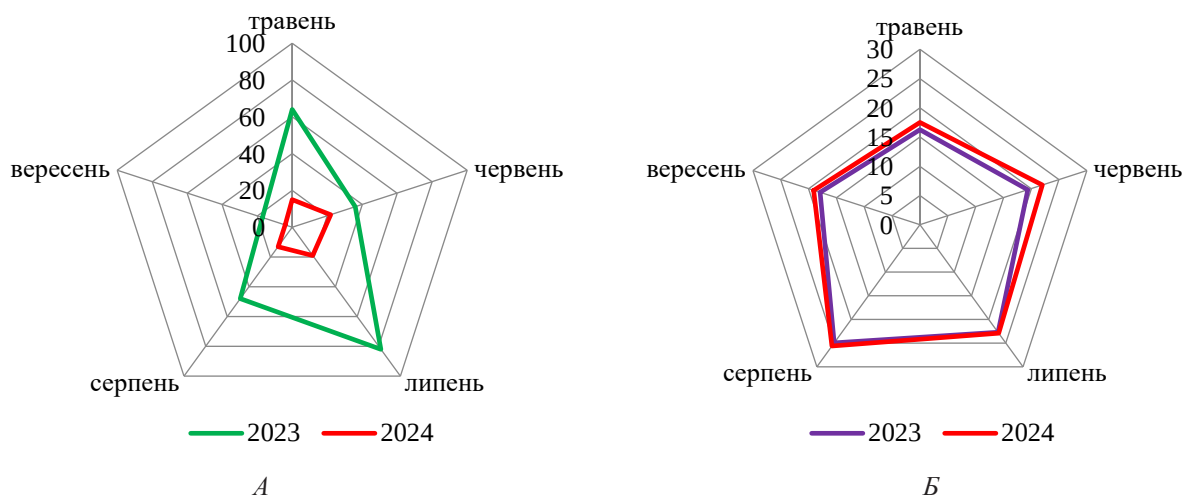


Рис. 1. Середньомісячні показники метеорологічних даних в північно-степовій зоні України: А – кількість опадів (мм); Б – температура (°C)

Таблиця 1

Посухостійкість видів деревних рослин в парковому насадженні Покровська

Вид	2023 рік						2024 рік					
	травень	червень	липень	серпень	вересень	середнє значення	травень	червень	липень	серпень	вересень	середнє значення
ксерофіти												
<i>Picea glauca</i> (Moench) Voss	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Picea pungens</i> Engelm.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Picea pungens</i> Engelm. f. <i>argentea</i> Branner	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Pinus pallasiana</i> D. Don	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Pinus sylvestris</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Juniperus communis</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Acer tataricum</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Ailantus altissima</i> (Mill.) Swingle	5	5	5	5	4	4,8	5	5	4	5	4	4,6
<i>Armeniaca vulgaris</i> Lam.	5	5	5	4	4	4,6	5	5	5	4	4	4,6
<i>Elaeagnus angustifolia</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Fraxinus lanceolata</i> Borkh.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marsh	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	4	5	4,8
<i>Gleditsia triacanthos</i> f. <i>inermis</i> (L.) Zbl.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Morus alba</i> L.	5	5	5	5	4	4,8	5	5	5	4	4	4,6
<i>Populus ×canadensis</i> Moench	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Populus simonii</i> Carriere	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Prunus divaricata</i> Ledeb.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	4	4	4	4,4
<i>Ulmus campestris</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Caragana arborecens</i> Lam.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	5	5,0
<i>Ligustrum vulgare</i> L.	5	5	5	4	4	4,6	5	5	4	4	4	4,4
мезофіти												
<i>Acer negundo</i> L.	5	5	5	5	4	4,8	5	5	4	4	4	4,4
<i>Acer platanoides</i> L.	4	4	5	4	4	4,2	4	5	4	4	3	4,0
<i>Acer pseudoplatanus</i> L.	5	5	5	5	4	4,8	4	5	4	4	4	4,2
<i>Acer saccharinum</i> L.	5	5	5	5	4	4,8	4	4	4	4	4	4,0
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	5	4	5	5	4	4,6	4	3	3	3	2	3,0
<i>Betula pendula</i> Roth	5	5	5	4	4	4,6	4	5	4	4	3	4,0
<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	4	4	5	5	4	4,4	4	5	4	4	3	4,0
<i>Catalpa bignonioides</i> Walter	5	4	5	4	4	4,4	4	4	4	3	3	3,6
<i>Cerasus vulgaris</i> Mill.	5	5	4	4	4	4,4	5	4	4	4	3	4,0
<i>Cornus mas</i> L.	5	4	5	4	3	4,2	4	4	4	3	3	3,6
<i>Crataegus sanguinea</i> Pall.	5	4	5	4	4	4,4	5	5	4	3	3	4,0
<i>Fraxinus excelsior</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	4	4	4	4,4
<i>Juglans regia</i> L.	5	4	5	5	4	4,6	4	4	4	4	4	4,4
<i>Malus ×purpurea</i> (Barbier) Rehder	5	5	5	5	4	4,8	5	5	5	4	4	4,6
<i>Malus domestica</i> Borkh.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Malus praecox</i> (Pall.) Borkh.	5	4	5	5	4	4,6	5	5	4	4	4	4,4
<i>Malus sylvestris</i> (L.) Mill.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	4	3	4,4
<i>Padellus mahaleb</i> (L.) Vass.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	4	4	4	4,4
<i>Padus avium</i> Mill.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Populus bolleana</i> Lauche	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Populus nigra</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Populus nigra</i> f. <i>pyramidalis</i> (Roozier) Delaunay	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	4	4	4,6
<i>Pyrus communis</i> L.	5	4	5	5	4	4,6	4	4	4	4	3	3,8
<i>Quercus robur</i> L.	5	4	5	4	4	4,4	5	4	4	4	3	4,0
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Robinia pseudoacacia</i> L. 'Umbraculifera'	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Salix alba</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	4	4	4	4	3	3,8
<i>Sorbus aucuparia</i> L.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	4	4	4,6

Продовження таблиці 1

Вид	2023 рік						2024 рік					
	травень	червень	липень	серпень	вересень	середнє значення	травень	червень	липень	серпень	вересень	середнє значення
<i>Sorbus intermedia</i> (Ehrh.) Pers.	5	4	5	5	4	4,6	5	5	4	4	4	4,4
<i>Tilia cordata</i> Mill.	5	5	5	5	4	4,8	5	5	5	4	3	4,4
<i>Tilia platyphyllos</i> Scop.	5	5	5	5	4	4,8	5	5	4	4	3	4,2
<i>Ulmus laevis</i> Pall.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Ulmus parvifolia</i> Jacq.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Ulmus scarba</i> Mill.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Buxus sempervirens</i> L.	5	4	5	3	2	3,8	4	4	3	3	2	3,2
<i>Forsythia europaea</i> Deg. et Bald.	4	4	5	3	2	3,6	4	4	3	3	3	3,4
<i>Spiraea japonica</i> L.	5	4	5	4	4	4,4	4	4	4	3	2	3,4
<i>Spiraea vanhouttei</i> (Briot) Zab.	5	4	5	4	3	4,2	4	4	4	4	3	3,8
<i>Syringa vulgaris</i> L.	5	5	4	5	3	4,4	4	4	4	3	3	3,6
гідрофіти												
<i>Picea abies</i> (L.) Karst.	5	5	5	5	5	5,0	5	5	5	5	4	4,8
<i>Prunus ×domestica</i> L.	4	4	5	4	3	4,0	4	5	4	3	3	3,8
<i>Philadelphus coronarius</i> L.	5	3	5	3	3	3,8	4	4	3	3	3	3,4



А

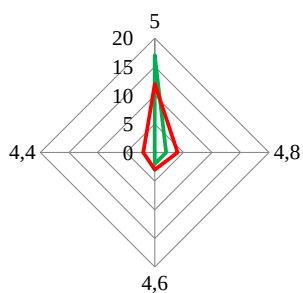


Б

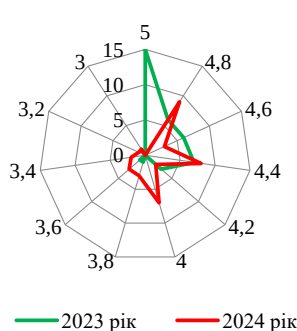


В

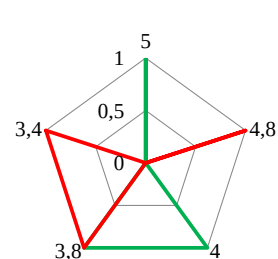
Рис. 2. Ушкодження листків кущових рослин в паркових насадженнях Покровська: А – в'янення *Forsythia europaea* Deg. et Bald., Б – секторний некроз *Acer platanoides* L., В – всихання *Buxus sempervirens* L.



А



Б



В

Рис. 3. Посухостійкість деревно-кущових порід різних екологічних груп по відношенню до вологи в парковому насадженні Покровська: А – ксерофіти; Б – мезофіти; В – гідрофіти

цілком посухостійкі, вони оцінені вищими балами (4–5). Це свідчить про їх стійкість до кліматичних змін в степовій зоні України і доцільність в продовженні їхнього використання при створенні та реконструкції паркових зон населених пунктів досліджуваного регіону.

Головні висновки:

1. В парковому насадженні Покровська серед деревно-кущових рослин по відношенню до вологості 62% становлять мезофіти; 33% – ксерофіти; 5% – гідрофіти.

2. Оцінка стійкості рослин за візуальними ознаками у період тривалої посухи і дії високих температур 2024 року показала, що найбільш витривалими в таких умовах виявилися 57% видів-ксерофітів, 51% – мезофітів та 33% – гідрофітів. До найбільш

посухостійких видів віднесено *Picea pungens*, *Acer tataricum*, *Gleditsia triacanthos*, *Ulmus campestris* (ксерофіти), *Fraxinus excelsior*, *Malus domestica*, *Populus bolleana*, *Ulmus laevis* (мезофіти), *Picea abies* (гідрофіт).

3. З'ясовано, що найбільш чутливими до тривалої посухи 2024 року виявилися види-мезофіти, середній бал їхньої посухостійкості знизився на 9% від даних 2023 року; видів-гідрофітів – на 5%; видів-ксерофітів – на 2%.

4. Визначено, що 81% досліджуваних видів деревно-кущових рослин цілком посухостійкі, що свідчить про їх стійкість до кліматичних змін в степовій зоні України та доцільність їхнього використання при створенні та реконструкції паркових зон населених пунктів досліджуваного регіону.

Література

1. Адаменко Т.І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату. Київ: ТОВ «RIA» BLITS. 2014. 16 с.
2. Балабак О.А., Балабак А.В., Василенко О.В., Нікітіна О.В., Гнатюк Н.О. Оцінка посухостійкості Робінії псевдоакації (*Robinia pseudoacacia* L.) у різних екологічних умовах міста Умань. Збірник наукових праць Уманського національного університету. 2022. 100(1). С. 180–188. <https://doi.org/10.31395/2415-8240-2022-100-1-180-188>
3. Баюра О.М. Посухостійкість ясени звичайного (*Fraxinus excelsior* L.) та його декоративних форм в умовах Правобережного Лісостепу України. Науковий вісник НЛТУ України. 2011. 21(1). С. 33–38.
4. Бессонова В.П., Іванченко О.Є. Аналіз жаростійкості хвойних рослин у вуличному насадженні м. Дніпро. Рослини та урбанізація. Мат. IX Міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 5 березня 2020 р.). 2020. С. 61–62.
5. Гаврилюк О. С., Євдокимов Д. С., Король І. Л., Кушим А. В., Майборода Д. С., Олійник Б. І. Посухо- та жаростійкість сортів та гібридів яблуні колоноподібного типу. Наукові доповіді національного університету біоресурсів і природокористування України. 2024. 20(1). [https://doi.org/10.31548/dopovidi.1\(107\).2024.007](https://doi.org/10.31548/dopovidi.1(107).2024.007)
6. Григорюк І. П., Яворовський П.П. Вплив ґрунтової посухи на вміст води, вуглеводів та азоту в сіянцях деревних рослин. Аграрна наука і освіта. 2005. 5(6). С. 12–16.
7. Данильчук Н.М., Данильчук О.В. Особливості сезонної динаміки водообмінних процесів у видів роду *Populus* L. у дендрарії Криворізького ботанічного саду. Інтродукція рослин. 2018. 2. С. 92–101. <https://www.researchgate.net/publication/389826926>
8. Долгова Л.Г., Зайцева І.О. Оцінка посухо- та зимостійкості деревних екзотів, інтродукованих у Степову зону. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Біологія. 2008. 24. С.104–109.
9. Ковалевський С.Б., Кривохатко А.А. Засухоустойчивость и водоудерживающая способность растений *Thuja occidentalis* L. и ее культиваров. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Вип. 28(2). С. 77–80. <https://doi.org/10.15421/40280214>
10. Миколайко І.І. Оцінка посухостійкості *Hippophae rhamnoides* L. в Правобережному Лісостепу України. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. 27(1). С. 57–60.
11. Нужина Н.В., Іванова І.Ю., Грицак Л.Р., Дробик Н.М. Посухостійкі види дерев та кущів – важлива ланка для зменшення негативних ефектів «міських островів тепла». Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія Біологія. 2022. 82(3). С. 37–43. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.22.3.6>
12. Поворотня М. М. Еколого-фізіологічний аналіз стійкості видів роду *Acer* у техногенних умовах теплових електростанцій Дніпропетровщини. Дис... на здобуття наукового ступеня канд. біол. наук. 2016. 250 с.
13. Поляков А.К., Суслова Е.П. Хвойные на юго-востоке Украины. Донецк: Норд-Пресс. 2004. 195 с.
14. Суслова О. П. Водоудерживающая способность культиваров *Thuja occidentalis* L., інтродукованих в північно-степовій зоні України. Рослини та урбанізація: Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 100-річчю ювілею ДДАЕУ (Дніпро, 3 березня 2022 р.). Дніпро. 2022. С. 54–56.
15. Bihan Guo, Stefan K. Arndt, Rebecca E. Miller, Christopher Szota, Claire Farrell. How does leaf succulence relate to plant drought resistance in woody shrubs. *Tree Physiology*. 2023. Vol. 43(9). P. 1501–1513. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpad066>
16. Guo Peipei, Su Yuebo, Wan Wuxing, Liu Weiwei, Zhang Hongxing, Sun Xu, Ouyang Zhiyun, Wang Xiaoke. Urban Plant Diversity in Relation to Land Use Types in Built-up Areas of Beijing. *Chin. Geogra. Sci*. 2018. Vol. 28(1). P. 100–110. <https://doi.org/10.1007/s11769-018-0934-x>
17. Henrik Sjöman, Sanna Ignell, Andrew Hiron. Selection of Shrubs for Urban Environments – An Evaluation of Drought Tolerance of 120 Species and Cultivars. *Hortscience*. 2023. 58(5). P. 573–579. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI17063-22>
18. Luo Dan-Dan, Wang Chuan-Kuan, Jin Ying. Response mechanisms of hydraulic systems of woody plants to drought stress. *Chinese Journal of Plant Ecology*. 2021. 45(9). P. 925–941. <https://doi.org/10.17521/cjpe.2021.0111>
19. Wilson, L., New, S., Daron, J., & Golding, N. (2021). Climate Change Impacts for Ukraine. Met Office. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/Zmina_klimaty/2021/%D0%97%D0%B2%D1%96%D1%82.pdf
20. Zhang Dengxiao, Jie Hongbin, Zhang Wenjing, Yuan Qingsong, Ma Zhihang, u Haizhong, Rao Wei, Liu Shiliang, Wang Daichang. Combined biochar and water-retaining agent application increased soil water retention capacity and maize seedling drought resistance in Fluvisols. *Science of The Total Environment*. 2024. 907. 167885. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167885>

ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИЙ ФОНД УКРАЇНИ

УДК 502.4(477.86)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.28>

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕРЕЖІ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ В ІВАНО-ФРАНКІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Лялюк-Вітер Г.Д.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ
halyna.lialiuk-viter@nung.edu.ua

Стаття присвячена аналізу мережі природно-заповідного фонду Івано-Франківської області. Природно-заповідні території та об'єкти є основою збереження біологічного та ландшафтного різноманіття, генофонду тваринного і рослинного світу. Вони підтримують загальний екологічний баланс, що є критично важливим для розуміння довгострокових змін у природних системах. Збереження цілісності природних екосистем, їхнього видового складу та генетичної унікальності популяцій є одним із завдань сталого розвитку, і саме в межах природно-заповідних територій існують найбільші можливості для збереження біологічного та ландшафтного різноманіття. Природно-заповідний фонд України є невід'ємною частиною європейської та світової природоохоронної мережі. Івано-Франківська область, незважаючи на значну антропогенну трансформацію ландшафтів, займає одне з провідних місць в сфері природоохорони. За результатами проведеного аналізу встановлено, що Івано-Франківська область демонструє стабільне зростання площі та кількості природно-заповідних територій та об'єктів. Зокрема, за період 2015-2024 років площа заповідності збільшилася на 0,5%, досягнувши 16,2% від загальної площі області (станом на 01.01.2024 р. налічується 535 заповідних територій та об'єктів загальною площею 225185,34 га), що поступово наближається до європейських стандартів. Кількість об'єктів ПЗФ зросла на 62 одиниці (з 473 до 535), що свідчить про позитивну динаміку заповідання в межах території Івано-Франківської області. Сучасна мережа ПЗФ Івано-Франківської області, яка включає 33 об'єкти загальнодержавного та 502 об'єкти місцевого значення, ефективно репрезентує увесь комплекс висотної зональності регіону (62% об'єктів розташовані в гірській частині) та відіграє основну роль у збереженні біологічного та ландшафтного різноманіття. У висновках акцентується увага на важливості отриманих результатів для подальших наукових досліджень природно-заповідних територій та об'єктів Івано-Франківської області щодо їх значення та ролі для підтримання та збереження сталості екологічних систем. Отримані результати мають наукове та практичне значення. *Ключові слова:* природно-заповідний фонд, природно-заповідні території та об'єкти, екологічна мережа, Смарагдова мережа, біологічне та ландшафтне різноманіття, екологічна система.

Research on the network of natural reserve fund in Ivano-Frankivsk region. Lialiuk-Viter H.

The article is devoted to the analysis of the Nature Reserve Fund network in the Ivano-Frankivsk region. Protected areas and sites serve as the foundation for the preservation of biological and landscape diversity, as well as the gene pool of flora and fauna. They maintain the overall ecological balance, which is critically important for understanding long-term changes in natural systems. Preserving the integrity of natural ecosystems, their species composition, and the genetic uniqueness of populations is one of the key tasks of sustainable development. It is precisely within protected areas that the greatest opportunities exist for conserving biodiversity and landscape variety. The Nature Reserve Fund of Ukraine is an integral part of the European and global environmental protection network. Despite significant anthropogenic transformation of landscapes, the Ivano-Frankivsk region ranks among the leading areas in the field of nature conservation. The conducted analysis shows that the region demonstrates steady growth in both the area and number of protected territories and sites. In particular, between 2015 and 2024, the protected area increased by 0.5%, reaching 16.2% of the total area of the region. As of January 1, 2024, there are 535 protected areas and sites with a total area of 225,185.34 hectares, gradually approaching European standards. The number of protected sites increased by 62 units (from 473 to 535), which indicates a positive trend in nature conservation across Ivano-Frankivsk region. The current network of protected areas in the region includes 33 national and 502 local sites. It effectively represents the entire altitudinal zonation of the region (62% of the sites are located in the mountainous area) and plays a key role in the preservation of biological and landscape diversity. The conclusions emphasize the importance of the obtained results for further scientific research of protected areas and sites in Ivano-Frankivsk region, particularly regarding their significance and role in maintaining and preserving the sustainability of ecological systems. The results have both scientific and practical value. *Key words:* Natural Reserve Fund, protected areas and sites, ecological network, Emerald Network, biological and landscape diversity, ecological system.

Постановка проблеми. Російсько-українська війна є найбільшою загрозою та проблемою для сучасної України, її людей та природних екосистем. Бойові дії та терористичні атаки загарбників негативно впливають на компоненти довкілля, зокрема на стан природно-заповідних територій (ПЗТ) та

об'єктів. У світі вже і так швидкими темпами відбувається збіднення та зникнення видів рослинного і тваринного світу, а також середовищ їхнього існування. Все це призводить до різкого скорочення генофонду біорізноманіття. За даними Всесвітнього союзу охорони природи (IUCN), 15% ссавців, 13%

птахів, 37% прісноводних риб та 23% земноводних Європи перебувають під загрозою зникнення [1].

Кількісний і якісний стан біологічного різноманіття є запорукою збереження стабільності та стійкості екосистем. Екосистема стійка тоді, коли вона цілісна. Її цілісність забезпечується перебігом самовідновлювальних процесів, і лише цілісна екосистема може витримувати антропогенне навантаження. Тому в основі сучасної концепції природоохорони лежать принципи цілісності, стійкості та репрезентативності.

Природно-заповідний фонд (ПЗФ) України є складовою частиною європейської та світової мережі природоохоронних територій, яка постійно розвивається. Це важлива передумова для забезпечення сталого розвитку країни та її відновлення після війни. У справі природоохорони України одне з цільних місць займає Івано-Франківська область.

Актуальність дослідження. Збереження цілісності природних екосистем, їхнього видового складу та генетичної унікальності популяцій є одним із завдань сталого розвитку. Саме в межах природно-заповідних територій існує найбільше можливостей для збереження біологічного та ландшафтного різноманіття. Одним із найефективніших способів охорони біологічного різноманіття є повне або хоча б часткове виведення з господарського обігу територій існування рідкісних видів, популяцій рослин та тварин. ПЗФ виступає як екологічностабілізаційний чинник екосистем. Збереження природних екосистем відбувається від процесу заповідання до формування екологічної та Смарагдової мережі.

За офіційною інформацією Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, в країні налічується 8633 території та об'єкти природно-заповідного фонду, що складає 6,8% площі країни. До складу ПЗФ України входять 5 біосферних заповідників, 19 природних заповідників, 53 національні природні парки. Проте відсоток заповідності в Україні більш ніж утричі менший порівняно з європейськими країнами [2].

Території ПЗФ найвищого рангу охорони (природні та біосферні заповідники, національні природні парки) охоплюють загальну площу 1 236 366 га. З них 44% опинилися в зоні бойових дій, під тимчасовим контролем російських військ або є недоступними для України. Йдеться про близько 900 природоохоронних об'єктів, серед яких 14 водно-болотних угідь міжнародного значення [3].

Смарагдова мережа в Україні формується в рамках виконання вимог Конвенції про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі [1]. У межах Смарагдової мережі України є унікальні оселища, яких немає більше ніде в Європі [1-3]. До українського переліку територій Смарагдової мережі входить 377 територій загальною площею близько 8 млн га станом на березень 2021 року [2]. На жаль, майже 30% об'єктів Смарагдової мережі перебува-

ють під російською окупацією та знищуються під час бойових дій [2].

Івано-Франківська область є позитивним прикладом у сфері природоохорони в Україні. Хоча область багата на природні умови та ресурси, для більшої її частини характерна антропогенна трансформація ландшафтів. Сучасна мережа ПЗФ Івано-Франківської області репрезентує увесь комплекс висотної зональності [4].

Поштовхом до розвитку природоохорони як в Україні загалом, так і в Івано-Франківській області, стало прийняття Закону України «Про природно-заповідний фонд» у 1992 році [5, 6]. У жовтні 1996 року Україна приєдналася до Бернської Конвенції [1]. У 2000 році був прийнятий Закон України «Про Загальнодержавну програму формування національної екологічної мережі України на 2000-2015 роки» [1]. Згідно з цим Законом, національна екологічна мережа має відповідати вимогам щодо її функціонування у Всеєвропейській екологічній мережі та виконувати провідні функції щодо збереження біологічного різноманіття.

Створення в Україні Смарагдової мережі як складової частини Європейської мережі було започатковано Законом України «Про ратифікацію Угоди про асоціацію між Україною та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергетики і їхніми державами-членами» від 16 вересня 2014 року № 1678-VII [1].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дане дослідження спрямоване на вивчення важливої проблеми збереження біорізноманіття в нестабільних умовах війни та пошук шляхів максимального збереження природних екосистем на природно-заповідних територіях. Наукове значення роботи полягає у вивченні динаміки змін мережі ПЗФ Івано-Франківщини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вивченню наявності, структури та стану природно-заповідних територій присвячено багато наукових праць. Результати досліджень обговорюються на різних наукових та науково-практичних конференціях, а також публікуються в наукових статтях, монографіях тощо. Вагомий внесок у створення, виділення та формування мережі ПЗФ Івано-Франківської області зробили науковці Інституту екології Карпат, науково-дослідного інституту гірського лісівництва та низка інших українських вчених, зокрема Кагало О.О. [7], Дідух Я.П. [8], Василюк О. [9] та інші.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою статті є аналіз структури та стану природно-заповідного фонду Івано-Франківської області під час війни.

Новизна полягає в комплексному підході до вивчення стану та структури територій і об'єктів ПЗФ Івано-Франківщини як складової частини екологічної та Смарагдової мережі.

Методологічне або загальнонаукове значення. Природно-заповідні території та об'єкти, завдяки створенню екологічної та Смарагдової мережі, утворюють цілісну систему, яка може змінюватися через військові дії. Тому вкрай важливо постійно проводити дослідження цих змін та фіксувати їх.

Виклад основного матеріалу. Управління природно-заповідними територіями здійснюється Законом України «Про природно-заповідний фонд» [5, 6]. Цей Закон класифікує території ПЗФ на природні території та об'єкти (природні заповідники, біосферні заповідники, національні природні парки, регіональні ландшафтні парки, заказники, пам'ятки природи, заповідні урочища) та штучно створені об'єкти (ботанічні сади, дендрологічні парки, зоологічні парки, пам'ятки природи, парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва).

Згідно з Регіональною доповіддю про стан навколишнього середовища, станом на 01.01.2024 р. [10] в Івано-Франківській області нараховується 535 заповідних територій та об'єктів загальною площею 225185,34 га, що становить 16,2% площі території області. Відрадно те, що протягом останніх років, незважаючи на війну, в Івано-Франківській області зростає площа заповідності територій та об'єктів (рис. 1).

Як видно з рисунка 1, за 10 років площа природно-заповідних територій зросла на 6361,44 га, тобто на 0,5%. Значний стрибок збільшення площі

заповідання відбувся у 2021 р. – на 0,26% порівняно з 2020 р. (відповідно площа 222387,5 га у 2021 р. проти 218886,34 га у 2020 р.).

Із збільшенням площі відповідно збільшилася й кількість природно-заповідних територій та об'єктів (табл. 1). За період з 2015 р. по 2024 р. кількість природно-заповідних територій збільшилася на 62 одиниці (з 473 до 535).

Таблиця 1

**Динаміка мережі природно-заповідного фонду
Івано-Франківської області протягом
2015-2024 р.р.**

Роки	Кількість, штук	Площа, га	Відсоток фактичної площі заповідності відносно загальної площі області, %
2015	473	218823,9	15,7
2016	474	218823,9	15,7
2017	474	218830,18	15,7
2018	474	218828,18	15,7
2019	482	218886,98	15,7
2020	482	218886,98	15,7
2021	516	222387,5	15,96
2022	526	223852,018	16,07
2023	526	223852,018	16,07
2024	535	225185,34	16,2

Примітка. Таблиця сформована на основі Регіональних доповідей про стан навколишнього середовища в Івано-Франківській області (2016-2023 р.р.) [4]

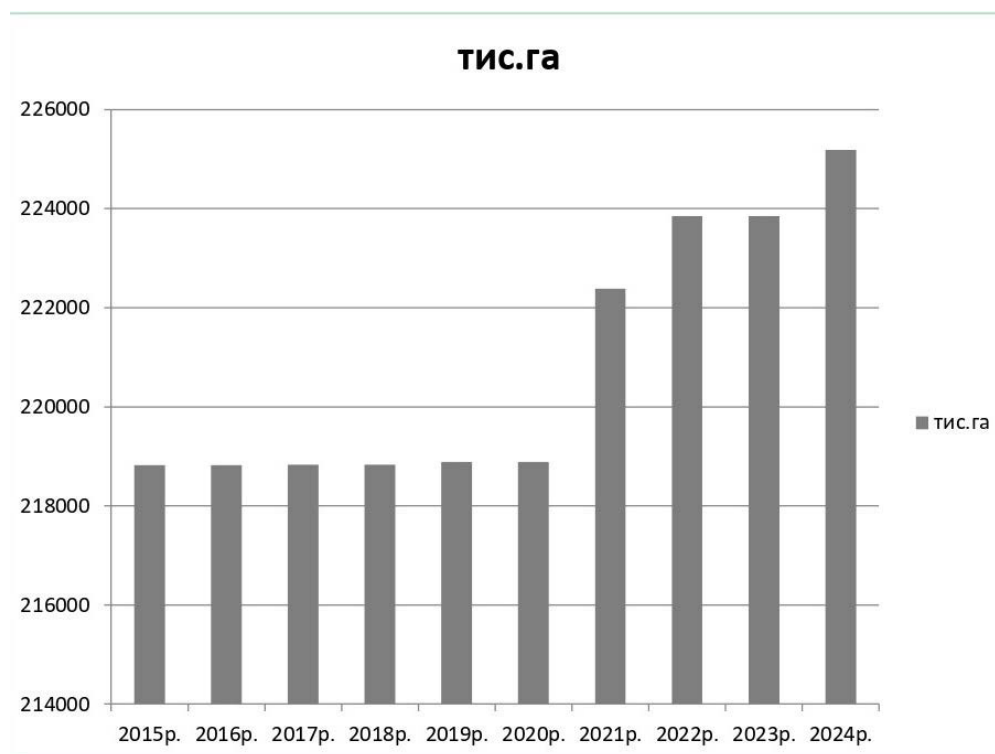


Рис. 1. Динаміка зростання площі природно-заповідного фонду Івано-Франківської області протягом 2015-2024 р.р.

ПЗФ Івано-Франківської області формують території та об'єкти загальнодержавного та місцевого значення. До загальнодержавних відносять 33 території та об'єкти загальною площею 131624,562 га. Серед них: природний заповідник «Горгани» (5,3 тис. га); 5 національних природних парків (120,3 тис. га), а саме: Карпатський національний природний парк, національний природний парк «Гуцульщина», Галицький національний природний парк, національний природний парк «Синьогора», національний природний парк «Верховинський»; 3 дендрологічні парки (142 га); 10 заказників (5415,8 га); 13 пам'яток природи (375,4 га) і 1 парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва (7 га) [10].

До територій та об'єктів місцевого значення належать: 3 регіональні ландшафтні парки (38,4 тис. га): Полянський регіональний ландшафтний парк, регіональний ландшафтний парк «Гуцульщина», регіональний ландшафтний парк «Дністровський»; 57 заказників (36789,0845 га); 234 пам'ятки природи (10847,52 га); парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва (83,4 га); 196 заповідних урочищ (7365,82 га). Загалом 502 об'єкти місцевого значення сумарною площею 93560,7804 га [10].

Як видно з даних [10], у кількісному відношенні переважають пам'ятки природи і заповідні урочища, але за площею частка цих категорій незначна. За розмірами, великих заповідних територій (від 1000 га і більше) – 16, близько половини – це дрібні (1-10 га), трохи менше – об'єкти від 10 до 100 га.

Розглядаючи мережу ПЗФ області з точки зору фізико-географічного районування, необхідно зазначити, що найбільше заповідних об'єктів знаходиться в гірській частині – близько 62% природно-заповідного фонду області; у Передкарпатті – 25%; і в рівнинній частині – 13%.

На природно-заповідних територіях та об'єктах області охороняються рідкісні види рослин і тварин, високопродуктивні букові, дубові, ялицеві та змішані ліси, осередки рідкісної болотної, степової, лучної та високогірної рослинності, а також унікальні геологічні та гідрологічні утворення. Загалом, на заповідних територіях області охороняється понад 1000 видів судинних рослин (55% всієї флори Українських Карпат) [10]. З них 126 видів рослин і грибів занесені до Червоної книги України та Європейського Червоного списку. Також до Зеленої книги України занесено 21 вид рослинних угруповань, зокрема 19 рідкісних та 88 типових, що підлягають охороні, а також 7 видів рослин та грибів, які перебувають під загрозою зникнення [10]. Водночас в області зосереджено 2,6 тис. га збережених водно-болотних угідь, частина яких входить до складу ПЗФ. Всього заповідано 87 боліт площею 1160,0 га [10].

Важливою складовою екомережі Івано-Франківської області є ліси, які поділені за категоріями: природоохоронного, наукового, історико-культурного призначення (займають 19% від вкритої

лісом площі), рекреаційно-оздоровчі ліси – 13%, захисні ліси – 23%, експлуатаційні ліси – 45% [6]. У межах лісового фонду області знаходиться більше 300 об'єктів ПЗФ [10]. На території області мешкає 25 видів представників тваринного світу, які перебувають під загрозою зникнення і занесені до Червоної книги України [10].

У межах Івано-Франківської області серед об'єктів ПЗФ є шість об'єктів Смарагдової мережі, які відповідають критеріям та включені Україною до рекомендованого переліку конвенції, а саме: природний заповідник «Горгани», національні природні парки (Карпатський, «Гуцульщина», Галицький, «Верховинський») та Дністровський регіональний ландшафтний парк [10].

Головні висновки. За результатами проведеного аналізу структури та стану природно-заповідного фонду Івано-Франківської області, можна зробити такі висновки:

1. Івано-Франківська область демонструє стабільне зростання площі та кількості територій та об'єктів ПЗФ. Зокрема, за період 2015-2024 років площа заповідності збільшилася на 0,5%, досягнувши 16,2% від загальної площі області, що поступово наближається до європейських стандартів. Кількість об'єктів ПЗФ зросла на 62 одиниці.

2. Сучасна мережа ПЗФ Івано-Франківської області ефективно репрезентує комплекс висотної зональності та відіграє основну роль у збереженні біологічного та ландшафтного різноманіття регіону. В межах ПЗФ Івано-Франківської області охороняється понад 1000 видів судинних рослин і ті, що занесені до Червоної книги України та Європейського Червоного списку, а також унікальні лісові, водно-болотні та високогірні екосистеми.

3. Активний розвиток ПЗФ області та включення шести об'єктів до Смарагдової мережі (серед яких ПЗ «Горгани», Карпатський, Гуцульщина, Галицький, Верховинський НПП та Дністровський РЛП) підтверджує виконання Україною міжнародних зобов'язань у сфері природоохорони та її прагнення до інтеграції в європейську природоохоронну систему.

4. Попри позитивну динаміку, частина ПЗФ Івано-Франківської області як і України, включно з об'єктами Смарагдової мережі, може опинитися під загрозою воєнного характеру. Тому важливим є моніторинг стану ПЗФ та розробки адаптивних стратегій для мінімізації негативних наслідків війни на довкілля.

Перспективи використання результатів дослідження. Оскільки території та об'єкти ПЗФ є вразливими та чутливими до будь-яких антропогенних впливів, тому наукові дослідження треба проводити постійно. Це може включати детальний аналіз впливу конкретних антропогенних факторів, моделювання змін біорізноманіття, вивчення адаптаційних процесів екосистем та розробку нових підходів до управ-

ління ПЗФ в умовах невизначеності. Результати дослідження можуть бути використані для подальших ґрунтовних наукових досліджень змін у мережі ПЗФ, для обґрунтування можливостей включення нових природно-заповідних територій та об'єктів до

екологічної та Смарагдової мережі, а також для проведення фонових моніторингу. Дослідження цілісності та стійкості екосистем Івано-Франківщини може допомогти у розробці та вдосконаленні критеріїв оцінки ПЗФ України.

Література

1. Лялюк-Вітер Г.Д. Смарагдова мережа як технологія збереження біорізноманіття. *Science and Information Technologies in the Modern World* зб. матеріалів доп. учасн. 2 Міжнар. наук.-практ. конф., Афіни, Греція, 2025. С. 116-118.
2. Природно-заповідний фонд. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України: вебсайт. URL: <https://wownature.in.ua/oberihaymo/pryrodno-zapovidnyy-fond/> (дата звернення: 15.05.2025).
3. Війна та довкілля: природно-заповідний фонд України під загрозою. Одеська національна наукова бібліотека: вебсайт. URL: https://odnb.odessa.ua/view_post.php?id=4841 (дата звернення: 15.05.2025).
4. Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovyshha-v-ukrayini/> (дата звернення: 15.05.2025).
5. Про природно-заповідний фонд: Закон України від 16 червня 1992 року №2456-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-12#n439> (дата звернення: 15.05.2025).
6. Про внесення змін до Закону України «Про природно-заповідний фонд України» щодо забезпечення збереження територій та об'єктів природно-заповідного фонду та розширення їх класифікації: Закон України від 8 січня 2025 року № 4188-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4188-20#Text> (дата звернення: 15.05.2025).
7. Наукові основи збереження біотичної різноманітності Кагало О. О. Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2020. – Режим доступу: <https://esu.com.ua/article-70678> (дата звернення: 10.05.2025).
8. Дідух Я. П. Оцінка стійкості та ризиків втрати екосистем. Наук. записки. НаУКМА, 2014. Т. 158 (Біологія та екологія). С. 54 – 60.
9. Виявлення територій, придатних для оголошення об'єктами природно-заповідного фонду: інструктивні та методичні матеріали / О. Василюк та ін. / за заг. ред. О. Кравченко. Львів : Манускрипт, 2015. 79 с.
10. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Івано-Франківській області в 2023 році. URL: [_Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України ДОПОВІДЬ_2023.pdf](#) (дата звернення: 10.05.2025).

УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

УДК 628.47:504.5

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.29>

АНАЛІЗ СТАНУ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ В ТЕРНОПІЛЬСЬКІЙ ОБЛАСТІ: ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Бондар О.Б.¹, Погорєлова О.М.¹, Котляренко Л.Т.², Галаган О.К.³

¹Західноукраїнського національного університету
вул. Майдан Перемоги, 3, 46009, м. Тернопіль

²Національного університету оборони України
пр. Повітряних Сил, 28, 03049, м. Київ

³Кременецької обласної гуманітарно-педагогічної академії ім. Тараса Шевченка
вул. Ліцейна, 1, 47003, м. Кременець

olexandr.bondar91@gmail.com, yaremakpog@gmail.com, lida_oleg@ukr.net, bukowska.ok@gmail.com

Проблема утилізації та управління відходами є однією з найбільш актуальних екологічних загроз на сучасному етапі розвитку суспільства. В Україні, зокрема в Тернопільській області, накопичується велика кількість сміттєзвалищ, термін експлуатації яких давно завершився, що спричиняє значні негативні екологічні наслідки. У статті проаналізовано стан сміттєзвалищ та об'єктів оброблення відходів у Тернопільській області, використовуючи конкретні показники, що дають змогу оцінити ситуацію в регіоні та визначити пріоритетні напрямки для вдосконалення системи управління відходами.

Аналіз показує, що в області на даний момент існує 11 сміттєзвалищ, термін експлуатації яких завершився, що вимагає прийняття заходів щодо їх закриття та рекультивації. В Тернопільському районі налічується 3 таких об'єкти, в Кременецькому - 1, в Чортківському - 7. Це свідчить про наявність серйозних екологічних загроз, пов'язаних із старими сміттєзвалищами. Для їх ефективного закриття та рекультивації необхідно розробити спеціальні стратегії та забезпечити контроль за виконанням відповідних робіт. Крім того, на території області функціонує 43 паспортизовані сміттєзвалища, термін експлуатації яких триває. Це означає, що система збору та зберігання відходів в регіоні ще не повністю відповідає сучасним вимогам екологічної безпеки.

Незважаючи на наявні проблеми в системі управління відходами, в Тернопільській області спостерігаються позитивні тенденції. Реалізація заходів щодо закриття старих сміттєзвалищ, модернізації полігонів та створення нових об'єктів для переробки відходів має значний потенціал для покращення екологічної ситуації в регіоні. У статті акцентується на необхідності подальшого розвитку інфраструктури для оброблення відходів, що дозволить досягти значущих результатів у зменшенні забруднення довкілля та підвищенні ефективності управління відходами в області. *Ключові слова:* управління відходами, сміттєзвалища, рекультивація, екологічні наслідки, модернізація полігонів, переробка відходів.

Analysis of waste management status in Ternopil region: problems and prospects. Bondar O., Pohorielova O., Kotlyarenko L., Halahan O.

The problem of waste disposal and management is one of the most pressing environmental threats at the current stage of societal development. In Ukraine, particularly in the Ternopil region, a large number of landfills have accumulated, whose operational life has long expired, causing significant negative environmental consequences. The article analyzes the condition of landfills and waste processing facilities in Ternopil region, using specific indicators that allow assessing the situation in the region and identifying priority areas for improving waste management systems.

The analysis shows that there are currently 11 landfills in the region that have exceeded their operational life, requiring measures for their closure and reclamation. In the Ternopil district, there are 3 such facilities, in the Kremenets district - 1, and in the Chortkiv district - 7. This indicates serious environmental threats associated with outdated landfills. To effectively close and reclaim them, special strategies need to be developed, and control over the execution of relevant works must be ensured. Moreover, 43 registered landfills are still in operation in the region, meaning that the waste collection and storage system in the area does not yet fully meet modern environmental safety requirements.

Despite the existing problems in the waste management system, there are positive trends in Ternopil region. The implementation of measures to close old landfills, modernize waste disposal sites, and create new recycling facilities has significant potential to improve the environmental situation in the region. The article emphasizes the need for further development of waste processing infrastructure, which will lead to substantial results in reducing environmental pollution and improving the efficiency of waste management in the region. *Key words:* waste management, landfills, reclamation, environmental consequences, landfill modernization, waste recycling.

Постановка проблеми. Проблема поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) у Тернопільській області набула загрозливого характеру. На території регіону функціонує 740 сміттєзвалищ, із яких лише 91 має належну сертифікацію, а 31 є комунальними об'єктами. Значна частина

звалищ функціонує з перевищенням допустимих обсягів накопичення відходів, що створює серйозне екологічне навантаження. Особливу загрозу становить звалище в селі Малашівці, де вже накопичено близько 15 млн м³ відходів у безпосередній близькості до джерела водопостачання Тернополя. У сіль-

ській місцевості ситуація ще гірша: лише 10 % відходів утилізується організовано, решта – спалюється або скидається в річки.

Актуальність дослідження. Критичний екологічний стан сміттєзвалищ, відсутність належної інфраструктури переробки, а також недосконалість системи моніторингу роблять проблему управління ТПВ надзвичайно актуальною. Єдина в області лінія сортування, розташована в селі Плебанівка, не в змозі ефективно обслуговувати потреби всього регіону. Актуальність також зумовлена необхідністю впровадження інноваційних рішень – таких як БПЛА та ГІС – які дозволять забезпечити ефективний контроль за станом звалищ та оцінювати їхній вплив на довкілля.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження спрямоване на вирішення як наукових, так і практичних завдань. Зокрема, йдеться про аналіз поточного стану інфраструктури поводження з ТПВ в Тернопільській області, виявлення ключових екологічних загроз, формування пропозицій щодо впровадження інноваційних технологій та організаційних моделей для зменшення негативного впливу відходів на довкілля та здоров'я населення. Дослідження також обґрунтовує необхідність будівництва сучасного заводу з переробки ТПВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняні та зарубіжні дослідження підтверджують ефективність впровадження цифрових технологій для моніторингу та управління відходами. Зокрема, використання БПЛА дозволяє в реальному часі фіксувати зміни на звалищах, виявляти несанкціоновані викиди та покращувати екологічну безпеку. Також набувають популярності геоінформаційні системи,

що забезпечують просторовий аналіз територій і допомагають приймати рішення на основі точних даних. Проте більшість публікацій не охоплює локальний рівень та не враховує особливостей екологічної ситуації в Тернопільській області.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність загальних досліджень, низка важливих аспектів залишаються недостатньо вивченими: відсутність глибокого аналізу ситуації в сільських громадах, де майже повністю відсутні системи збору та утилізації відходів; нестача інфраструктури для сортування і переробки (в області лише одна лінія сортування); відсутність стратегії регіонального співробітництва у сфері поводження з ТПВ; обмежене використання інноваційних технологій моніторингу в умовах українських реалій.

Новизна. У даному дослідженні пропонується новий підхід до управління відходами на основі використання: безпілотних літальних апаратів (БПЛА) – для оперативного екологічного контролю за станом сміттєзвалищ; геоінформаційних систем (ГІС) – для просторового аналізу та виявлення зон ризику; дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) – для оцінки впливу звалищ на довкілля в реальному часі.

Крім того, робота обґрунтовує необхідність створення міжрегіонального центру з переробки ТПВ на території області, що дозволить розв'язати проблему перевантаження звалищ і мінімізувати ризики для навколишнього середовища.

У дослідженні використовувалися матеріали, надані Управлінням екології та природних ресурсів Тернопільської обласної державної адміністрації. Ці матеріали містили дані щодо класифікації звалищ за типами, масштабами та ступенем впливу на довкілля [1].

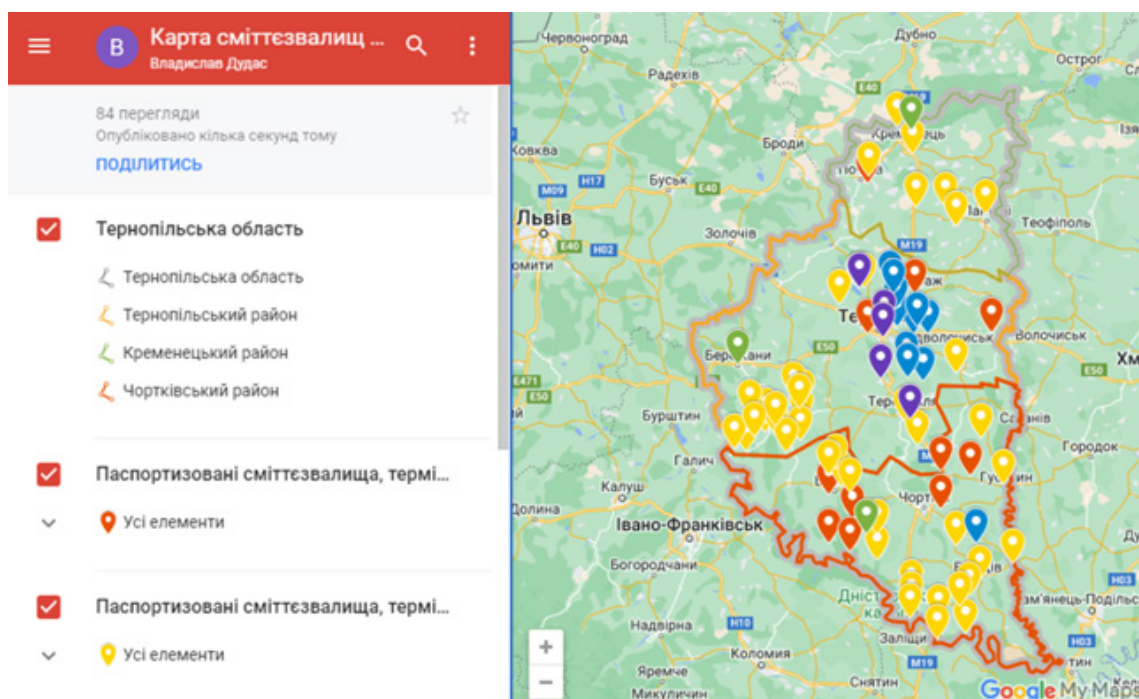


Рис. 1. Схема-карта інтерактивних сміттєзвалищ Тернопільської області [1]

Для аналізу екологічного стану звалищ застосовувалися такі методи: картографічний, аналітичний. Отримані дані дозволили здійснити комплексний аналіз стану діючих та перспективних звалищ Тернопільської області та оцінити їхній екологічний вплив на регіон.

Загальнонаукове значення. Загальнонаукове значення полягає у створенні адаптивної моделі для аналізу екологічного стану регіонів з подібними проблемами, яка може бути застосована в інших областях України або країнах із перехідною економікою. Крім того, дослідження акцентує на важливості поєднання технологічних рішень з просвітницькою діяльністю серед населення, що розширює межі екологічної науки в напрямку сталого розвитку та екологічної безпеки.

Викладення основного матеріалу. Проблема звалищ є однією з найбільш актуальних екологічних загроз сучасності. Щороку людство продукує мільярди тонн відходів, значна частина яких накопичується на відкритих полігонах та стихійних сміттєзвалищах. Неконтрольоване зростання цих об'єктів призводить до забруднення ґрунтів, води та повітря, негативно впливає на біорізноманіття та здоров'я людей.

Аналіз наданих показників щодо стану сміттєзвалищ та об'єктів оброблення відходів в Тернопільській області дозволяє виявити ключові проблеми і перспективи розвитку системи управління відходами.

Перш за все, варто відзначити, що в області є значна кількість сміттєзвалищ, термін експлуатації яких завершився. В Тернопільському районі таких об'єктів 3, в Кременецькому – 1, а в Чортківському – 7. Це свідчить про наявність проблем з ліквідацією та рекультивацією старих полігонів, що може негативно впливати на навколишнє середовище та здоров'я місцевих мешканців.

Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити стратегії по закриттю та рекультивації старих сміттєзвалищ і здійснити відповідний контроль за їх виконанням.

З іншого боку, наявність 43 паспортизованих сміттєзвалищ, термін експлуатації яких триває, свідчить про існування організованих місць для збору відходів. Однак цей факт також вказує на те, що система управління відходами в області все ще

потребує вдосконалення. Для покращення ситуації потрібно модернізувати існуючі полігони, зокрема для забезпечення високих екологічних стандартів.

Що стосується об'єктів, по яких прийняті рішення місцевих органів щодо закриття, то в Тернопільському районі їх 11, в Чортківському – 1. Це є важливим кроком у зменшенні забруднення довкілля, але реалізація таких рішень потребує додаткових ресурсів для виконання робіт з рекультивації та забезпечення належного контролю (рис. 1).

Перспективні земельні ділянки для створення регіональних полігонів також мають велике значення для покращення ситуації. Всього в області є 4 такі ділянки, що відкриває можливості для розвитку нових об'єктів, здатних зменшити навантаження на існуючі полігони і покращити загальний стан системи управління відходами.

Щодо об'єктів оброблення відходів, то на даний момент в області функціонує лише 5 таких об'єктів. Це показує, що для досягнення значущих результатів в переробці відходів необхідно розширювати інфраструктуру та збільшувати кількість таких підприємств, що дозволить ефективніше управляти відходами в тернопільській області.

Головні висновки. Отже, підсумовуючи вищезазначене, можна сказати, що хоча в Тернопільській області є суттєві проблеми в управлінні відходами, наявні позитивні кроки, які дозволяють очікувати покращення ситуації. Важливими напрямками для подальших дій є рекультивація старих сміттєзвалищ, створення нових полігонів та розвиток інфраструктури для переробки відходів.

Перспективи використання результатів дослідження. Тернопільська область стикається з проблемою значної кількості сміттєзвалищ, термін експлуатації яких завершився (11 об'єктів). Це створює серйозні екологічні загрози, зокрема забруднення ґрунтів, води та повітря. Для зменшення цих ризиків необхідно здійснити закриття та рекультивацію старих полігонів. Модернізація існуючих полігонів (43 об'єкти) і створення нових об'єктів для переробки відходів є важливими кроками в покращенні управління відходами.

Таблиця 1

Облік сміттєзвалищ Тернопільської області

Показники	Тернопільський	Кременецький	Чортківський	Разом
Паспортизовані сміттєзвалища стосовно термін експлуатації яких завершено	3	1	7	11
Паспортизовані сміттєзвалища, термін експлуатації яких триває	19	5	19	43
Паспортизовані сміттєзвалища стосовно яких прийнято рішення місцевого самоврядування про закриття	11	-	1	12
Перспективні земельні ділянки для розміщення регіональних полігонів	2	1	1	4
Діючі об'єкти оброблення відходів	5	-	-	5
Разом	40	7	28	75

Окрім закриття старих сміттєзвалищ, важливим є розвиток інфраструктури для оброблення відходів. В області є лише 5 діючих об'єктів оброблення відходів, що обмежує ефективність переробки. Збільшення кількості таких підприємств дозволить

зменшити навантаження на полігони і покращити екологічну ситуацію. Перспективні земельні ділянки для створення нових полігонів (4 ділянки) можуть допомогти в ефективному управлінні відходами в регіоні.

Література

1. На Тернопільщині створили інтерактивну мапу сміттєзвалищ області. Тернопільська обласна державна адміністрація. Дата публікації: 2023. URL: <https://oda.te.gov.ua/news/na-ternopilshchyni-stvoryly-interaktyvnu-mapu-smittiezvalyshch-oblasti> [дата звернення: 18.02.2025].
2. Стан управління відходами в територіальних громадах України. Zero Waste, 2024. URL: <https://zerowaste.org.ua/2024/05/23/stan-upravlinnya-vidhodamy-v-terytorialnyh-gromadah-ukrayiny/> [дата звернення: 18.02.2025].
3. Управління відходами. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua/upravlinnya-vidhodamy> [дата звернення: 18.02.2025].
4. Царик Л., Царик П., Оливко О., Янковська Л. Функціональні особливості і типологія міських територіальних громад Тернопільської області. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Географія. Тернопіль : Тайп, 2023. № 2 (55). С. 36-42. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.23.2.4>
5. Ярема О., Федонюк Л., Бицюра Л., Бондар О. Антропогенні зміни навколишнього середовища під впливом накопичення твердих побутових відходів. Регіональні аспекти розвитку продуктивних сил України. 2023. Вип. 28. С. 49-58.
6. Azimov O., Shevchuk O., Azimova K., Dorofey Y., Tomchenko O. Integration of GIS and RSE Aiming to the Effective Monitoring of the Surroundings of Landfills. Ukrainian Journal of Remote Sensing. 2020. Vol. 27. P. 4-12. DOI: 10.36023/ujrs.2020.27.183.
7. Filkin T., Sliusar N., Ritzkowski M., Huber-Humer M. Unmanned Aerial Vehicles for Operational Monitoring of Landfills. Drones. 2021. Vol. 5, No. 4. P. 125. DOI: 10.3390/drones5040125.
8. Glovyn N. M., Pavliv O. V. Ecological Monitoring of the Impact of Agrochemical Plant Protection Products on the Adjacent Areas of Farming Enterprises in the Ternopil Region. Scientific Messenger LNUVMB. Series: Agricultural Sciences. 2023. Vol. 25, No. 99. P. 89-93.
9. Pasternak G., Zaczek-Peplinska J., Pasternak K., Jóźwiak J., Pasik M., Koda E., Vaverková M. D. Surface Monitoring of an MSW Landfill Based on Linear and Angular Measurements, TLS, and LIDAR UAV. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 4. P. 1847. DOI: 10.3390/s23041847.
10. Shevchuk O. V., Azimov O. T., Tomchenko O. V. Remote Sensing Monitoring of the Landfill Sites as a Factor of Adverse Environmental Impact. Geoinformatics. 2021. Vol. 2021. P. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521054>
11. Struchok V. Waste Management Problems in the Ternopil Region. Environmental Problems. 2020. Vol. 5, No. 3. P. 143-148.
12. Yankovs'ka L., Novyts'ka S. Problems and Prospects of Municipal Solid Waste Management in the Ternopil Region. Environmental Problems. 2020. Vol. 5, No. 3. P. 143-148. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2020.03.143>

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРАКТИК ПОВОДЖЕННЯ З ПОБУТОВИМИ ВІДХОДАМИ: ЄВРОПЕЙСЬКИЙ ДОСВІД МЕНЕДЖМЕНТУ ІСНУЮЧИХ ЗВАЛИЩ

Ілляш О.Е., Ганошенко Г.В.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

пр. Першотравневий, 24, 36011, м. Полтава

iloks2504@gmail.com, vkb_gena@ukr.net

У статті здійснено комплексний аналіз сучасних європейських практик управління існуючими полігонами твердих побутових відходів (ТПВ) з урахуванням технічних, екологічних, соціальних та економічних аспектів. Окреслено ключові напрями поводження зі звалищами в країнах ЄС, зокрема: технічна рекультивация з дегазацією, впровадження технології «landfill mining» (вилучення корисних фракцій для повторного використання), використання поновлюваних джерел енергії та цифровий моніторинг полігонів. Вивчено приклади реалізації зазначених підходів у таких країнах, як Австрія, Франція, Литва, Нідерланди, Німеччина, Швеція та Чехія. Особливу увагу приділено впровадженню інноваційних технологій, включаючи сенсорні системи для моніторингу викидів, геоінформаційні платформи та цифрові паспорти полігонів. Проаналізовано економічні моделі управління, засновані на принципах державно-приватного партнерства, екологічного оподаткування та залучення місцевих громад до прийняття рішень. Здійснено SWOT-аналіз потенціалу впровадження цих підходів в Україні, виокремлено сильні сторони, ризики та можливості. Визначено базові кроки для адаптації: гармонізація національного законодавства з директивами ЄС, цифровізація контролю полігонів, формування системи підготовки кадрів, активізація громадської участі, розробка міжмуніципальних стратегій розвитку. Особливо підкреслюється важливість поєднання політичної волі, технічної спроможності та ефективних фінансових механізмів для досягнення сталого управління відходами. Отримані результати можуть бути використані при формуванні регіональних планів управління відходами, у програмах міжнародного співробітництва, при підготовці заявок на грантове фінансування, в процесі розробки державних політик, а також для побудови повноцінної циркулярної економіки в Україні. *Ключові слова:* побутові відходи, звалище відходів, менеджмент відходів, закриття та рекультивация звалищ.

Analysis of Modern Practices in Municipal Waste Management: European Experience in Landfill Governance. Iliash O., Hanoshenko H.

This article presents a comprehensive analysis of modern European practices in the management of existing municipal solid waste (MSW) landfills, taking into account technical, environmental, social, and economic aspects. The study outlines key directions in landfill management across EU countries, including technical reclamation with degasification systems, the implementation of “landfill mining” technologies (extraction of recyclable and recoverable fractions), the use of renewable energy sources, and the integration of digital landfill monitoring. Practical examples from Austria, France, Lithuania, the Netherlands, Germany, Sweden, and the Czech Republic are examined. Particular attention is paid to the introduction of innovative technologies, including emission monitoring sensors, geographic information systems (GIS), and digital landfill passports. The article analyzes economic governance models based on public-private partnerships, environmental taxation, and active community involvement in decision-making. A detailed SWOT analysis of the potential for implementing these practices in Ukraine is conducted, identifying key strengths, risks, and opportunities. Core steps for adaptation are proposed: harmonization of national legislation with EU directives, digitalization of landfill oversight, the development of professional training systems, increased civic participation, and inter-municipal planning strategies. Emphasis is placed on the importance of combining political will, technical capacity, and effective financial mechanisms to achieve sustainable waste management. The research findings can be applied in the development of regional waste management plans, in international cooperation programs, for preparing applications for grant funding, in the formulation of public environmental policies, and in building a comprehensive circular economy framework in Ukraine. *Key words:* household waste, landfill, waste management, landfill closure and reclamation.

Постановка проблеми. Накопичення та неефективне управління твердими побутовими відходами (ТПВ) в Україні є однією з найбільш критичних екологічних проблем. Станом на 2025 рік понад 90% ТПВ в Україні видаляються на звалища, значна частина яких функціонує без належного екологічного контролю, дегазації, збору фільтрату чи моніторингу стану. Ці об'єкти становлять реальну небезпеку для довкілля та здоров'я населення. Також варто відзначити, що більшість існуючих звалищ вичерпали свій проєктний ресурс, не мають запроєктованих рішень з рекультивациі, а також не інтегровані у жодну модель сталого управління. Попри те, що в країнах Європейського

Союзу рівень перероблення та повторного використання відходів зростає, в Україні досі домінує застаріла практика «захоронення без подальшого контролю», яка суперечить європейським екологічним стандартам і цільовим орієнтирам циркулярної економіки [1, 2].

У цьому контексті виникає необхідність:

- перегляду підходів до управління існуючими звалищами (полігонами);
- впровадження сучасних технологій закриття й рекультивациі звалищ, їх дегазації та моніторингу подальшого стану;
- оцінки потенціалу інтеграції європейського досвіду у вітчизняні практики.

Таким чином, сформульована проблема стосується не лише технічного зносу звалищ/полігонів, а й системної відсутності управлінських, правових і фінансових інструментів для їх безпечної експлуатації, закриття (консервації) або трансформації у частину екологічно безпечної інфраструктури.

Актуальність дослідження. Питання зростання обсягів утворення, накопичення побутових відходів та необхідність їх подальшого перероблення залишаються одними з найвагоміших екологічних проблем. За даними Європейського агентства з навколишнього середовища на 2023 рік у країнах ЄС щорічно утворювалося понад 220 млн. тонн ТПВ. Близько 25% відходів все ще захоронюються, попри зростання рівня перероблення [1]. В Україні ситуація ще складніша — понад 90% ТПВ потрапляє на звалища, значна частина з яких не відповідає екологічним вимогам. Ці об'єкти часто становлять загрозу для підземних вод, ґрунтів і повітряного середовища, особливо у регіонах з високим рівнем урбанізації. Станом на зараз більшість звалищ функціонують за застарілим принципом «захоронення без подальшого управління», тобто вони не оснащені системами дегазації, збору фільтрату та моніторингу. У той же час країни Європейського Союзу демонструють ефективні рішення, які ґрунтуються на технологічній модернізації, нормативному контролі та соціальній відповідальності [2].

Метою цієї роботи є аналіз сучасних європейських практик менеджменту існуючих полігонів/звалищ твердих побутових відходів (ТПВ) та можливостей адаптації найкращих з них в Україні.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження авторів напряму пов'язане з актуальними завданнями як наукової екології, так і практики управління відходами в умовах трансформації українського екологічного законодавства та його адаптації до стандартів Європейського Союзу. Напрямок даної роботи узгоджений із «Національним планом управління відходами до 2033 року» (затвердженим Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27.12.2024 р. № 1353-р), а саме, робота спрямована на розвиток й реалізацію «заходів з очищення історичних місць розміщення відходів» на території регіонів України.

Відповідно у даній роботі вперше була здійснена систематизація європейських підходів до «landfill mining» та аналіз можливостей їх адаптації в українських реаліях. Авторами надані рекомендації щодо розвитку системи менеджменту звалищ побутових відходів в Україні, які можуть стати складовою частиною регіональних стратегій та програм міжмуніципального партнерства. Таким чином, авторський доробок відповідає сучасним пріоритетам державної екологічної політики, а також орієнтований на виконання зобов'язання України щодо реалізації реформ в сфері управління відходами та ресурсами.

Викладення основного матеріалу.

Європейський Союз розробив багаторівневу систему нормативного регулювання у сфері поводження з відходами, що базується як на обов'язкових для виконання директивах, так і на стратегічних ініціативах. Одним із головних документів є Директива 1999/31/ЄС про захоронення відходів [3], яка визначає вимоги до проектування, експлуатації та закриття полігонів. Її основне положення — поетапне зниження частки біорозкладних відходів, що потрапляють на звалища, з метою зменшення викидів метану та фільтрату. Крім цього, Директива 2008/98/ЄС «Про відходи» [4] формалізує ієрархію поводження з ними: від запобігання утворенню — до переробки та утилізації, і лише в крайньому випадку — захоронення. У 2020 році ЄС прийняв нову редакцію Плану дій з циркулярної економіки (Circular Economy Action Plan) [5], який передбачає посилення ролі переробки, повторного використання матеріалів та обмеження створення нових полігонів/звалищ. Варто також відзначити роль Європейського зеленого курсу (Green Deal), що охоплює всі аспекти екологічної політики ЄС, у тому числі сферу відходів. У цьому контексті полігони/звалища не лише не розглядаються як прийнятна довгострокова стратегія, але й стають об'єктами ревізії та модернізації. Наприклад, програми технічної підтримки від ЄС передбачають фінансування на модернізацію старих звалищ, якщо країна виконує вимоги щодо підготовки стратегічної документації та забезпечує моніторинг викидів парникових газів. У країнах-членах ЄС створені національні плани управління відходами, які є обов'язковими для виконання і переглядаються кожні 5–6 років. Наприклад, у Німеччині план 2020–2030 рр. містить розділ щодо поступового закриття непридатних полігонів, розробку технологій дегазації та обов'язкову цифрову паспортизацію полігонів. У Франції всі діючі звалища проходять періодичну сертифікацію екологічної безпеки відповідно до європейських індикаторів. Таким чином, нормативно-правове регулювання поводження з ТПВ у Європейському Союзі носить інтегрований характер, який охоплює технічні стандарти, екологічні вимоги та інституційні механізми. Цей досвід є надзвичайно цінним для України, де ще лише формується культура сталого управління відходами [6].

Існуючі на сьогодні в країнах Європейського Союзу підходи до управління полігонами відходів умовно можна поділити на три групи:

- рекультивация та технічна стабілізація;
- практика «landfill mining» та повторне використання матеріалів;
- функціональна (енергетична) модернізація полігонів.

Усі три напрямки реалізуються як в межах державних програм, так і за підтримки приватного сектору, з активним залученням муніципалітетів.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика систем рекультивації в країнах ЄС

Країна	Тип рекультивації	Система дегазації	Контроль фільтрату	Інтеграція ВДЕ
Австрія	Технічна + біологічна	Активна	Мембранна	Сонячні панелі
Литва	Суха рекультивація	Пасивна	Гравітаційна	Відсутня
Франція	Комбінована	Активна	Комбінована	Біогаз
Німеччина	Мембрана + газова	Гібридна	Біореактор	Сонце + вітер
Нідерланди	Багатошарова	Пасивна	Геотехнічна	Біогаз
Італія	Ґрунтова з біофільтрацією	Активна	Механічна фільтрація	Відсутня
Іспанія	Комбінована з озелененням	Пасивна	Водозбірні резервуари	Сонячні панелі
Швеція	Торф'яна + геосинтетика	Активна	Геотекстильна	Біогаз

1. Рекультивація та технічна стабілізація полігонів

Рекультивація — це етап припинення експлуатації (закриття) полігону/звалища, який включає формування ізоляційного шару, установку систем дегазації, дренажу, та відновлення рослинного покриву. Наприклад, у Австрії на полігоні Rautenweg (Відень) було здійснено повну герметизацію верхньої поверхні за допомогою геомембран, змонтовано активну систему збору метану і встановлено сонячні панелі [7]. У Франції застосовують двошарову систему: технічна рекультивація поєднується з озелененням і створенням зон рекреації. У Литві впроваджено систему «сухої рекультивації», коли полігони стабілізуються без подачі додаткової вологи, що знижує утворення фільтрату [8]. Порівняльна характеристика відомих систем рекультивації в країнах ЄС наведена у таблиці 1.

2. Вилучення ресурсів (landfill mining) та повторне використання матеріалів

Усе ширше в країнах ЄС набуває популярності концепція «landfill mining» — вибіркової розробки старих полігонів з метою вилучення фракцій, придатних для перероблення або енергетичної утилізації. У Бельгії (проект RAWFILL) та Нідерландах реалізуються ініціативи з оцінки економічної доцільності таких операцій за допомогою георадарів, пробовідбору та тривимірного моделювання внутрішньої структури звалищ [9]. Це дозволяє не тільки зменшити обсяг накопичених відходів, але й забезпечити рециклінг ресурсів та повернення землі у господарський обіг.

3. Системи дегазації та енергетичне використання метану

На полігонах Чехії, Польщі, Нідерландів активно функціонують системи дегазації, які дозволяють зменшити викиди метану — одного з найпотужніших парникових газів. Наприклад, у Чехії у 2023 році було зібрано понад 285 млн м³ метану, що еквівалентно зниженню викидів CO₂ приблизно на 5 млн тон [10]. У Польщі біогазові станції використовують зібраний метан для виробництва теплової та електричної енергії. У Нідерландах розроблено інноваційні біофільтри, які додатково очищують газові потоки

перед подачею в генератори. Обсяги уловленого метану (млн м³), що утворюється на полігонах захоплення побутових відходів у країнах ЄС у період 2020-2023 рр. показано на рисунку 1.

Таким чином, сучасні підходи в ЄС демонструють поступ від «пасивного» зберігання відходів до активного управління полігонами як інфраструктурними об'єктами з енергетичним і ресурсним потенціалом [11].

Іншим напрямом, що активно розвивається у країнах Європейського Союзу є сучасне управління полігонами, що все більше орієнтоване на впровадження цифрових технологій, які забезпечують ефективний, оперативний та прозорий контроль за станом полігонів/звалищ.

Цифрові технології та сучасні методи моніторингу полігонів/звалищ відходів дозволяють мінімізувати ризики аварій, скоротити вплив на довкілля та підвищити економічну ефективність експлуатації полігонів. У Німеччині та Швеції використовуються сенсорні системи, інтегровані в інфраструктуру полігонів. Вони включають датчики температури, вологості, рівня фільтрату, концентрації метану та вуглекислого газу. Дані передаються за допомогою LoRaWAN або NB-IoT-протоколів, що дозволяє здійснювати постійний дистанційний контроль [12-13].

У Швеції інформація інтегрується в єдину платформу екологічного моніторингу, яка дозволяє автоматично формувати звіти для регуляторів. У Фінляндії й Італії активно впроваджуються геоінформаційні системи (ГІС), що дозволяють створювати цифрові карти полігонів/звалищ, фіксувати дані щодо рівня дегазації, динаміки утворення фільтрату та температурних коливань. Це дає змогу виявляти потенційно небезпечні ділянки та оперативно вживати заходів. У деяких регіонах застосовуються супутникові дані для контролю деформацій поверхні закритих звалищ. У Нідерландах і Німеччині запроваджуються цифрові паспорти полігонів/звалищ, які містять історію експлуатації, технічні характеристики, дані моніторингу та плани з рекультивації. Такі інструменти підвищують прозорість діяльності операторів полігонів та сприяють ефективному пла-

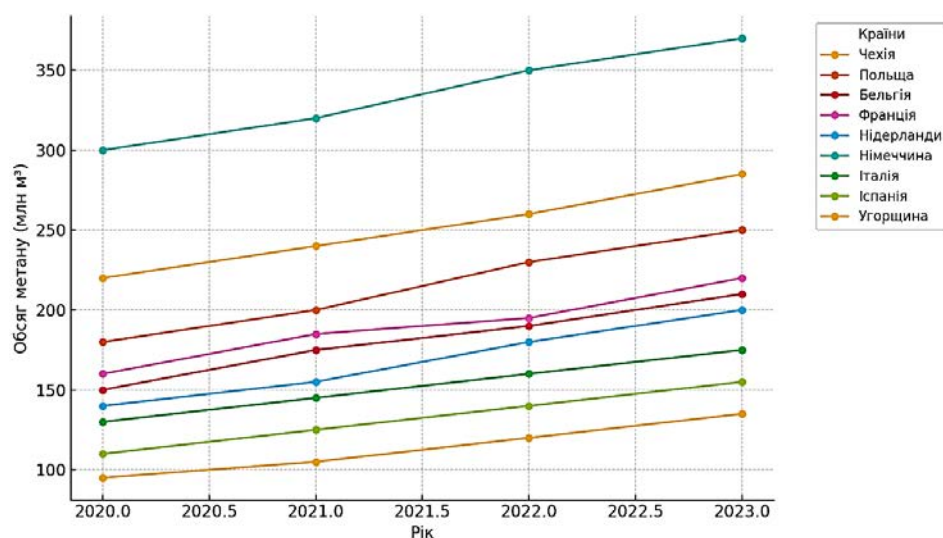


Рис. 1. Обсяг зібраного метану з полігонів (млн м³) у 2020–2023 рр.

Таблиця 2

Приклади цифрового моніторингу полігонів у країнах ЄС

Країна	Сенсори температури	Контроль газу	Моніторинг фільтрату	Передача даних	Інтеграція в GIS
Німеччина	Так	CH ₄ , CO ₂	Онлайн	LoRaWAN	Так
Швеція	Так	CH ₄	Періодичний	NB-IoT	Так
Італія	Так	CH ₄ , H ₂ S	Онлайн	LTE	Ні
Франція	Так	CH ₄ , CO ₂	Постійний	Wi-Fi	Так
Іспанія	Так	CH ₄	Періодичний	NB-IoT	Так
Нідерланди	Так	CH ₄ , CO ₂	Онлайн	5G	Так
Фінляндія	Так	CH ₄ , CO ₂	Онлайн	LoRaWAN	Так
Австрія	Так	CH ₄ , CO ₂	Періодичний	LTE	Так

нуванню подальших дій. Приклади базових параметрів цифрового моніторингу полігонів відходів у країнах ЄС наведено у таблиці 2.

Таким чином, цифровізація управління полігонами в Європі є не лише трендом, а й реальним інструментом підвищення екологічної безпеки та ефективності у сфері управління відходами. Для України це відкриває широкі перспективи у разі належного фінансування, підготовки кадрів та розвитку нормативної бази.

Управління існуючими полігонами/звалищами в Європейському Союзі не обмежується технічними чи екологічними аспектами. Важливою складовою є економічна рентабельність та соціальна інтеграція процесів рекультивації звалищ. Ключовими джерелами фінансування рекультивації та модернізації звалищ у ЄС є механізми державно-приватного партнерства (PPP), кошти європейських фондів, а також система «забруднювач платить» (polluter pays principle). Наприклад, у Фінляндії більшість коштів надходить з муніципальних бюджетів, які акумулюють прибуток від роздільного збору й вторинної переробки [14]. У Німеччині приватні оператори звалищ зобов'язані формувати резерви на рекульти-

вацію ще на етапі отримання ліцензії. Також активно застосовується система еко-податків. У Франції власники полігонів щорічно сплачують екологічний збір залежно від обсягів і складу відходів, а частина надходжень спрямовується на екологічні ініціативи у місцевих громадах. У Швеції діє система «зеленої премії»: підприємства, які забезпечують високий рівень енергоефективності та зниження викидів, отримують субсидії. Важливим аспектом є залучення місцевих громад до процесів управління. У Данії та Бельгії на базі рекультивованих полігонів створюються рекреаційні зони, парки, навчальні екологічні центри. У Польщі муніципалітети організовують публічні консультації щодо планів перетворення звалищ, що підвищує рівень довіри до екологічних ініціатив [15-17].

Крім того, на багатьох полігонах/звалищах у країнах ЄС реалізуються програми соціальної відповідальності бізнесу (CSR), що передбачають підтримку локальних ініціатив: освітніх кампаній, шкільних програм зі сталого розвитку, конкурсів на екопроекти серед молоді тощо. Інвестиції у модернізацію полігонів/звалищ окуповуються за рахунок генерації електроенергії, повторного використання

фракцій і зменшення витрат на ліквідацію наслідків забруднення [18]. Наприклад, у Чехії звалища, обладнані біогазовими генераторами, виробляють щороку до 15 МВт електроенергії, яку реалізують у локальні мережі. Це дозволяє не лише зменшити викиди парникових газів, а й створити нові робочі місця у сфері зеленої енергетики.

Враховуючи наявний досвід країн ЄС з управління полігонами/звалищами відходів та вкрай критичний стан звалищ твердих побутових відходів в Україні (понад 6000 звалищ, з яких лише близько 10% відповідають елементарним екологічним вимогам), адаптація європейського досвіду є не лише бажаною, а й необхідною умовою для переходу до стійкої моделі управління відходами.

Україна має певні передумови для адаптації європейських практик. До сильних сторін належать:

- наявність пілотних проєктів з рекультивації (наприклад, у Львові, Житомирі);
- підтримка з боку міжнародних організацій (ЄБРР, GIZ, ПРООН);
- зростаюча суспільна увага до екологічної тематики.

Водночас існують і суттєві бар'єри:

- незадовільні темпи оновлення законодавчо-нормативної бази, яка лише частково відповідає сучасним європейським стандартам;
- брак технічних кадрів, здатних реалізовувати складні проєкти;
- відсутність зовнішніх інвестицій під час воєнного стану в країні;
- обмежене фінансування на рівні громад;
- ризики корупції при розподілі екологічних субвенцій;
- недовіра громадськості до інфраструктурних реформ.

Враховуючи проаналізований європейський досвід, на нашу думку, базовими кроками для розвитку системи менеджменту звалищ побутових відходів в Україні є наступні:

1. Оновлення законодавства у відповідності до вимог Директив ЄС (1999/31/ЄС, 2008/98/ЄС) та на

його основі створення принципів формування системи менеджменту полігонами відходів.

2. Запровадження цифрового моніторингу полігонів із використанням IoT-сенсорів.

3. Залучення громад до контролю та ухвалення рішень, зокрема через обов'язкові громадські слухання.

4. Інтеграція «landfill mining» у регіональні та місцеві плани управління відходами.

5. Підвищення кваліфікації персоналу операторів полігонів та муніципальних управлінь через профільні курси/тренінги.

Таким чином, за належної стратегії та координації, Україна здатна імплементувати найкращі практики управління існуючими полігонами побутових відходів, перетворивши їх з джерел ризику на елементи циркулярної економіки.

Наукова новизна статті полягає в систематизації сучасних практик ЄС щодо управління полігонами/звалищами відходів, проведення їх порівняння із застосуванням методу SWOT-аналізу, виділення базових кроків для розвитку системи управління звалищами відходів в Україні.

Головні висновки. Аналіз європейського досвіду поводження з побутовими відходами та менеджменту існуючих звалищ показує, що сучасна політика ЄС спрямована не лише на мінімізацію кількості відходів, а й на ефективне управління вже існуючими полігонами/звалищами.

Країни Європейського Союзу демонструють комплексний підхід: від технічної модернізації до цифрової трансформації, від енергетичного використання до соціальної адаптації звалищ відходів як частини міської екосистеми.

Україна, незважаючи на низку викликів, має реальні передумови для імплементції європейських підходів щодо менеджменту звалищ побутових відходів. Поєднання політичної волі, фінансової підтримки міжнародних інституцій та готовності громад до змін може забезпечити ефективну трансформацію системи управління побутовими відходами. Адаптація найкращих практик ЄС дозволить

Таблиця 3

Деталізований SWOT-аналіз впровадження європейських практик управління полігонами ТПВ в Україні

Сильні сторони	Можливості
Наявність пілотних проєктів у великих містах (Львів, Київ, Харків). Міжнародна підтримка (ЄБРР, GIZ, ПРООН). Розвинене законодавство щодо оцінки впливу на довкілля. Активне громадянське суспільство в екологічній сфері.	Залучення коштів ЄС через програми Horizon та Green Deal. Інтеграція landfill mining у плани місцевого розвитку. Освітні ініціативи для формування фахівців нового покоління. Партнерство з приватними операторами полігонів.
Слабкі сторони	Загрози
Фрагментарна інфраструктура полігонів. Брак кваліфікованих кадрів для експлуатації цифрових систем. Недостатня прозорість у розподілі бюджетів. Відсутність єдиної національної стратегії управління та цифровізації полігонів.	Політична нестабільність і військові ризики. Низький рівень довіри до муніципальної влади. Застаріла технічна база багатьох полігонів або їх повна відсутність. Імовірність недофінансування ключових реформ.

не лише підвищити рівень екологічної безпеки полігонів/звалищ побутових відходів, а й залучити нові інвестиції, створити робочі місця, використати потенційний ресурс побутових відходів та дозволить припинити розглядати звалища як соціально-екологічну проблему.

Перспективи використання результатів дослідження.

Автори даної роботи прагнуть зробити внесок в реалізацію проаналізованих європейських підходів в Україні. Здійснена систематизація відомих практик та запропоновані в роботі базові кроки для розвитку системи менеджменту звалищ побутових відходів

можуть стати складовими елементами місцевих планів управління відходами та набути практичної реалізації на рівні місцевих органів влади, муніципалітетів та екологічних департаментів при прийнятті рішень щодо реформування полігонів/звалищ ТПВ. Представлений у статті матеріал має прикладне значення для підготовки регіональних стратегій, для участі в європейських грантових програмах (Horizon Europe, Green Deal), для створення програм міжмуниципального співробітництва та державно-приватного партнерства в сфері відходів, що буде сприяти успішній інтеграції України в європейську систему екологічного управління.

Література

1. ISPRA. Report on Municipal Waste 2022. Rome: Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. 2023. ISBN: 978-88-448-1152-5. URL: <https://www.isprambiente.gov.it/en/publications/reports/municipal-waste-report-edition-2022> (дата звернення: 23.05.2025).
2. Iliash O., Holik Y., Allesch A., Chepurko Y., Serha T. Analysis of studies on the morphological composition of domestic waste in Ukraine. *Environmental Problems*. 2023. Vol. 8(4). P. 241–246. DOI: 10.23939/ep2023.04.241.
3. Directive 1999/31/EC on the landfill of waste. Official Journal of the European Communities. 1999.
4. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste. Official Journal of the European Communities. 2008.
5. European Commission. A new Circular Economy Action Plan. Brussels. 2020.
6. European Environment Agency. State of waste management in Europe. 2021.
7. Stadt Wien. Deponie Rautenweg – Umweltschutzbericht. 2022.
8. Lithuanian Ministry of Environment. National landfill strategy. 2023. URL: <https://am.lrv.lt/en/> (дата звернення: 22.05.2025).
9. RAWFILL project report. Interreg Europe. 2021. URL: <https://www.interregeurope.eu/rawfill> (дата звернення: 22.05.2025).
10. Jones P., et al. Landfill mining: Innovations and perspectives. *Waste Management*. 2021. Vol. 119. P. 129–137. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.09.012.
11. ISWA. Landfill Management Best Practices. 2023. URL: <https://www.iswa.org/landfill-management> (дата звернення: 22.05.2025).
12. Afvalzorg Group. Methane capture results and innovations report. 2021. URL: <https://www.afvalzorg.nl/en/> (дата звернення: 22.05.2025).
13. Müller H., et al. Smart Landfill Monitoring Systems in Germany. *Journal of Environmental Monitoring*. 2022. Vol. 18(3). P. 45–56. DOI: 10.1039/C2EM30523G.
14. Finnish Environment Institute. Municipal solid waste strategy and landfill adaptation. 2020. URL: <https://www.syke.fi/en-US> (дата звернення: 22.05.2025).
15. Polish Environmental Agency. Annual methane capture report. 2022. URL: <https://www.gov.pl/web/environment> (дата звернення: 22.05.2025).
16. Italian Green Cities Network. Landfill to Landscape conversion strategies. 2022. URL: <https://greencitiesnetwork.it> (дата звернення: 22.05.2025).
17. UNEP. Global Waste Management Outlook Update. 2022. URL: <https://www.unep.org/resources/report/global-waste-management-outlook-2022-update> (дата звернення: 22.05.2025).
18. Ellen MacArthur Foundation. Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change. 2021. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/completing-the-picture> (дата звернення: 22.05.2025).

НЕБЕЗПЕЧНІ КОМПОНЕНТИ ВІДХОДІВ РУЙНАЦІЙ ЯК ВИКЛИК ЕКОЛОГІЧНІЙ БЕЗПЕЦІ

Нонік Л.Ю., Пацева І.Г.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

rig@ztu.edu.ua, kgt_nlyu@ztu.edu.ua

У статті розглянуто небезпечні компоненти відходів руйнацій, які утворюються внаслідок воєнних дій, зокрема під час збройного конфлікту на території України. Встановлено, що ці відходи мають складний багатокомпонентний хімічний склад і містять велику кількість токсичних та шкідливих речовин. Зокрема, у процесі знищення житлових будівель, об'єктів інфраструктури, промислових і сільськогосподарських об'єктів у довкілля вивільняються продукти горіння, уламки озброєння, елементи електроніки та залишки будівельних матеріалів. Часто такі матеріали містять важкі метали, канцерогени, нафтопродукти, пластмаси, азбест і вибухонебезпечні залишки.

Особливу увагу приділено аналізу екологічних і соціальних ризиків, пов'язаних із наявністю у відходах свинцю, кадмію, ртуті, азбестових волокон, полімерних компонентів і бойових залишків. Оцінено їхні фізико-хімічні властивості, стійкість у довкіллі, токсичність, здатність до біоаккумуляції та механізми впливу на живі організми. Встановлено, що більшість таких речовин чинить мутагенну, канцерогенну та хронічну токсичну дію, а також забруднює повітря, ґрунти й водні ресурси.

Наголошено на тому, що в Україні на сьогодні відсутній системний підхід до ідентифікації, класифікації та управління відходами руйнацій з урахуванням їхніх небезпечних властивостей. Законодавча і нормативна база в цій сфері потребує суттєвого вдосконалення. Підкреслено необхідність розробки державної політики, яка б включала механізми залучення спеціалізованих підрядників, формування процедур безпечного збору, тимчасового зберігання та утилізації таких відходів. Окремо зазначено важливість проведення просвітницької роботи з населенням, яке перебуває на територіях, що зазнали воєнних пошкоджень.

Також обґрунтовано доцільність впровадження сучасних технологій переробки та знешкодження відходів із вмістом небезпечних речовин, створення інституційних механізмів екологічного моніторингу та реагування на довготривалі наслідки війни. Запропоновано комплексний підхід до управління відходами руйнацій, який поєднує екологічні, технічні та соціальні інструменти для зменшення шкоди довкіллю та здоров'ю населення. *Ключові слова:* відходи руйнацій, небезпечні компоненти, азбест, важкі метали, мікропластик, вибухонебезпечні предмети, екологічна безпека, токсичність, війна, постконфліктне відновлення.

Hazardous components of destruction waste as a challenge to environmental safety. Nonik L., Patseva I.

The article examines the hazardous components of demolition waste generated as a result of military operations, in particular during the armed conflict in Ukraine. It was found that these wastes have a complex multi-component chemical composition and contain a large number of toxic and harmful substances. In particular, during the destruction of residential buildings, infrastructure, industrial and agricultural facilities, combustion products, weapons fragments, electronic components and construction material residues are released into the environment. Such materials often contain heavy metals, carcinogens, petroleum products, plastics, asbestos and explosive residues. Particular attention is paid to the analysis of environmental and social risks associated with the presence of lead, cadmium, mercury, asbestos fibers, polymer components and combat residues in waste. Their physicochemical properties, environmental stability, toxicity, bioaccumulation ability and mechanisms of impact on living organisms are assessed. It was established that most of these substances have mutagenic, carcinogenic and chronic toxic effects, and also pollute air, soil and water resources.

It was emphasized that in Ukraine today there is no systematic approach to the identification, classification and management of demolition waste, taking into account their hazardous properties. The legislative and regulatory framework in this area requires significant improvement. The need to develop a state policy that would include mechanisms for attracting specialized contractors, the formation of procedures for the safe collection, temporary storage and disposal of such waste was emphasized. The importance of conducting educational work with the population located in territories that have suffered war damage was separately noted.

The feasibility of introducing modern technologies for processing and neutralizing waste containing hazardous substances, the creation of institutional mechanisms for environmental monitoring and responding to the long-term consequences of the war was also substantiated. A comprehensive approach to demolition waste management is proposed, which combines environmental, technical, and social tools to reduce harm to the environment and public health. *Key words:* demolition waste, hazardous components, asbestos, heavy metals, microplastics, explosive remnants of war, environmental security, toxicity, armed conflict, post-conflict recovery.

Постановка проблеми. Збройні конфлікти, особливо тривалі й масштабні, супроводжуються масовими руйнуваннями інфраструктури, внаслідок чого утворюється велика кількість відходів руйнацій. Серед них – небезпечні компоненти: азбест, важкі метали, нафтопродукти, вибухові речовини, які створюють тривалі ризики для довкілля та здоров'я людей. В Україні ця проблема набула критич-

ного характеру внаслідок повномасштабної війни з 2022 року.

Актуальність дослідження. Військові дії в Україні тривають безпосередньо на її території, що робить ситуацію винятковою: ураження зазнають як міста і села, так і промислові та природоохоронні зони. Унаслідок масштабних руйнувань житлової, транспортної, військової та промислової інфра-

структури утворюються мільйони тонн відходів, значна частина яких є небезпечними для навколишнього середовища та здоров'я населення. Ці відходи включають азбест, важкі метали, пластики, вибухові речовини, залишки паливно-мастильних матеріалів, хімічні реагенти, електроніку тощо. Вони не лише ускладнюють процес відновлення територій, а й спричиняють нові хвилі забруднення, які можуть мати відкладений, але довготривалий вплив.

Світова практика свідчить про те, що збройні конфлікти часто залишають після себе «екологічні міні сповільненої дії» – приховані забруднення ґрунтів, води і повітря, які роками негативно впливають на здоров'я населення та функціонування екосистем. Тому питання ідентифікації, класифікації та безпечного поводження з такими відходами набуває критичного значення не лише для відбудови країни, а й для гарантування екологічної та національної безпеки.

Актуальність цієї проблеми зумовлюється також і тим, що національні системи управління відходами, зокрема небезпечними, не були підготовлені до таких викликів. В Україні відсутній системний підхід до обліку, класифікації, сортування та утилізації руйнівних відходів у воєнний і післявоєнний періоди. Це створює ризики не лише для довкілля, але й для життя людей, які повертаються до постраждалих територій без достатнього знання про потенційні небезпеки.

Дослідження цієї теми є необхідним для розробки ефективних стратегій з управління відходами руйнацій, зниження екологічних ризиків, інтеграції міжнародних практик, формування нових екологічних стандартів у сфері відновлення інфраструктури. Саме тому вивчення небезпечних компонентів таких відходів, їхнього впливу на довкілля та здоров'я населення, а також аналіз можливих підходів до їх поводження, є науково і практично обґрунтованим і вкрай актуальним у сучасних умовах.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Автори зосереджуються на вивченні небезпечних компонентів відходів, що утворюються під час війни, їхнього впливу на довкілля та здоров'я, а також на пошуку ефективних методів ідентифікації, знешкодження і управління. Дослідження має безпосередній зв'язок із державними програмами з екологічної безпеки, післявоєнного відновлення, гуманітарного розмінування та стратегіями сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика поводження з відходами, що виникають унаслідок руйнації будівель та інфраструктури, особливо в умовах збройних конфліктів, привертає дедалі більше уваги в наукових колах. У наукових працях ця тема розглядається з різних аспектів: токсикологічного, екологічного, соціального, техногенного та медико-біологічного. Дослідження відзначають, що відходи такого типу мають надзвичайно складний хімічний склад і часто містять ком-

поненти, які становлять безпосередню небезпеку для навколишнього середовища і здоров'я людини. У науковій літературі питання впливу компонентів відходів руйнації на довкілля висвітлено у низці праць [1–5, 7, 8, 19, 20, 22]. Окрема увага приділена токсичності азбесту [9–11, 21], важких металів [13, 14], полімерів [15, 16], нафтопродуктів [17, 18], вибухових речовин [6, 12]. Дослідження вказують на необхідність розробки ефективних механізмів управління, знешкодження та переробки цих відходів для запобігання довготривалому впливу на екосистеми та здоров'я населення.

Загалом аналіз наукових досліджень та публікацій свідчить про наявність значного обсягу напрацювань щодо окремих видів небезпечних речовин, однак недостатньо комплексних підходів до оцінки сукупного екологічного та соціального ефекту від відходів руйнацій. Також мало досліджень стосується українських реалій воєнного періоду, що потребує подальшого розвитку національної школи з екологічної безпеки в умовах воєнних дій і післявоєнного відновлення.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо дослідженими залишаються питання ідентифікації небезпечних компонентів на пошкоджених військовими діями територіях України, шляхів їхньої міграції у середовищі, впливу на біоценози та соціального ризику. Також, в Україні відсутні ефективні технології локалізації та утилізації відходів зі змішаним складом у воєнний та післявоєнний періоди.

Новизна. Представлено системний аналіз конкретних небезпечних компонентів відходів руйнацій, окреслено алгоритм їх виявлення, охарактеризовано вплив на довкілля і здоров'я та запропоновано інтегровану модель управління з урахуванням міжнародного досвіду та сучасних технологій.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження формує підґрунтя для створення державних стратегій з екологічної безпеки, зокрема для поводження з відходами у зонах військових дій. Воно має міждисциплінарний характер, поєднує екологічні, інженерні, токсикологічні, соціальні аспекти, та є цінним для екологів, урбаністів та фахівців з безпеки.

Викладення основного матеріалу. Сучасні збройні конфлікти, особливо ті, що мають тривалий характер і охоплюють густозаселені території, супроводжуються масштабними руйнуваннями інфраструктури, промислових і житлових об'єктів. Наслідком цього є утворення великого обсягу відходів руйнації, що включають як інертні, так і високонебезпечні компоненти. До них належать залишки азбестовмісних матеріалів, важких металів, пластмас, нафтопродуктів, вибухонебезпечних предметів та інших хімічних речовин техногенного походження. Вони можуть не лише погіршувати санітарно-епідеміологічний стан територій, але

й призводити до глибокої деградації екосистем, створюючи довготривалі ризики для здоров'я людей.

Особливо актуальною ця проблема є для України, яка після повномасштабного вторгнення у 2022 році, стикається з безпрецедентними обсягами пошкодження житлового фонду, промислових підприємств, інженерних мереж, інфраструктурних об'єктів. У результаті знищується або суттєво пошкоджується матеріальна складова держави, а відходи від цих руйнувань, у багатьох випадках, накопичуються без належного сортування, обліку та контролю.

Відсутність належної системи управління такими відходами загрожує забрудненню ґрунтів, водних ресурсів, атмосфери, порушенням біоценозів і зниженням безпеки проживання на постраждалих територіях. Більше того, значна частина цих відходів є небезпечною не лише з екологічної, а й з техногенної точки зору – наприклад, нерозірвані боєприпаси, токсичні хімічні речовини, мінерали з канцерогенними властивостями.

Розуміння масштабів і характеру цієї проблеми є важливою передумовою для розробки національних стратегій з очищення, рекультивації та екологічної реабілітації територій. Це вимагає як глибокого наукового аналізу небезпечних компонентів відходів, так і впровадження кращих міжнародних практик щодо збирання, ідентифікації, утилізації та мінімізації ризиків. У цьому контексті дане дослідження розглядає ключові екологічні й соціальні виклики, пов'язані з відходами руйнацій, та пропонує підходи до їх безпечного управління.

Метою цього дослідження є комплексне вивчення складу та екологічної небезпеки відходів, що утворюються внаслідок руйнації інфраструктурних об'єктів під час воєнних дій, а також аналіз їх впливу на довкілля та здоров'я населення. Дослідження покликане ідентифікувати найбільш загрозливі компоненти відходів (азбест, важкі метали, полімери, нафтопродукти, боєприпаси), охарактеризувати їхні фізико-хімічні властивості, механізми впливу, маршрути міграції у навколишньому середовищі, а також соціальні та інфраструктурні ризики, пов'язані з їх накопиченням. Крім того, ставиться завдання проаналізувати сучасні підходи до управління такими відходами, розглянути нормативно-правові ініціативи, наявні технології знешкодження та можливості міжнародної співпраці. Це дозволить сформувати основу для розробки стратегічних рішень у сфері екологічної безпеки в умовах воєнного та післявоєнного періоду.

Руйнування інфраструктури під час воєнних дій призводить до утворення великої кількості відходів, серед яких особливу небезпеку становлять матеріали з високою токсичністю, стійкістю до розкладу та вибухонебезпечністю.

Азбест – мінерал, широко використовуваний у будівництві, демонструє вкрай небезпечні властивості при руйнуванні будівель. Потрапляючи

в атмосферу у вигляді мікроскопічних волокон, він викликає легеневі хвороби, включаючи онкопатології. У країнах ЄС та низці інших держав його використання заборонене, проте в Україні ще донедавна азбест залишався поширеним. Особливо ризикованим є несанкціоноване спалювання чи поховання азбестовмісних матеріалів, що призводить до забруднення атмосфери, ґрунтів та підземних вод. Ефективне управління азбестовими відходами є критично важливим для зменшення ризиків. Перш за все, потрібно визначити матеріали, що містять азбест, перед знесенням чи ремонтом будівель. Також, необхідно провести безпечний демонтаж, який має передбачати проведення робіт спеціалізованими командами з дотриманням санітарних норм. Утилізувати відходи руйнацій, що містять азбест, потрібно на спеціалізованих полігонах у герметичних контейнерах. Невід'ємною частиною серед заходів ефективного управління азбестовими відходами є освіта населення, а саме інформування про ризики контакту з азбестовими матеріалами.

Важкі метали (свинець, кадмій, ртуть) часто присутні у будівельних елементах, фарбах, електроніці та старому технічному обладнанні. Їхні властивості – токсичність, кумулятивний ефект та здатність до біоаккумуляції – роблять їх особливо небезпечними. Метали проникають у ґрунт, вимиваються до водойм, викидаються у повітря з пилом, що призводить до отруєння тварин, забруднення сільськогосподарських угідь і прямої загрози здоров'ю людей. Важкі метали у відходах руйнацій становлять серйозну екологічну проблему, яка потребує системного підходу до вирішення, включаючи суворий контроль за управлінням відходами, інформування громадськості та запровадження сучасних технологій переробки.

Полімери – ще один важливий компонент відходів. Пластикові труби, ізоляційні матеріали, оздоблювальні панелі та елементи електроніки – усе це після руйнування потрапляє у довкілля. Завдяки високій стійкості до розкладу, пластик забруднює території на десятки, а то й сотні років. У процесі деградації утворюються мікропластики, які проникають у воду, харчові продукти, повітря. При спалюванні полімерів виділяються токсичні речовини – діоксини, фурани, що мають мутагенну та канцерогенну дію. Ефективне вирішення проблеми накопичення пластикових компонентів у відходах потребує комплексного підходу, що включає сортування, переробку, безпечну утилізацію та скорочення використання первинного пластику. Впровадження сучасних технологій і екологічно відповідальних практик дозволить мінімізувати негативний вплив пластикових відходів на екосистему й сприятиме досягненню цілей сталого розвитку.

Джерелами нафтопродуктів, що забруднюють довкілля під час руйнування, є будівельні матеріали, мастила, паливо, електрообладнання, а також

об'єкти, зокрема автозаправні станції, промислові споруди, транспортна та житлова інфраструктура. Потрапляючи у ґрунт і воду, вони утворюють токсичні плями, змінюють властивості ґрунтів, знижують родючість, блокують доступ кисню до водних організмів, спричиняючи масову загибель флори та фауни. Випаровування нафтопродуктів забруднює атмосферу леткими органічними сполуками, небезпечними для людини. Методи управління нафтопродуктами у відходах руйнацій повинні включати кілька ключових етапів, починаючи зі збирання та транспортування. Для збирання рідких нафтових залишків використовуються спеціалізовані резервуари, що забезпечують ефективне зберігання та транспортування нафтопродуктів. Крім того, для збору розлитих нафтопродуктів застосовуються адсорбенти, такі як цеоліти та активоване вугілля, які допомагають швидко поглинати нафтопродукти.

Боєприпаси та вибухонебезпечні речовини (ВНР) залишаються після обстрілів, вибухів, підривів складів. Снаряди, гранати, міни, касетні елементи, а також хімічні сполуки (ТНТ, гексоген, фосфор) – все це потрапляє у довкілля й зберігається там десятиліттями. Розклад вибухових речовин забруднює водні й ґрунтові ресурси. Уражені території стають непридатними для господарської діяльності. ВНР становлять не лише екологічну, а й соціальну небезпеку – обмеження на пересування, повернення переселенців, високий ризик травмування населення.

Сьогодні Україна є найбільш забрудненою мінами країною в Європі, а, ймовірно, і у світі. Тому питання ефективного управління вибухонебезпечними залишками потребує комплексного підходу, включаючи сучасні технології знешкодження, моніторинг забруднень та залучення міжнародних організацій у процеси розмінування. Методи управління відходами, які можуть містити боєприпаси та вибухонебезпечні речовини мають включати кілька основних напрямів: ідентифікацію та розмінування, утилізацію, очищення територій та проведення інформаційних кампаній. Ідентифікація та розмінування мають включати використання сучасних технологій для виявлення вибухонебезпечних предметів, таких як металодетектори та дрони, які дозволяють точно знаходити боєприпаси. Для знешкодження вибухонебезпечних предметів повинні залучатися професійні сапери, які займаються демілітаризацією нерозірваних боєприпасів, що дозволить знизити ризик для цивільного населення та забезпечити безпеку на забруднених територіях.

Комплексне управління відходами руйнацій має включати:

- попередню ідентифікацію небезпечних компонентів (шляхом аналізу конструкцій, використання сенсорних технологій, супутникового моніторингу);
- спеціалізований демонтаж і сортування з урахуванням норм безпеки (ізоляція азбесту, розпізнавання нафтопродуктів, вилучення електроніки);

- створення безпечних місць для утилізації або захоронення (контейнеризоване зберігання, герметизація, термічне або хімічне знешкодження);

- застосування технологій біоремедіації (мікроорганізми для розщеплення токсинів, адсорбенти);

- розмінування територій (із залученням саперів, дронів, металодетекторів, сучасних інструментів GIS);

- інформування та освіта населення, навчання фахівців, розробка інструкцій, інформаційних кампаній.

Крім того, важливою є міжнародна співпраця: Україна має залучати досвід ООН, НАТО, UNEP, а також урядів інших держав для створення системи управління небезпечними відходами у зоні воєнного впливу.

Висновки. Відходи руйнації, що виникають унаслідок збройних конфліктів, становлять складну й довготривалу загрозу для довкілля, здоров'я населення, економіки та екосистем. До їх складу входять небезпечні речовини – азбест, важкі метали (свинець, кадмій, ртуть), токсичні полімери, мікропластик, залишки нафтопродуктів, боєприпаси й вибухонебезпечні предмети. Вони характеризуються високою стійкістю до розкладу, біоаккумулятивністю, канцерогенними, мутагенними та токсичними властивостями, що значно ускладнює їхню утилізацію й відновлення постраждалих територій. Небезпека цих відходів проявляється як у безпосередньому впливі (через повітря, воду, ґрунт), так і в опосередкованому – через деградацію природних ресурсів, втрату біорізноманіття та забруднення екосистем. В умовах повномасштабної війни в Україні масштаби накопичення таких відходів є безпрецедентними й потребують термінових рішень.

Для подолання екологічних і соціальних наслідків необхідно створити національну систему обліку, класифікації та моніторингу небезпечних відходів, а також впровадити протоколи їх поводження з урахуванням токсичності та рівня ризику. Ключовими завданнями є розвиток інфраструктури для сортування, зберігання, переробки відходів, підготовка фахівців і підвищення екологічної обізнаності населення. Важливо залучати міжнародних партнерів до формування та реалізації екологічної політики в умовах війни та відновлення. Комплексний підхід до управління такими відходами – це шлях до запобігання екологічним катастрофам, збереження здоров'я населення та забезпечення сталого розвитку. Формування екологічно безпечної стратегії має стати одним із пріоритетів на шляху відновлення України.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати можуть бути використані для розробки державної програми екологічної безпеки в зонах військових дій; формування протоколів і стандартів з управління небезпечними відходами; навчання фахівців з екології, урбаністики, техногенної безпеки; підготовки інформаційних кампаній для населення; планування післявоєнної відбудови на принципах сталого розвитку.

Література

1. Baniyas G., Karkanias C., Batsioulas M., Melas L., Malamakis A., Geroliolios D., Skoutida S., Spiliotis X. Environmental assessment of alternative strategies for the management of construction and demolition waste: A life cycle approach. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, № 15. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159674>.
2. De Hemptinne J. The regulation of hazardous substances and activities during warfare. *Journal of International Criminal Justice*. 2023. Vol. 20, № 5. P. 1253–1285. DOI: <https://doi.org/10.1093/jicj/mqac057>.
3. Dehaghi R., Najafi J. Protection of the environment against damage during armed conflict. *Environmental Sciences*. 2016. Vol. 14, № 2. P. 139–153.
4. 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. DOI: <https://doi.org/10.47743/pesd2024182015>.
5. Kotsiuba I., Herasymchuk O., Shamrai V., Lukianova V., Anpilova Y., Rybak O., Lefter I. A Strategic Analysis of the Prerequisites for the Implementation of Waste Management at the Regional Level. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2023. Vol. 24(1). P. 55–66.
6. Letzel S., Göen T., Bader M., Angerer J., Kraus T. Exposure to nitroaromatic explosives and health effects during disposal of military waste. *Occupational and Environmental Medicine*. 2003. Vol. 60. P. 483–488. DOI: <https://doi.org/10.1136/oem.60.7.483>.
7. Patseva I., Nonik L., Gnatuk B., Patsev I., Ustymenko V. Increasing the level of ecologically oriented logistics system in the waste management for territorial communities. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1415. Article 012131. DOI: [10.1088/1755-1315/1415/1/012131](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012131).
8. Ragossnig A. Construction and demolition waste – major challenges ahead! *Waste Management & Research*. 2020. Vol. 38. P. 345–346. DOI: <https://doi.org/10.1177/0734242x20910309>.
9. Săkol G., Graca M. Air pollution during asbestos removal. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2019. Vol. 28, № 2. P. 1007–1011. DOI: <https://doi.org/10.15244/PJOES/81616>.
10. Silas O., Murphy R., Zoaka A., Imoh L. Menace of asbestos: health impact and politics. *Journal of Environmental and Public Health Research*. 2017. Vol. 5, № 2. P. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.12691/jephh-5-2-3>.
11. Stevulova N., Estokova A., Holub M., Singovszka E., Csach K. Characterization of demolition construction waste containing asbestos, and the release of fibrous dust particles. *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10. Article 4048. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10114048>.
12. Ustymenko V., Rohozian Y., Trehub O., Liashenko P., Zabłodska D. Economic and legal dimension of humanitarian demining of Ukraine: problem and research prospects. *Amazonia Investiga*. 2023. № 12(65). P. 287–295. DOI: <https://doi.org/10.34069/AI/2023.65.05.27>.
13. Youcai Z., Sheng H. Pollution characteristics of industrial construction and demolition waste. In: *Industrial Construction and Demolition Waste*. 2017. P. 51–101. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811754-5.00004-X>.
14. Yu D., Duan H., Song Q., Li X., Zhang H., Zhang H., Liu Y., Shen W., Wang J. Characterizing the environmental impact of metals in construction and demolition waste. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25. P. 13823–13832. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1632-z>.
15. Главацька Л. Ю. Аналіз системи поводження з відходами електричного та електронного обладнання в Україні. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. 2021. № 1. С. 102–108.
16. Главацька Л. Ю., Іщенко В. А. Аналіз складу компонентів електронних та електричних відходів. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 1. С. 42–48. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-154-1-42-48>.
17. Довгалюк О. В. Вплив витоків нафтопродуктів на стан ґрунтів. Еколого-енергетичні проблеми сучасності: матеріали Всеукраїнської науково-технічної онлайн-конференції молодих учених та студентів (11–12 квітня 2024 р.). 2024. С. 24–25.
18. Мірошніченко М. М. Вплив забруднення нафтою на властивості ґрунтів різного гранулометричного складу. Агрохімія і ґрунтознавство. 2000. Вип. 60. С. 91–96.
19. Нонік Л.Ю., Пацева І.Г., Пічкур Т.В. Розроблення стратегії управління відходами руйнацій в умовах воєнного стану. Екологічна безпека та технології захисту довкілля. 2023. № 4. С. 40–47. URL: <https://eztuir.ztu.edu.ua/handle/123456789/8292>
20. Пацева І., Нонік Л. Рециклінг відходів руйнації – крок до зменшення ризиків воєнного екоциду. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2023. № 3. С. 73–81. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-3-10>.
21. Пацева І., Нонік Л., Устименко В. Азбест у відходах руйнувань: виклики і перспективи безпечного управління відходами в умовах післявоєнної відбудови. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2024. № 4. С. 83–92. DOI: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-4-11>.
22. Пацева І.Г., Нонік Л.Ю. Стратегічний аналіз передумов впровадження логістичних підходів у систему управління відходами на регіональному рівні. Екологічні науки. 2024. № 2(53). С. 77–83.

УДК 504.062

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.32>

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ОКРЕМИХ ВИДІВ ВІДХОДІВ ПЛАСТИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ У РЕГІОНАХ УКРАЇНИ

Полушкін Т.І., Сафранов Т.А.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Всеволода Змієнка, 2, 65000, Одеса

polushkin.timur@gmail.com, safranov@ukr.net

Широка розповсюдженість серед пластикових матеріалів зумовлює їх високу частку в складі твердих побутових відходів. Метою статті є аналіз сучасного стану та перспективи управління та поводження з відходами пластикових матеріалів на території регіонів України, зокрема на території Одеської області. Методологія дослідження ґрунтується на критичному аналізі існуючої інформації щодо сучасного стану системи управління та поводження з відходами пластикових матеріалів у потоці твердих побутових відходів регіонів України. При виконанні роботи були використані опубліковані дані вітчизняних і зарубіжних авторів, а також матеріали власних досліджень, присвячених оцінці ресурсного потенціалу потоку твердих побутових відходів Одеської області. Наукова новизна полягає в тому, що вперше надана оцінка можливостей використання окремих видів відходів пластикових матеріалів в якості вторинної сировини, що утворюються у загальному потоці твердих побутових відходів в регіонах України, зокрема на території Одеської області, а також дана їх вартісна оцінка. Проаналізований сучасний стан системи управління та поводження з відходами пластикових матеріалів та проведена оцінка можливостей використання окремих видів цих відходів, що утворюються у загальному потоці твердих побутових відходів у регіонах України, зокрема на території Одеської області, а також дана оцінка ресурсної цінності відходів пластикових матеріалів на території цієї області. Зазначено, що система поводження з твердими побутовими відходами в регіонах України не відповідає принципам циркулярної економіки, а тому більша частина ресурсоцінних компонентів (у тому числі відходів пластикових матеріалів, серед яких домінують поліетилен і поліетилентерефталат), потрапляють на чисельні звалища і полігони, що негативно впливає на стан довкілля. Можливості ефективного використання відходів пластикових матеріалів обмежується низкою причин, у разі усунення яких можна удосконалити існуючу систему управління та поводження з цими ресурсоцінними складовими твердих побутових відходів, що дозволить зменшити рівень техногенного навантаження на довкілля і отримати економічну вигоду. Проаналізовані фактори, які знижують можливості використання відходів пластикових матеріалів, а також запропоновані шляхи удосконалення існуючої системи управління та поводження з відходами пластикових матеріалів на прикладі Одеської області. Удосконалення існуючої системи управління та поводження з відходами пластикових матеріалів сприятиме зменшенню техногенного навантаження на довкілля Одеської області, а дозволить істотно збільшити кількість та якість вторинної сировини, отриманої від відходів пластикових матеріалів. та якість вторинної сировини, отриманої від відходів пластикових матеріалів. У разі удосконалення існуючої системи збирання та переробки відходів пластикових матеріалів, що утворюються на території Одеської області, істотна їх частка може бути перероблена на існуючих підприємствах Одеської промислово-міської агломерації. *Ключові слова:* відходи пластикових матеріалів, управління та поводження, тверді побутові відходи, рециклінг.

Possibilities of Using Certain Types of Plastic Waste in the Regions of Ukraine. Polushkin T., Safranov T.

The widespread use of plastic materials accounts for their high proportion in the composition of municipal solid waste. The aim of this article is to analyze the current state and prospects for the management and handling of plastic waste in the regions of Ukraine, particularly in the Odesa region. The research methodology is based on a critical analysis of existing information regarding the current state of plastic waste management and handling systems within the municipal solid waste stream in Ukrainian regions. The study utilized published data from both domestic and foreign authors, as well as materials from the authors' own research focused on assessing the resource potential of the municipal solid waste stream in the Odesa region. The scientific novelty of the work lies in the fact that, for the first time, an assessment has been provided of the potential for utilizing certain types of plastic waste as secondary raw materials, which are generated within the overall municipal solid waste stream in the regions of Ukraine-particularly in the Odesa region. A value assessment of this waste has also been conducted. The current state of plastic waste management systems was analyzed, and an evaluation was carried out of the possibilities for utilizing specific types of such waste generated in the municipal solid waste stream in Ukrainian regions, especially within the Odesa region. Furthermore, the resource value of plastic waste in this area was assessed. It is noted that the municipal solid waste management system in Ukraine's regions does not align with the principles of a circular economy. As a result, most resource-valuable components (including plastic waste, predominantly polyethylene and polyethylene terephthalate) end up in numerous landfills and dumping sites, which negatively affects the environment. The potential for the efficient use of plastic waste is limited by several factors. Addressing these issues could improve the existing management and handling system for these resource-rich components of municipal solid waste, thereby reducing the environmental burden and generating economic benefits. Factors limiting the utilization of plastic waste have been analyzed, and recommendations have been proposed for improving the current plastic waste management and handling system using the Odesa region as a case study. Enhancing the existing system will help reduce the environmental burden in the Odesa region and significantly increase both the quantity and quality of secondary raw materials obtained from plastic waste. If the current collection and recycling system for plastic waste in the Odesa region is improved, a significant portion of this waste could be processed at existing enterprises within the Odesa industrial and urban agglomeration. *Key words:* plastic waste, management and handling, municipal solid waste, recycling.

Постановка проблеми. Виробництво пластикових матеріалів вимагає великих матеріальних ресурсів та енергії, а також є джерелом викидів значної кількості забруднюючих речовин та парникових газів. Наприклад, у 2019 році виробництво пластикових матеріалів зумовило викиди 1,8 млрд т парникових газів, що становить 3,4% від їх світового обсягу. Основними сфери споживання пластикових матеріалів в Україні є: будівництво (27%); тара і упаковка (27%); автомобілебудування (8%); виробництво меблів (8%); електричне і електронне обладнання (7%); товари широкого вжитку (4%); аграрна промисловість (2%) та інші галузі економіки (17%).

Серед пластикових матеріалів за обсягом виробництва поліетилен (ПЕ) займає лідируючу позицію, оскільки більша частина харчової та промислової (технічної) упаковки виготовляється з поліетилену (флакони для гігієнічних рідин, пакувальна плівка та фасувальні пакети в супермаркетах, технічна плівка для накривання парників та для виконання різних бетонних робіт тощо).

Навіть за межами сфери активної антропогенної діяльності можна виявити відходи пластикових матеріалів (ВПМ), у складі яких домінує поліетилен, тому проблема використання їх як вторинних матеріальних ресурсів час є актуальною екологічною та соціально-економічною проблемою. Слід зазначити, здатність цього виду ВПМ проходити переробку необмежену кількість разів без втрати своїх властивостей, що дозволяє не тільки суттєво скоротити, якщо не повністю позбутися ПЕВ, але й суттєво заощадити вихідну вуглеводневу сировину та енергію на її виробництво. До ПЕВ належать пакети, пляшки, пакувальні плівки, флакони, ємності від хімії, ліків та інші, а також відходи виробництва, що утворюються на промислових підприємствах.

З усіх пластикових матеріалів найбільш широко в промисловому і комунально-побутовому секторах використовується поліетилен, що зумовлено його хімічними, фізико-механічними, діелектричними та іншими корисними властивостями.

Відомо, що існує такі основні види поліетилену: 1) *поліетилен низького тиску* або інакше поліетилен високої щільності (HDPE – *High Density Polyethylene*); 2) *поліетилен високого тиску* або інакше поліетилен низької щільності (LDPE – *Low Density Polyethylene*); 3) суміш поліетилену низького тиску та поліетилен високого тиску утворює *поліетилен середнього тиску*; 4) *лінійний поліетилен високого тиску* (LLDPE), який є сировиною для стрейч-плівок.

В Україні існує два контури виробництва поліетилену – первинна і вторинна переробка. У першому задіяна обмежена кількість вітчизняних хімічних підприємств, три з яких – ТОВ «Карпатнафтохім», ТОВ Фірма «Промінвест Пластик» і ТОВ «Євро Полімер Компаунд», які займають більше 90% ринку. Сировина для первинного поліетилену в основному

імпортного виробництва, що означає залежність його собівартості від динаміки валютного ринку.

Щорічно на території регіонів України утворюється близько 10-13 мільйонів тон твердих побутових відходів (ТПВ), значна частина яких складається з ВПМ, у морфологічному складі яких домінує поліетилен та поліетилентерефталат (ПЕТ). При цьому на переробку відправляється не більше 10% від загальної кількості ТПВ та незначна частка ВПМ.

Актуальність дослідження. Широка розповсюдженість серед пластикових матеріалів поліетилену і поліетилентерефталату (ПЕТ) зумовлює їх високу частку в складі ВМП. За оцінками компанії «Pro Consulting» станом на 2017 рік структура ВПМ була наступною: поліетилен – 31%; поліетилентерефталат (ПЕТ) – 20%; ламінований папір – 17%; поліхлорвініл (ПХВ) – 14%; поліпропілен – 10%; полістирол – 8%. Незважаючи на ресурсну цінність ВПМ, які вмістять поліетилен, вони потрапляють на численні звалища і полігони ТПВ, а тому проблема використання їх як вторинних матеріальних ресурсів є актуальною екологічною та соціально-економічною проблемою.

Метою дослідження є оцінка можливості використання окремих видів ВПМ в якості вторинної сировини в регіонах України.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Важливість удосконалення системи управління та поводження з відходами виробництва та споживання визначається у «Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року» [1], у Регіональних програмах управління відходами в Україні, які визначають стратегії та заходи для сталого управління відходами в конкретному регіоні країни [2]. В представленій роботі визначені і проаналізовані можливості використання в якості вторинної сировини поліетиленових відходів окремих регіонів України, зокрема в Одеській області.

Аналіз останніх досліджень. Питання управління та поводження ВПМ розкрито у роботах багатьох зарубіжних та вітчизняних науковців: J. K. Jensen (1992); A. Nag, K. Vizayakumar (2005); P. Modak (2011); Z. Khvylya (2012); V. Kwakwa, A. G. Mora (2021); L. Smith (2022); E. N. Kalali, S. Lotfian, M. Entezar et al. (2023); L. Parker (2023); N. Evode et al. (2023); О. Супруненко (2001); Т.М. Довга (2012); Ю. Лаптева (2019); В.С. Міщенко, Г.Р. Виговська (2009); В.С. Міщенко (2012); О.Н. Гаркушенко (2014); П.П. Семко (2021) та ін.

Окремі аспекти управління та поводження з ВПМ розглядалися в дослідженнях Ю.М. Маковецької [3] – вторинне ресурсокористування в Україні і регіональні аспекти його становлення; І.В. Волошиної [4] – переробка ТПВ, що містить пластик; В.Г. Герасимчука [5] – стратегія використання пластику у циркулярній економіці; Є.О. Михайлової, Дейнека Д.М., Панчевої [6] – аналіз методів пере-

роблення пластикових відходів; Є.О. Липницької і Б.В. Довгань [7] – правові аспекти державної політики у сфері використання пластику в Україні.

Особливостям управління та поводження з ВПМ у потоці ТПВ Одеської області присвячені роботи Т.А. Сафранова, В.Ю. Приходько, Д.Ю. Яновського [8], В.Ю. Приходько, Т.А. Сафранов [9], Т.А. Сафранов, В.І. Данкевич, Т.І. Полушкіна [10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. В роботах, привчених особливостям управління та поводження на території Одеської області [8, 9, 10] наведенні дані щодо можливостей використання ресурсоцінних компонентів ТПВ регіонів України, зокрема у загальному потоці ТПВ Одеської області. У даній роботі дана оцінка можливостей використання лише окремих видів ВМП в якості вторинної сировини Одеської області.

Новизна. У представленій роботі авторами уперше проведена оцінка можливостей використання окремих видів ВМП в якості вторинної сировини, що утворюються у загальному потоці ТПВ регіонів України, зокрема на території Одеської області.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічною основою дослідження є критичний аналіз існуючих підходів до управління та поводження з окремими видами відходів пластикових матеріалів та можливостей їх використання в якості вторинної сировини. При виконанні роботи були використані опубліковані дані, а також матеріали власних доробок, присвячених дослідженню оцінки можливостей їх використання відходів пластикових матеріалів в якості вторинної сировини.

Викладення основного матеріалу. Основний обсяг ринку вторинної полімерної сировини формують тверді побутові відходи. Наприклад, за 2020 рік в Україні утворилось понад 54 млн м³ ТПВ, або понад 15 млн т, які були розміщені на 6 тис. сміттєзвалищах і полігонах, загальною площею майже 9 тис. га. Джерелами їх знаходження були торговельні та виробничі компанії, але основна частка (60% за масою) утворювалася у житлово-комунальному секторі.

У комерційному секторі було утворено близько 34% промислових твердих відходів, з яких 24% були відходами упакування, одноразовим посудом тощо; причому 10% ВПМ виникало під час перевезення й обробки вантажів. З погляду типології в структурі ВПМ найбільшу частку становить різноманітне упакування, на другому місці – плівки, третьому – тара із поліетилентерефталату. Україна відстає від розвинених країн за рівнем сортування та вторинної переробки ВПМ (частка поширенішого джерела ВПМ – ПЕТ-пляшок становить у середньому 20%, а частка пластику із загальної кількості відходів не перевищує 10%. Незважаючи на поточний стан, рівень збирання пластику істотно зростає [5].

Ефективне вирішення всіх проблем на кожному етапі життєвого циклу пластикових матеріалів

повинно бути закріплене у відповідних стандартах – як міжнародного, так і національного рівня, а також на рівні окремих підприємств. Виробники пластикової продукції зазвичай орієнтовані на отримання прибутку. Проте саме бізнес має нести відповідальність за утилізацію та повторне використання продукції після її споживання. Виробник повинен контролювати рух своєї продукції по всьому ланцюгу: від дистрибуції до кінцевого використання. Ще в 1970-х роках було поставлено завдання організувати переробку відходів поліетиленової плівки за моделлю замкнутого циклу: «виробництво – розподіл – обмін – споживання – вторинна переробка». Основні етапи підготовки та переробки вторинних полімерних матеріалів включають: збір і транспортування → сортування та первинне очищення від забруднень → подрібнення і розділення на фракції → промивання → механічне і термічне сушіння → агломерація та грануляція → виготовлення нових виробів [5].

Слід зауважити, що в Україні ефективність переробки твердих побутових відходів (ТПВ) тісно пов'язана з вирішенням організаційно-правових, технологічних, а також еколого-економічних питань. Морфологічний склад ТПВ за основними компонентами приблизно розподіляється таким чином: 42,5% – вторинна сировина, 36,5% – харчові відходи, 21% – змішані відходи. На співвідношення цих складових значний вплив мають рівень благоустрою житлових територій, сезонні зміни, кліматичні умови та інші чинники [4].

З екологічної та економічної точок зору одним із перспективних способів поводження з ВПМ є їх перетворення на вторинну сировину, енергію або продукцію, що має споживчу цінність. До методів фізичної переробки належить механічний рециклінг, який полягає у подрібненні ВПМ без істотної зміни їх хімічної структури; цей спосіб є технічно нескладним, однак потребує ретельного сортування та очищення ВПМ, а також має обмеження щодо повторного використання отриманого матеріалу. Хімічна переробка здійснюється через процеси сольволізу (гідроліз, гліколіз, метаноліз) та конверсії (піроліз, газифікація), у результаті чого полімери розкладаються на мономери, придатні для повторного виробництва пластикових виробів з такими ж властивостями; хімічні методи дозволяють ефективно переробляти навіть змішані та забруднені ВПМ без втрати якості кінцевої продукції. Отже, застосування таких технологій сприятиме зменшенню обсягів ВПМ, їх трансформації у корисну вторинну сировину та зниженню потреби у використанні природних ресурсів для виробництва первинних полімерів [6].

На сьогодні в Україні діє приблизно 100 підприємств, що займаються утилізацією ВПМ. Частина з них – це підприємства з тривалим досвідом роботи, які паралельно використовують вторинну сировину, інші ж – новостворені компанії, спеціалізовані винят-

ково на її переробці. Останніми роками спостерігається активне зростання кількості підприємств, орієнтованих саме на перероблення ВПМ, зокрема тих, що входять до складу ТПВ. Основним видом діяльності таких підприємств є переробка ВПМ на регранулят. На цих виробництвах здійснюється сортування ВПМ за типом, кольором і якістю, а також очищення, подрібнення та інші підготовчі процеси. Однак ключовою проблемою для цих підприємств залишається нестача сировини, що призводить до їхньої неповної завантаженості. Найуспішніше вирішує це питання, наприклад, підприємство «Черкасивторресурси», яке встановило у місті Черкаси спеціальні контейнери для збору ПЕТ-пляшок і стабільно збільшує обсяги переробки. Зокрема, у 2007 році було оброблено 2342,3 тони використаних ПЕТ-пляшок, а у 2008 році – вже 3491,7 тони. Основна концентрація таких підприємств спостерігається у великих містах, таких як Київ (близько 10 підприємств), Одеса (10), Донецьк (7), Дніпро (6) і Харків (5). Водночас у чотирьох областях – Тернопільській, Закарпатській, Миколаївській та Сумській – такі підприємства відсутні, що негативно впливає на розвиток системи роздільного збору відходів. При цьому у Тернопільській та Закарпатській областях існує розвинена мережа пунктів прийому, тож зібрані ВПМ можна за потреби передавати на переробку до сусідніх регіонів. У Сумській області ситуація складніша: відсутні як інфраструктура для роздільного збору, так і приймальні пункти, а найближчі переробні підприємства розташовані на великій відстані. Тому доцільним є створення підприємства з перероблення ВПМ у Сумській області. Це рішення варто поєднувати з розвитком мережі заготівельних пунктів та активізацією впровадження системи роздільного збирання ТПВ. Крім того, перспективними регіонами для розвитку переробної інфраструктури є Полтавська, Вінницька, Миколаївська та Херсонська області [3].

Поліфункціональна територія Одеської області, яка характеризується високим антропогенного навантаження, стикається з накопиченням значних обсягів ВПМ різного типу.

В даній роботі надана лише оцінка кількості ВПМ, яка утворюється на об'єктах житлово-господарського комплексу Одеської області. Вихідними даними є інформація щодо обсягів утворення ТПВ та ресурсоінних компонентів в їх потоці у межах окремих кластерів на території Одеської області за даними «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року», [11]. Щороку на території Одеської області утворюється 724467,05 тон ТПВ, які нерівномірно розподілені по окреслених кластерах управління та поводження з ТПВ, приурочених до різних частин області. Основна частка утворення ТПВ та ВПМ у їх складі припадає на кластер, який охоплює територію Одеської промислово-міської агломерації та при-

леглі райони (473885,38 тон, або 65% від загальної кількості), де зосереджена основна частка населення та існують можливості для ефективної управління та поводження з ВПМ.

Обсяги утворення ВПМ на території Одеської області, (т/рік) наведені в таблиці.

Таблиця

Обсяги утворення відходів пластикових матеріалів на території Одеської області, т/рік [11]

Кластер	Відходи пластикових матеріалів			
	Всього	РЕТЕ(тара для напоїв)	LDPE (плівка, пакети)	Інші види (PEHD, PVC, PS)
I	6498,89	2277,76	2341,80	1879,33
II	5507,01	1924,12	2020,06	1562,85
III	60356,33	18509,17	22572,27	19301,65
IV	2562,45	2562,45	2682,48	2085,94
V	8367,25	2937,77	2984,31	230822,10
Всього	83291,93	28211,27	32600,9247	24911,87

Як бачимо, серед ВПМ домінує поліетилен високого тиску або інакше поліетилен низької щільності (LDPE) та ПЕТ (РЕТЕ).

З урахуванням ринкової вартості, щороку з загального потоку ТПВ Одеської області можна отримати ВПМ на суму майже 0,8 млн гривень; при цьому не урахувалися ВПМ, джерелами яких є промислові, аграрні та будівельні підприємства області. Оскільки домінуюча частина ВПМ припадає на Одеську промислово-міську агломерацію, основний прибуток можна отримати у разі удосконалення системи управління та поводження з ВПМ на цієї території.

На території Одеської промислово-міської агломерації діє низка підприємств, що спеціалізуються на поводженні з ВПМ. У місті Одеса та інших населених пунктах області впроваджується система роздільного збирання ТПВ, встановлюються спеціальні контейнери для ВПМ.

Разом із тим, система управління та поводження з ВПМ в Одеській області залишається малоефективною з низки причин: 1) вона не відповідає вимогам екологічної безпеки, оскільки більша частина таких відходів потрапляє на полігони та численні несанкціоновані сміттєзвалища, що спричиняє додатковий тиск на природне середовище та негативно впливає на якість життя мешканців окремих районів області; 2) на більшій частині території області функціонує лише базова модель поводження з ТПВ; 3) хоча роздільне збирання ТПВ декларується як пріоритетний напрям, на практиці воно реалізується лише частково – наприклад, центральні райони Одеси оснащені контейнерами для ВПМ та інших ресурсозначущих фракцій, тоді як у віддалених районах така система фактично відсутня; 4) значна частина міського населення поки що не має достатнього рівня

екологічної свідомості щодо сортування відходів; 5) відсутність чітких, зручних інструкцій та нерегулярне вивезення вторинної сировини підбивають довіру до існуючої системи; 6) контейнери ТПВ часто переповнені, а під час вивезення вміст різних фракцій змішується, що додатково знижує мотивацію населення долучатися до сортування; 7) відсутні сучасні підприємства з комплексної переробки ТПВ, а ті, що діють, обмежуються переважно первинним сортуванням і брикетуванням вторинної сировини для подальшого транспортування в інші регіони.

У підсумку, не забезпечується досягнення екологічної та економічної вигоди від переробки ресурсоцінних компонентів ТПВ, зокрема ВПМ.

Перспективи використання результатів.

Отримані результати не тільки розширюють інформацію щодо стану системи управління та поводження з ВПМ у загальному потоці ТПВ в регіонах України, але і можуть бути використані при розробці заходів щодо удосконалення цієї системи в окремих регіонах України, зокрема на території Одеської області. Можливості ефективного використання ресурсного ВПМ, обмежуються наступними чинниками: 1) відсутність довгострокового бачення розвитку сфери поводження з ВПМ, що ускладнює залучення інвестицій та міжнародної технічної допомоги; 2) кількість і стан наявних майданчиків для роздільного сортування ТПВ, перевалочних станцій та полігонів не дозволяє ефективно працювати з існуючими обсягами відходів; 3) обмеженість бюджетів громад, складність доступу до кредитування, а також нестабільність нормативної бази; недостатня екологічна інформованість та відсутність механізмів громадського контролю.

Таким чином, для покращення системи поводження з ВПМ на території Одеської області доцільно:

1) розробити ефективну стратегію управління ВПМ з урахуванням досвіду країн Європейського Союзу; 2) забезпечити розширення інфраструктури для роздільного збору відходів; 3) підтримувати створення сучасних підприємств з переробки ВПМ; 4) надавати економічну підтримку бізнесу, який дотримується принципів соціальної відповідальності; 5) проводити систематичну інформаційно-просвітницьку діяльність серед населення з метою підвищення його зацікавленості у питаннях поводження з ВПМ; 6) впроваджувати пілотні ініціативи на базі шкіл, закладів вищої освіти, комунальних установ та інших організацій.

Висновки. На підставі проведених досліджень, можна зробити такі основні висновки:

1. Система поводження з ТПВ в регіонах України, зокрема в Одеській області не відповідає принципам циркулярної економіки, а тому більша частина ресурсоцінних компонентів (у тому числі відходів пластикових матеріалів, серед яких домінують поліетилен і поліетилентерефталат, які придатні для рециклінгу) потрапляють на чисельні звалища і полігони, що негативно впливає на стан довкілля.

2. Можливості ефективного використання відходів пластикових матеріалів обмежується низкою причин, у разі усунення яких можна удосконалити існуючу систему управління та поводження з цими ресурсоцінними складовими ТПВ, що дозволить зменшити рівень техногенного навантаження на довкілля і отримати економічну вигоду.

3. У разі удосконалення існуючої системи збирання та переробки відходів пластикових матеріалів, що утворюються на території Одеської області, істотна їх частка може бути перероблена на існуючих підприємствах Одеської промислово-міської агломерації.

Література

1. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року. (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80> (дата звернення: 25.05.2025).
2. Про затвердження Методичних рекомендацій з розроблення регіональних планів управління відходами (Наказ Міністерства захисту довкілля і природних ресурсів України від 16.04.2024 за № 403). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0403926-24#Text> (дата звернення: 25.05.2025).
3. Маковецька Ю.М. Вторинне ресурсокористування в Україні і регіональні аспекти його становлення. *Регіональна економіка*. 2011. №3. С. 172-180. Волошина І.В. Переробка сміття, що містить пластик (огляд). *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. т. 41, №3. С. 90-98.
4. Волошина І.В. Переробка сміття, що містить пластик (огляд). *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. т. 41, №3. С. 90-98.
5. Герасимчук В.Г. Стратегія використання пластику у циркулярній економіці: розвиток бізнесу, скорочення відходів. *Економічний вісник НТУУ «КПІ»*. 2019. №16. С. 31-41.
6. Михайлова Є.О., Дейнека Д.М., Панчева Г.М. Аналіз методів перероблення пластикових відходів. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/3ee2e7a4-d709-491a-8fd0-3c9e842f5f75> (дата звернення: 27.05.2025).
7. Липницька Є.О., Довгань Б.В. Державна політика у сфері використання пластику в Україні: правовий аспект. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2021. №10. С. 300-303. URL: http://www.lsej.org.ua/10_2021/78.pdf
8. Сафранов Т.А., Приходько В.Ю., Яновський Д.Ю. Ресурсоцінний потенціал потоку твердих побутових відходів Одеської області. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. №32. С. 144-155.
9. Приходько В.Ю., Сафранов Т.А. Ресурсоцінна складова твердих побутових відходів окремих регіонів України: монографія. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2024. 101 с. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/13062/> (дата звернення: 27.05.2025).
10. Сафранов Т.А., Данкевич В.І., Полушкін Т.І. Особливості управління та поводження з відходами пластикових матеріалів на території Одеської області. *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія...»*. 2024. вип.2. С. 75-82.
11. Регіональний план управління з відходами в Одеській області до 2030 року URL: <https://ecology.od.gov.ua/regionalnyj-plan-upravlinnya-vidhodamy-v-odeskij-oblasti-do-2030-roku/> (дата звернення: 27.05.2025).

ОЦІНЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ РИЗИКІВ РЕКУЛЬТИВОВАНИХ ПОЛІГОНІВ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ПІД ВПЛИВОМ ЗМІНИ КЛІМАТУ

Хандогіна О.В., Дрозд О.М., Завражний А. О., Хорошилов А.В., Сталінська І.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

вул. Чорноглазівська, 17, 61002, Харків

olga.khandogina@kname.edu.ua, Olena.Drozd@kname.edu.ua,

Anatolii.Zavrazhnyi@kname.edu.ua, Artem.Khoroshylov@kname.edu.ua,

Irina.Stalinska@kname.edu.ua

Рекультивовані полігони побутових відходів залишаються джерелом потенційних небезпек, що мають інерційний і довготривалий характер. У статті розглянуто ймовірність прояву залишкових ризиків, які зберігаються після їх рекультивації. З метою комплексної оцінки цих ризиків застосовано адаптовану методику мультикритеріального аналізу, що включає опис системи, структурний аналіз, мультикритеріальне оцінювання та побудову сценаріїв розвитку. У дослідженні визначено набір індикаторів, які охоплюють внутрішні процеси в тілі полігону (викиди парникових газів, накопичення фільтрату, мікробіологічна активність), вплив на прилеглу територію (забруднення ґрунту та підґрунтових вод, потенційне зниження біорізноманіття на прилеглих ділянках) і зовнішні кліматичні фактори (температура, опади, вітрові режими тощо). Аналіз показав, що кліматичні чинники у різному ступені інтенсифікують прояви залишкових ризиків. Найвпливовішими серед них є динаміка кількості опадів, тоді як найбільш чутливими до зовнішнього впливу є мікробіологічна активність, викиди парникових газів і втрата біорізноманіття. Структурний аналіз дозволив виділити чотири групи ризиків (екологічні, технологічні, економічні, санітарно-біологічні) та визначити індикатори, що мають домінуючий вплив у кожній із груп. На основі кліматичних прогнозів за сценарієм RCP 8.5 для чотирьох міст України було змодельовано інтенсивність прояву ризиків до 2049 року. Отримані результати свідчать про суттєву регіональну диференціацію ризиків, що обумовлена кліматичними трендами. Найбільш значущими залишковими ризиками є зростання мікробіологічної активності та забруднення ґрунтів, особливо за умов підвищення температури і зростання кількості опадів. Запропонований підхід дозволяє кількісно оцінити екологічні ризики, пов'язані з експлуатацією полігонів для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері охорони довкілля. Отримані результати можуть слугувати інструментом для інтеграції в процедури проведення оцінки впливу на довкілля планованої діяльності, стратегічної екологічної оцінки документів державного планування, реалізації принципів сталого розвитку. *Ключові слова:* полігони побутових відходів, зміна клімату, сталий розвиток, моніторинг, мультикритеріальний аналіз, експертне оцінювання, екологічні оцінки.

Assessment of residual risks of reclaimed landfill sites for household waste under the influence of climate change. Khandogina O., Drozd O., Zavrazhnyi A., Khoroshylov A., Stalinska I.

Reclaimed landfills continue to pose potential hazards that are both persistent and latent. This article examines the likelihood and intensity of residual risks following landfill reclamation. To evaluate these risks comprehensively, a multi-criteria analysis methodology was adapted and applied, encompassing system description, structural analysis, multi-criteria evaluation, and scenario development. A range of indicators was identified, reflecting internal processes within the landfill (e.g., greenhouse gas emissions, leachate accumulation, microbiological activity), the landfill's impact on surrounding environments (e.g., soil and groundwater contamination, potential biodiversity loss in adjacent areas), and external climatic factors (e.g., temperature, precipitation, wind regimes). The analysis demonstrated that climatic conditions amplify the expression of residual risks to varying degrees. Precipitation patterns emerged as the most influential factor, while microbiological activity, greenhouse gas emissions, and biodiversity loss were identified as the most climate-sensitive indicators. Structural analysis allowed the classification of risks into four categories – environmental, technological, economic, and sanitary-biological – and helped determine the dominant contributing indicators within each category. Based on climate projections for four Ukrainian cities under the RCP 8.5 scenario, the study modelled the projected intensification of risks through 2049. The results reveal considerable regional variation, with the most significant residual risks being heightened microbiological activity and soil contamination, particularly under conditions of rising temperatures and increased precipitation. The proposed approach enables the quantitative assessment of environmental risks associated with reclaimed landfills, thereby supporting evidence-based decision-making in environmental management. The findings may be integrated into environmental impact assessments, strategic environmental assessments of policy documents, and the implementation of sustainable development goals at the local and regional levels. *Key words:* landfills, climate change, sustainable development, monitoring, multi-criteria analysis, expert assessment, environmental assessments.

Постановка проблеми. Захоронення побутових відходів (ПВ) на полігонах продовжує залишатись одним із найпоширеніших методів управління відходами, що використовуються в багатьох країнах, незважаючи на низький статус цього методу в ієрархії відходів. Попри стрімкий розвиток технологій перероблення та повторного використання ресур-

сів, значна частина відходів продовжує накопичуватись на спеціально відведених територіях, що призводить до довготривалих екологічних наслідків. Техногенний вплив полігонів побутових відходів проявляється у забрудненні атмосферного повітря, ґрунтів, поверхневих і підземних вод, зміні ландшафтів та формуванні потенційно небезпеч-

них геохімічних процесів. З часом полігони досягають критичних меж заповнення, що вимагає їх закриття та проведення рекультиваційних заходів. Рекультивація таких об'єктів є важливим етапом у відновленні порушених земель, однак навіть після завершення цих заходів існують серйозні екологічні ризики. Залишкові процеси біодеградації органічних компонентів відходів можуть тривати десятки років, супроводжуючись виділенням метану, формуванням фільтрату та міграцією токсичних речовин у навколишнє середовище. Крім того, недостатній контроль за технічним станом рекультивованих полігонів підвищує ймовірність надзвичайних ситуацій.

На сьогоднішній день існує дефіцит системного підходу до моніторингу та управління пострекультиваційними ризиками, що обумовлює необхідність комплексного аналізу техногенного впливу полігонів як у фазі їх функціонування, так і в період після закриття. Відсутність єдиних стандартів екологічної безпеки для рекультивованих територій, обмеженість даних про динаміку деградаційних процесів, а також недосконалість механізмів правового регулювання ускладнюють розробку ефективних заходів із мінімізації довгострокових ризиків.

У зв'язку з цим необхідним є наукове обґрунтування підходів до оцінювання залишкових ризиків рекультивованих полігонів ПВ, що дозволить підвищити екологічну безпеку та забезпечити сталий розвиток територій, прилеглих до об'єктів видалення відходів. Це потребує інтеграції підходів екологічного планування, комплексної оцінки ризиків і сприяє досягненню цілей сталого розвитку (ЦСР), зокрема ЦСР 11 (сталий розвиток міст і громад) та ЦСР 12 (раціональне споживання і виробництво) [1].

Актуальність дослідження. В Україні, за оцінками Міністерства розвитку громад і територій, у 2023 році налічувалось понад 5 тис. сміттєзвалищ і полігонів, сумарна площа яких перевищувала 12 тис. га (без урахування відомостей щодо тимчасово окупованих територій, а також більшості східних та південних регіонів України, які через воєнну агресію не мали можливості надати повну інформацію щодо статистичних даних у цій сфері). При цьому за офіційними даними, 161 сміттєзвалище є перевантаженим, 713 – не відповідають нормам екологічної безпеки, 1247 – потребують паспортизації, 325 – рекультивації. Щодо сучасних методів та технологій управління побутовими відходами, лише на 53 полігонах в Україні функціонують системи збирання фільтрату, з яких на 47 об'єктах впроваджено технології його знезараження. Системи вилучення біогазу впроваджено на 16 полігонах, де також експлуатуються когенераційні установки для утилізації та перетворення біогазу на електроенергію і тепло [2].

Рекультивація полігонів після завершення терміну їх експлуатації включає технічний та біологічний етапи. Технічна рекультивація передбачає формування захисного шару з глини та геомемб-

рани, встановлення систем збору фільтрату та газу. Біологічна рекультивація включає насадження рослинності для стабілізації ґрунту та відновлення екосистеми [3, 4].

У межах реформування системи управління відходами в Україні поступово вибудовується нормативна база моніторингу, яка охоплює як об'єкти оброблення, так і місця утворення, зберігання та видалення відходів [5, 6]. Основний акцент цієї системи зроблено на технологічні параметри, зокрема фізико-хімічні характеристики викидів, скидів, стабільність захисних елементів полігонів та екологічну безпеку об'єкта впродовж усього його життєвого циклу. У нових правилах, що регламентують експлуатацію та догляд за полігонами після закриття [4], передбачено обов'язковий лабораторний контроль доквілля, гідрометеорологічний моніторинг, регулярні технічні огляди захисного екрана та геодезичні дослідження для відстеження просідання маси відходів. Такий підхід орієнтований переважно на контроль інженерно-екологічних ризиків і поки що обмежено враховує ширші екосистемні чи кліматичні фактори.

Варто відзначити, що при організації догляду за рекультивованими полігонами обов'язково необхідно враховувати вплив зміни клімату, оскільки полігони, як складні інженерні споруди, можуть бути чутливими до змін температури, режиму опадів, екстремальних погодних явищ та коливань рівня ґрунтових вод. Такі впливи можуть призвести до прискореного зношення конструктивних елементів, порушення герметичності покриття або підвищення ризику інфільтрації та забруднення доквілля. Тому, з метою реалізації основних положень державної кліматичної політики, вважаємо за доцільне враховувати в процесі моніторингу полігонів побутових відходів динаміку кліматичних показників.

Регулятивну функцію щодо організації моніторингу об'єктів видалення відходів виконують екологічні оцінки (оцінка впливу на доквілля, стратегічна екологічна оцінка), оскільки у процесі їх реалізації формуються конкретні вимоги до обсягу, періодичності та параметрів спостережень. Зокрема, можуть бути визначені ключові індикатори стану доквілля, які необхідно відстежувати. Також різні види екологічних оцінок встановлюють часові межі моніторингу, передбачаючи можливість багаторічних спостережень з метою виявлення затяжних або вторинних ефектів. Результати моніторингу рекультивованих полігонів є цінним джерелом емпіричних даних, необхідних для якісного проведення екологічних оцінок. Вони дозволяють виявити довгострокові екологічні наслідки функціонування полігонів, що можуть не проявлятися на ранніх етапах рекультивації. Така інформація є критично важливою для оцінки кумулятивного впливу на доквілля з урахуванням множинних джерел забруднення та взаємодії між компонентами екосистем.

Моніторингові дані є основою для прогнозування потенційних ризиків, пов'язаних із повторним використанням рекультивованих територій (для сільського господарства, будівництва, розвитку “зеленої” інфраструктури тощо). У цьому контексті екологічні оцінки слугують важливим механізмом виявлення обмежень і вимог до цільового використання таких земель на етапі розробки документів державного планування.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Рекультивация полігонів ПВ значно зменшує їх вплив на довкілля, проте не ліквідує його. Дослідження залишкових ризиків, пов'язаних із рекультивованими полігонами ПВ, сприяє досягненню ключових положень державної кліматичної політики та політики в сфері управління відходами, які зазначені в Законі України “Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів” [7]; Національно визначеному внеску України до Паризької угоди [8]; Стратегії низьковуглецевого розвитку України до 2050 року [9]; Законі України “Про управління відходами” [10]; Національній стратегії управління відходами до 2030 року [11]; Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року [12], Законі України “Про основні засади державної кліматичної політики” [13]. Застосування наукових підходів, зокрема системного аналізу, забезпечує сталість та дієвість управлінських рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел підтверджує комплексність дослідження впливів полігонів ПВ на навколишнє середовище. Серед основних наслідків – забруднення підземних вод фільтратом, забруднення повітря завислими частинками та біогазами, а також вплив на здоров'я населення, який може мати як канцерогенні, так і неканцерогенні ефекти [14]. Окрему загрозу становить вплив полігонів у довгостроковій перспективі – після завершення їх експлуатації. Більшість компонентів відходів можуть десятиліттями залишатися екологічно активними, утворюючи фільтрат і гази, що потенційно можуть мігрувати через ізоляційні шари або ґрунтову товщу [15].

У цьому контексті надзвичайно актуальною стає тема рекультивации полігонів, що розглядається як ключова складова управління територіями після виведення полігонів з експлуатації. Згідно з сучасними практиками, рекультивация повинна враховувати принципи ієрархії управління відходами, сприяти відновленню ландшафту та подальшому безпечному використанню територій. Особливе значення у післяексплуатаційний період має система екологічного моніторингу. За чинними вимогами, полігони підлягають обов'язковому моніторингу щонайменше протягом 30 років після закриття, проте сучасні дослідження акцентують на доцільності зміни формального терміну [16]. Основними індикаторами для оцінки безпечності полігону

є склад і об'єм фільтрату, рівень утворення біогазу, а також вплив на поверхневі й підземні води, повітря та ризики вторинної міграції забруднюючих речовин. Такий підхід дозволяє адаптувати інтенсивність та тривалість моніторингу залежно від фактичного стану об'єкта [16].

У 2019 році Агентство з охорони навколишнього середовища США опублікувало оціночний звіт [17] який визначає ризики, пов'язані із викидами небезпечних забруднювальних речовин в атмосферне повітря. Основними оцінюваними показниками є канцерогенні та неканцерогенні ризики для населення внаслідок інгаляційного впливу, а також оцінка фонових рівнів викидів і потенціалу накопичення забруднювачів у приземному шарі атмосфери. Інші шляхи впливу, такі як забруднення ґрунту, води чи ланцюгів живлення, не розглядаються.

Важливим напрямом дослідження є вивчення взаємозв'язку між зміною клімату та функціонуванням полігонів побутових відходів. Зміна клімату суттєво впливає на інфраструктуру полігонів. Попри те, що розрахунковий термін експлуатації такої інфраструктури становить близько 100 років, посилення проявів зміни клімату можуть істотно впливати на тривалість експлуатаційного періоду та надійність конструкцій [18].

Значну кількість досліджень присвячено оцінці впливу полігонів побутових відходів на зміну клімату, зокрема в контексті викидів парникових газів (метану, вуглекислого газу), що утворюються на етапі захоронення та після його завершення [19–21]. Проте важливо звернути увагу й на зворотний зв'язок – вплив зміни клімату на умови існування старих та рекультивованих полігонів [22–23]. Підвищення температури повітря, збільшення інтенсивності опадів, коливання рівня ґрунтових вод і частота екстремальних погодних явищ здатні порушити стабільність рекультивованих об'єктів, змінити динаміку дегазації, поведінку фільтрату та ефективність інженерного захисту. Така взаємозалежність потребує інтегрованого підходу до планування, оцінки ризиків та довгострокового моніторингу полігонів з урахуванням кліматичних сценаріїв.

Попри активне впровадження інженерних рішень та природоохоронних заходів при рекультивации полігонів побутових відходів, у науковій та прикладній площині залишається низка нерозв'язаних проблем, пов'язаних із післяпроектною оцінкою їх екологічної безпеки особливо в умовах поточної зміни клімату. Залишкові ризики рекультивованих полігонів побутових відходів в умовах зміни клімату є малодослідженим питанням і потребують подальшого вивчення.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наразі недостатньо розробленими є підходи до інтегральної оцінки потенційних ризиків, що зберігаються або можуть виникнути на рекультивованих

полігонах у середньо- та довгостроковій перспективі. У більшості випадків оцінювання екологічного стану таких об'єктів здійснюється на основі обмеженої кількості показників – переважно фокусуючись на контролі за витокami фільтрату або концентрацією біогазу. Відсутність системного підходу до ризик-орієнтованого управління обмежує можливості адаптації заходів поводження з рекультивованими полігонами до конкретних умов, зокрема в контексті впливу зміни клімату, яка може суттєво модифікувати гідрологічні та геохімічні характеристики полігонів. Особливої уваги заслуговує інтеграція методів багатокритеріального аналізу у систему підтримки прийняття рішень щодо оцінювання ризиків на рекультивованих полігонах. Незважаючи на потенціал цих методів у врахуванні взаємодії багатьох факторів, їх використання у сфері післяпроектного екологічного аналізу залишається фрагментарним. На сьогодні не існує узгоджених методичних підходів до побудови критеріїв, вагових коефіцієнтів та процедур нормалізації даних для об'єктів, що перебувають на різних стадіях постексплуатаційного моніторингу.

Новизна. Вперше застосовано метод мультикритеріального аналізу для оцінки залишкових ризиків рекультивованих полігонів ПВ з урахуванням впливу зміни клімату.

Методологічне або загальнонаукове значення. Проведене дослідження поглиблює розуміння системної взаємодії природних, техногенних та соціальних складових при дослідженні складних техногенних систем, пропонуючи структуровану оцінку впливів і ефектів, що є необхідним для інтеграції оцінок впливу зміни клімату у планування розвитку територій на локальному рівні.

Викладення основного матеріалу. Залишкові ризики рекультивованих полігонів побутових відходів – це сукупність потенційних негативних впливів на довкілля, здоров'я населення та інженерну інфраструктуру, які зберігаються або можуть проявитися після завершення технічного та біологіч-

ного етапів рекультивації полігону, незважаючи на вжиті заходи з його стабілізації, ізоляції та моніторингу. Ризики можуть включати: екологічні (викиди парникових газів, фільтратні витoki, забруднення ґрунту та підземних вод); технологічні (обрушення схилів, деградація захисних шарів); санітарно-біологічні (зростання мікробіологічної активності, біоаерозольні викиди); соціальні та економічні (втрата рекреаційної чи господарської цінності території, підвищення витрат на повторне втручання). Залишкові ризики є неповністю контрольованими, мають інерційний характер і можуть проявлятися протягом тривалого періоду (іноді десятиліттями).

Оцінювання залишкових ризиків проводили для потенційно рекультивованих полігонів ПВ на території України із застосуванням окремих мультикритеріального аналізу, що дозволяє одночасно враховувати кілька (часто суперечливих) критеріїв для оцінки альтернатив, варіантів розвитку чи управлінських рішень. Цей підхід особливо корисний у складних системах, де вплив на об'єкт або ситуацію здійснюється через взаємодію екологічних, соціальних, економічних, технічних та інших чинників.

Використаний у даному дослідженні підхід є варіацією багатокритеріального аналізу, яка запропонована Р. Стівенсом [23]. Методичний підхід складався з трьох основних етапів: опис системи (System sketch), структурний аналіз (System Analysis), мультикритеріальне оцінювання (MCE) та розробка сценаріїв розвитку системи. Він дозволяє визначати відносну важливість (вагу) різних факторів через експертну або кількісну оцінку; порівнювати сценарії чи варіанти за сукупністю показників та забезпечує прозорість і обґрунтованість вибору найбільш доцільного рішення в умовах невизначеності та обмежених ресурсів.

У контексті оцінки рекультивованих полігонів ПВ, мультикритеріальний аналіз дозволяє поєднати дані про впливи на довкілля, технологічні ризики та соціальні аспекти, що сприяє комплексному

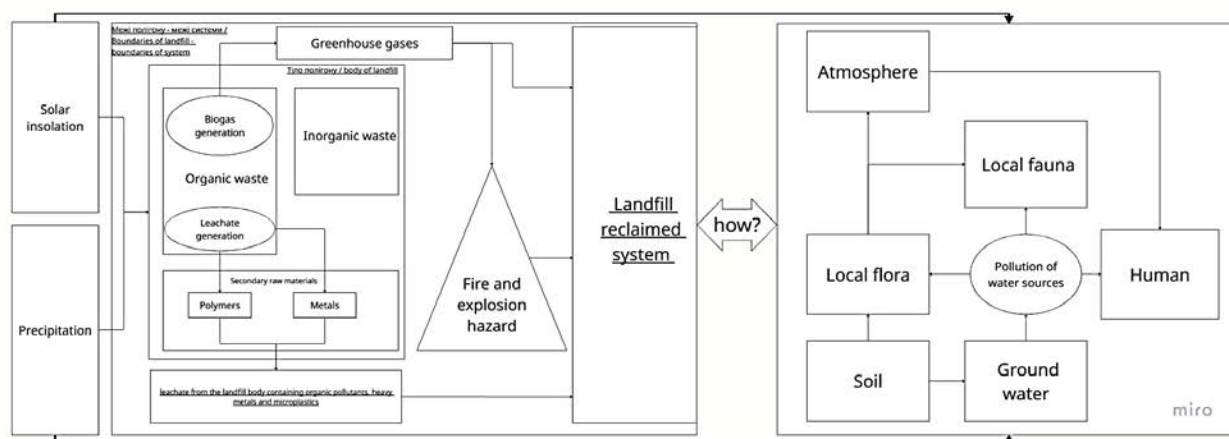


Рис. 1. Взаємозв'язки в досліджуваній системі

розумінню залишкових ризиків і підтримці сталого управління територіями.

Опис системи (System sketch) – це процес визначення характеристик системи з точки зору взаємодій її складових. Досліджувана система – вплив зміни клімату на інтенсивність процесів в тілі полігону після його рекультивациі та можливі ризики для компонентів довкілля прилеглої території (рис. 1).

Із залученням експертів різних груп (науковці і професіонали-практики у сферах управління відходами, оцінки впливу зміни клімату на компоненти довкілля) було визначено низку індикаторів, які дозволяють системно оцінити інтенсивність внутрішніх процесів у тілі полігону та ризики, які вони можуть становити для довкілля прилеглих територій. Після завершення рекультиваційних заходів полігон перестає бути виключно місцем захоронення відходів – він трансформується у складну техногенну екосистему, в якій продовжують відбуватися біогеохімічні, фізико-механічні та мікробіологічні процеси. Інтенсивність цих процесів, своєю чергою, значною мірою залежить від зовнішніх кліматичних умов (температура повітря, кількість опадів, тривалість морозного періоду, напрямки і швидкість вітру, інсоляція тощо).

У ході дослідження були визначені дві основні групи індикаторів. Перша – описує внутрішню динаміку полігону після рекультивациі, зокрема: викиди парникових газів (метан, діоксид вуглецю), вибухота пожежонебезпечність, ймовірність обвалення схилів, обсяги фільтрату, що утворюються, активність мікроорганізмів у товщі відходів, а також вплив на прилеглу територію, зокрема: забруднення ґрунту та підґрунтових вод, потенційне зниження біорізноманіття на прилеглих ділянках. Друга – включає кліматичні показники, які визначають умови перебігу вказаних процесів: середньорічна температура, кількість опадів, вітрові режими, тривалість морозного періоду, інтенсивність сонячного випромінювання, а також зміни локальних кліматичних трендів, які свідчать про поступове потепління або зміну режиму зволоження.

Кліматичні чинники виступають своєрідними моделюючими змінними, які не лише впливають на характер процесів, але й суттєво змінюють їхню швидкість, спрямованість і наслідки для довкілля. Наприклад, підвищення середньорічної температури може активізувати мікробіологічні процеси деградації органічних решток, що сприяє зростанню викидів метану. У свою чергу, зростання кількості опадів підвищує ризик накопичення фільтрату та просочування токсичних речовин у підземні води. Водночас, зміна температурно-вологісного балансу може призвести до зміни щільності складення ґрунтів та обвалів на схилах полігону, особливо у разі незадовільної інженерної стабілізації. Визначення індикаторів дозволяє будувати прогнози сценаріїв зміни стану полігону за різних кліматичних умов, що є основою для ефективної екологічної оцінки ризиків та розробки систем адаптаційного управління.

Структурний аналіз (System Analysis) передбачав попарні оцінки між індикаторами за шкалою

від нуля до чотирьох, де 0 – це відсутність зв'язку, 1 – слабкий зв'язок, 2 – середній зв'язок, 3 – сильний зв'язок та 4 – критичний зв'язок. Залучені експерти оцінювали інтенсивність впливу кожного індикатора відносно всіх інших окремо, а середні значення експертного оцінювання визначали математично. Окремо розраховували сумарний ефект і сумарний вплив за кожним досліджуваним індикатором. Проведений аналіз показав, що індикатором, який має найбільший вплив на всі інші, є зміни середньорічної кількості й інтенсивності опадів. У свою чергу найбільш чутливими індикаторами за сумарним ефектом є збільшення мікробіологічної активності, викиди парникових газів та втрата біорізноманіття (рис. 2).

Температура повітря та параметри вітрових потоків не завжди безпосередньо формують потужні наслідки, але істотно модулюють інші процеси, зокрема динаміку газоутворення, зміну стану схилів тощо. Їхній вплив є латентним, але системно важливим. Інсоляція та морозні дні, які на етапі початкового оцінювання були визнані як малозначущі в контексті коротко- та середньострокового впливу на систему, з огляду на потенційну зміну кліматичних трендів можуть набувати більшої ваги у довгостроковій перспективі.

Викиди парникових газів, забруднення підземних вод, забруднення ґрунтів, втрата біорізноманіття, вибух- і пожежонебезпечність, обвалення схилів є наслідками змін у системі й потребують моніторингу як потенційні прояви ризиків. Їх можна вважати “вразливими точками” або кінцевими індикаторами деградації, що дозволяють фіксувати наближення до порогових значень стабільності екосистеми.

Проведене оцінювання системних драйверів за критерієм “вплив – ефект” дозволило диференціювати індикатори першої групи на чотири групи ризиків – економічні, екологічні, технологічні, санітарно-біологічні. У кожній групі обрано один визначальний індикатор, який має найбільшу кількість зв'язків з іншими індикаторами.

Таким чином було визначено, що викиди парникових газів мають визначальний вплив в групі екологічних ризиків, забруднення ґрунтів – в групі економічних ризиків, зростання мікробіологічної активності – в групі санітарно-біологічних ризиків, обвалення схилів полігону – в групі технологічних ризиків. Наступним кроком було визначення “ваг” ризиків шляхом порівняльного аналізу критеріїв, де 1–2 – відносна рівність, 3–4 – перевага, 5–6 – істотна перевага, 7–8 – абсолютна перевага одного критерію над іншим (табл. 1) Цей підхід можна розглядати як основу подальшого оцінювання сценаріїв проявів інтенсивності ризиків рекультивованих полігонів і прикладною складовою для стратегічного планування, екологічного моніторингу та адаптаційної політики на рівні як окремих полігонів, так і територіальних громад у цілому.

Для врахування впливу другої групи індикаторів на інтенсивність проявів ризику проведено оцінку тенденцій зміни клімату на території України на основі аналізу даних порталу Open Meteo [24],

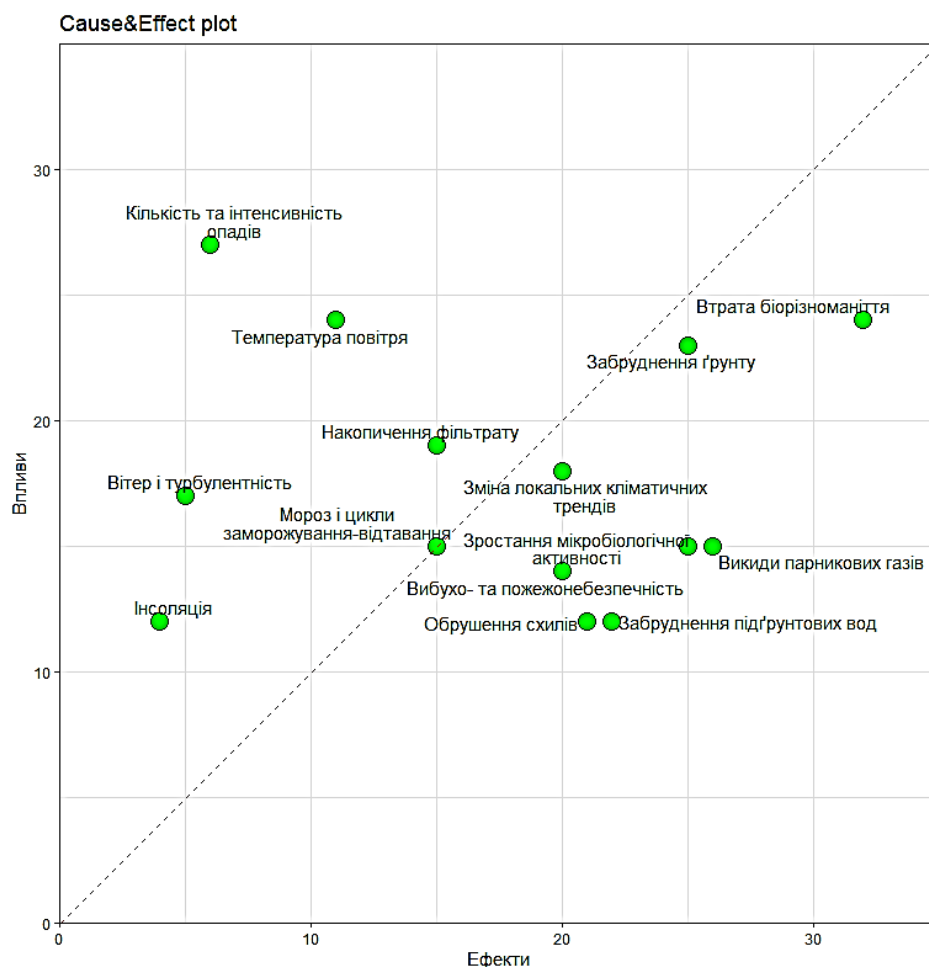


Рис. 2. Взаємодія “вплив-ефект” початкового оцінювання системних драйверів

з використанням моделі ECMWF за сценарієм RCP 8.5. Зокрема оцінено динаміку показників середньорічної температури повітря та річної кількості опадів для чотирьох міст України (Луцьк, Ужгород, Вінниця, Кривий Ріг). Прогнозні зміни до 2049 року розраховано відносно базового 1950 року. Згідно з результатами оцінки, для обраних міст прогнозовані зміни середньорічної температури коливаються від -10% до $+16,7\%$, а річні зміни опадів – від -21% до $+70\%$.

На основі експертної оцінки, враховуючи прогнозовані тенденції зміни клімату, для кожного з міст був визначений ступінь інтенсивності прояву ризиків. У вихідній методиці це показник “корисності” (“utility”), який в методологічному плані означає дослідження стандартизованих залежностей між компонентами, що впливають на ситуацію, еволюцію події всередині системи та стан системи. “Корисність” є змінною впливу параметра відносно самого себе. Значення коливається від нуля до одиниці. Конкретна форма зв’язку між інтенсивністю прояву процесу та кожним параметром – лінійна, логарифмічна чи інша – визначається на основі реальних даних або обґрунтованих припущень та експертних оцінок щодо того, як діапазон кожного параметра впливає на стан досліджуваної системи

[23, 25]. Показник “корисності” розраховується за допомогою наступного рівняння:

$$\text{Total utility} = \sum w_i \cdot u_i \quad (1)$$

де w_i – відносна вага кожного параметра;
 u_i – значення корисності, визначене для кожного сценарію.

Отримана результуюча використовується для ранжування різних сценаріїв з точки зору їх ефективності.

На відміну від класичного мультикритеріального аналізу, де “корисність” означає числову оцінку переваги або цінності певної альтернативи, в нашому випадку оцінювалась потенційна шкода при настанні того чи іншого ризику, тому показник “корисності” трансформовано в «інтенсивність прояву ризику». Значення для кожного параметра «інтенсивності прояву ризику» визначали на основі оцінок зв’язку між діапазоном цього параметра та його впливом на систему. Цей процес супроводжувався побудовою графіків інтенсивності прояву для кожного ризику окремо (рис. 3).

Оцінку ефектів для кожного з факторів було помножено на відносну вагу відповідного критерію (табл. 1).

Таблиця 1
Результати оцінки інтенсивності прояву ризиків

Індикатори	Ужгород	Вінниця	Кривий Ріг	Луцьк
	W x U1	W x U2	W x U3	W x U4
Зростання мікробіологічної активності	12,69	8,46	2,82	14,1
Забруднення ґрунту	5,92	3,95	1,32	6,58
Викиди парникових газів	2,75	0,31	0,092	1,53
Обрушення схилів полігону	1,16	0,46	0	0,93

Результати оцінювання вказують на регіональну диференціацію ризиків залежно від специфіки прояву зміни клімату у конкретних містах. Незважаючи на відмінності у проявах зміни клімату в обраних містах, переважною спільною небезпекою є зростання мікробіологічної активності. У контексті зміни клімату істотне збільшення залишкових факторів ризику очікується за одночасного зростання середньорічної температури повітря та річної кількості опадів. Якщо температура зростає, а кіль-

кість опадів зменшується, інтенсивність процесів зростання мікробіологічної активності може дещо сповільнитися, тоді як інтенсивність викидів парникових газів очікувано зростатиме. За умов незначних проявів зміни клімату очікується зниження інтенсивності всіх досліджуваних процесів, проте зростання мікробіологічної активності та забруднення ґрунту залишатимуться найважливішими факторами. Зі зниженням середньорічної температури та за одночасного зростання кількості опадів можна очікувати уповільнення біохімічних реакцій в тілі полігонів та активізацію природних процесів самоочищення прилеглої території. Таким чином було виявлено, що ступінь інтенсивності прояву ризику зменшується в ряду: зростання мікробіологічної активності – забруднення ґрунту, викиди парникових газів – обрушення схилів полігону. Отримані безрозмірні значення були відображені в діапазоні від 0 до 100% (рис. 4).

Отримані результати вказують на суттєвий вплив кліматичних факторів на екологічну стабільність полігонів ПВ після їх рекультиватії. Така інформація є критично важливою для розробки ефективних стратегій адаптації до зміни клімату, впровадження інтегрованих систем моніторингу стану полігонів, а також для врахування в довгостроковому плану-

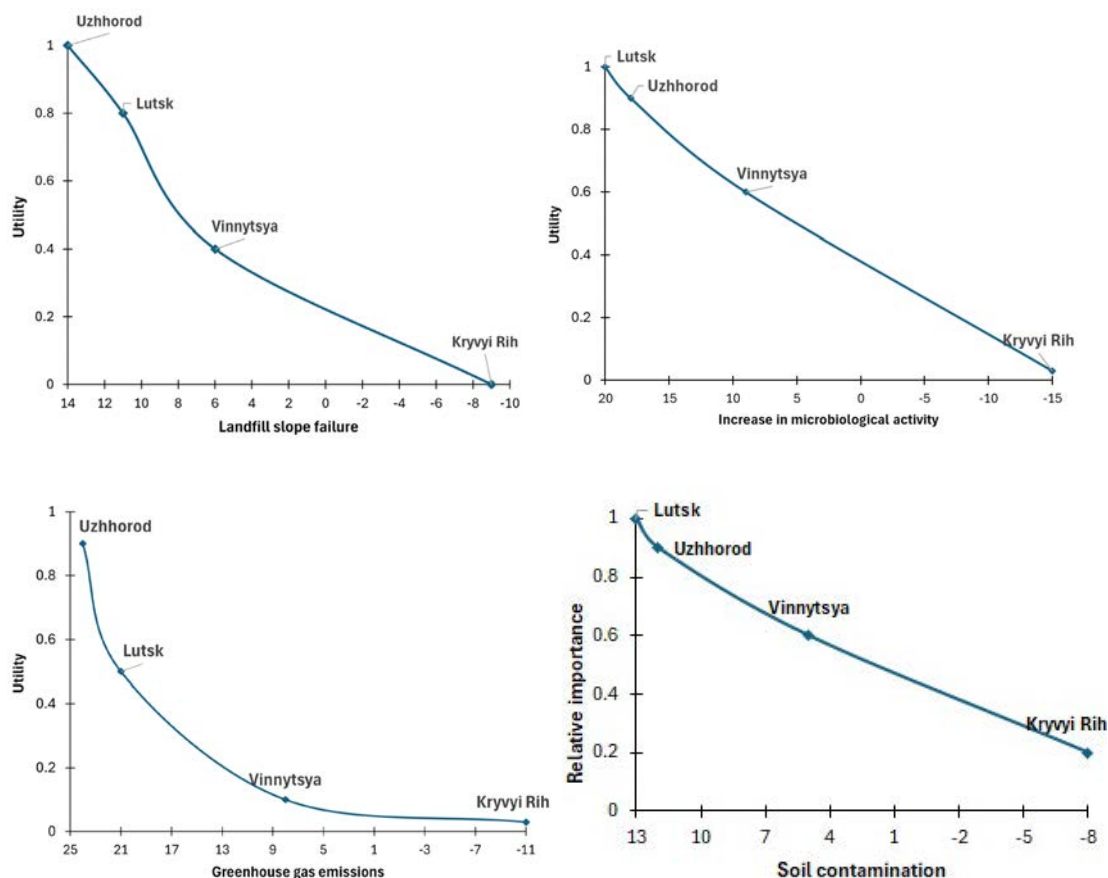


Рис. 3. Сценарії інтенсивності прояву залишкових ризиків рекультивованих полігонів ПВ в умовах зміни клімату

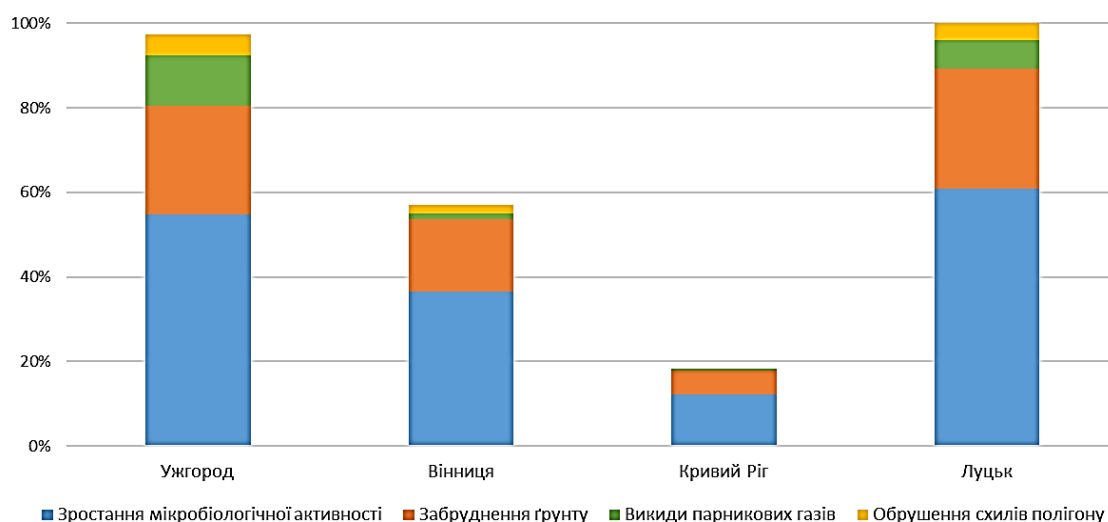


Рис. 4. Сценарії інтенсивності прояву залишкових ризиків рекультивованих полігонів ПВ в умовах зміни клімату

ванні соціально-економічного розвитку територій з урахуванням потенційних екологічних ризиків. Водночас важливо зазначити, що отримані оцінки мають експертний характер, тобто базуються на думках кваліфікованих фахівців у межах структурованої процедури оцінювання, а не на статистичній моделі з верифікованими емпіричними даними. Тому результати можуть відрізнятися залежно від складу експертної групи, її досвіду, контексту оцінювання та рівня деталізації вхідних даних. Крім того, варто враховувати, що кінцева оцінка ризиків залежатиме від обраного кліматичного сценарію та моделі кліматичного прогнозування, яка застосовується в аналізі. Саме тому зазначені цифри слід розглядати як орієнтовні в рамках одного конкретного сценарного варіанту, а не як універсальні прогнози для всіх можливих варіантів майбутнього розвитку кліматичної системи. Загалом, наведене дослідження демонструє практичне застосування мультикритеріальної методики у виявленні територіальної вразливості до зміни клімату та підвищених ризиків, що виникають після рекультивації полігонів ПВ. Такий підхід є корисним не лише для екологічного планування, але й для розробки стратегій соціально-економічного розвитку громад і моніторингу досягнення цілей сталого розвитку.

Висновки. Інтеграція біофізичних та кліматичних індикаторів у модельну систему оцінки впливу зміни клімату на рекультивовані полігони ПВ під час проведення екологічних оцінок або розробки програм і стратегій сталого соціально-економічного розвитку територій дозволяє комплексно оцінити їх екологічну стійкість, спрогнозувати ризики та розробити відповідні адаптаційні заходи для зменшення негативного впливу на довкілля та здоров'я насе-

лення. Такий підхід відповідає сучасним європейським стандартам стратегічної екологічної оцінки та сталого управління техногенними екосистемами в умовах зміни клімату.

Застосування мультикритеріального підходу у цьому дослідженні демонструє його практичну цінність для оцінювання територіальної вразливості до зміни клімату. Незважаючи на відмінності проявів зміни клімату в обраних містах, переважачим спільним ризиком для рекультивованих полігонів ПВ є зростання мікробіологічної активності в тілі полігону. Зростання інтенсивності прояву залишкових ризиків очікується при одночасному зростанні середньорічної температури повітря та річної кількості опадів. За умов незначних проявів зміни клімату очікується зниження інтенсивності всіх досліджуваних процесів. Найнижчі залишкові ризики очікуються за умов зниження середньорічної температури при збільшенні річної кількості опадів.

Дане дослідження є прикладом застосування мультикритеріального аналізу, результати якого можуть слугувати основою для формування ефективних управлінських рішень. Водночас, слід зауважити, що в кожному конкретному випадку кінцевий результат буде залежати від складу залучених експертів, вибраної кліматичної моделі та сценарію зміни клімату, в межах яких проводиться дослідження.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеного дослідження можуть слугувати основою розробки системи індикаторів моніторингу об'єктів видалення побутових відходів з урахуванням впливу зміни клімату, індикаторів моніторингу реалізації положень документів державного планування при проведенні стратегічної екологічної оцінки та інших видів екологічних оцінок.

Література

1. Про цілі сталого розвитку України на період до 2023 року: Указ Президента України від 30 вер. 2019 р. № 722/2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>
2. Управління побутовими відходами / Міністерство розвитку громад та територій України. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sfera-komunalnykh-posluh/upravlinnia-pobutovomu-vidkhodamy> (дата звернення: 20.05.2025).
3. ДБН В.2.4-2-2005. Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування. Київ: Держбуд України, 2005. 100 с. (Державні будівельні норми України)
4. Правила технічної експлуатації полігонів, припинення експлуатації, рекультивації та догляду за полігонами після припинення їх експлуатації: Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 10 лют. 2025 р. № 263. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0405-25#Text> (дата звернення: 22.05.2025).
5. Порядок проведення моніторингу об'єкта оброблення відходів: Постанова КМУ від 7 листоп. 2023 р. № 1166. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1166-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення: 22.05.2025).
6. Порядок здійснення моніторингу місць утворення, зберігання та видалення відходів : Постанова КМУ від 13 травн. 2025 р. № 551. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/551-2025-%D0%BF#Text>. (дата звернення: 21.05.2025).
7. Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів: Закон України від 12 грудн. 2019 р. № 377-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20#Text> (дата звернення: 21.05.2025).
8. Updated Nationally Determined Contribution of Ukraine to the Paris Agreement. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Ukraine%20NDC_July%2031.pdf (дата звернення: 20.05.2025)
9. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/LEDS_ua_last.pdf дата звернення: 17.05.2025)
10. Про управління відходами : Закон України від 20 черв. 2022 р. № 2320-IX. URL: zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20 (дата звернення: 19.05.2025).<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-p>
11. Про схвалення Стратегії формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024-2026 роках : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травн. 2024 р. № 483-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2024-r#Text> (дата звернення: 20.05.2025)
12. Про основні засади державної кліматичної політики : Закон України від 30 жовт. 2024 р. № 3991-IX. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3991-20#Text> (дата звернення: 15.05.2025)
13. Siddiqua A., Hahladakis J. N., Al-Attia W. A. K. A. An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental science and pollution research international*. 2022. Vol. 29(39). P. 58514–58536. DOI: 10.1007/s11356-022-21578-z
14. Lee G. F., Jones-Lee A. Overview of Landfill Post-Closure Issues. *Waste Advantage Magazine*. 2014. Vol. 5(12) P. 24–26. URL: https://www.gfredlee.com/Landfills/Landfill_Postclosure_Issues_Overview.pdf (Last accessed: 21.05.2025).
15. Barlaz M. A., Rooker A. P., Kjeldsen P., Gabr M. A., Borden R.C. Critical Evaluation of Factors Required To Terminate the Postclosure Monitoring Period at Solid Waste Landfills. *Environmental Science & Technology*. 2002. Vol. 36 (16). P. 3457-3464. URL: DOI: 10.1021/es011245u
16. Residual Risk Assessment for the Municipal Solid Waste Landfills Source Category in Support of the 2019 Risk and Technology Review Proposed Rule. Regulations.gov : website. URL: <https://surl.li/hpihux> (Last accessed: 21.05.2025).
17. Fei X., Fang M., Wang, Y. Climate change affects land-disposed waste. *Nat. Clim. Chang*. 2021. Vol. 11. P. 1004–1005. DOI: 10.1038/s41558-021-01220-5
18. Zhang C., Xu T., Feng H., & Chen S. Greenhouse Gas Emissions from Landfills: A Review and Bibliometric Analysis. 2019. *Sustainability*. Vol.11(8). P. 2282. DOI: 10.3390/su11082282
19. Zhang C., Guo Y., Wang X., Chen S. Temporal and spatial variation of greenhouse gas emissions from a limited-controlled landfill site. *Environment International*. 2019. Vol. 127. P. 387-394 DOI: 10.1016/j.envint.2019.03.052
20. Manheim D.C., Yeşiller N., Hanson, J.L. Gas Emissions from Municipal Solid Waste Landfills: A comprehensive review and analysis of global data. *J Indian Inst Sci*. 2021. Vol. 101. P. 625–657. DOI: 10.1007/s41745-021-00234-4
21. Brand J. H., Spencer K. L. Potential pollution risks of historic landfills in England: Further analysis of climate change impacts. *WIREs Water*. 2024. Vol. 11(3). P. 1706. DOI: 10.1002/wat2.1706
22. Nicholls R.J., Beaven R.P., Stringfellow A., Monfort D., Le Cozannet G., Wahl T., Gebert J., Wadey M., Arns A., Spencer K. L., Reinhart D., Heimovaara T., Santos V. M., Enriquez A. R. Cope S. Coastal Landfills and Rising Sea Levels: A Challenge for the 21st Century. *Front. Mar. Sci*. 2021. Vol. 8. P. 710342. DOI: 10.3389/fmars.2021.710342
23. Platform for development of multi-national projects in education and research : website. URL: <https://kermitcooperation.wixsite.com/platform> (Last accessed: 17.05.2025).
24. Open-meteo : website. URL: <https://open-meteo.com/> (Last accessed: 13.05.2025).
25. Radomska M., Zeltina M. Design thinking to avoid maladaptation in building climate change resilience of urban areas. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2024. Vol. 15(2). P. 36-46. DOI: 10.69628/esbur/2.2024.36

ОЦІНКА ВПЛИВУ НАСЛІДКІВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ВРАЗЛИВІСТЬ ОСНОВНИХ ВОДОКОРИСТУВАЧІВ МІСТА

Гуреля І.В., Василенко О.В.

Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань
ivan.gurelya@ukr.net, vsolga05@gmail.com

У статті досліджено вплив кліматичних змін на водні ресурси міста Умань та вразливість основних водокористувачів (комунального господарства, промисловості, сільського господарства, населення). Актуальність роботи обумовлена глобальними тенденціями до дефіциту води, зростанням антропогенного навантаження та змінами гідрологічного режиму в Україні, яка займає 124-те місце у світі за забезпеченістю водними ресурсами.

Аналіз даних за 2015–2024 роки виявив стійку тенденцію до зменшення річної кількості опадів (на 13–16% нижче норми), що особливо помітно у літній період. Ці зміни призводять до зниження рівня підземних вод (зафіксовано падіння на 2 м за останні 5 років) та погіршення стану поверхневих водних об'єктів. Такі умови створюють серйозні виклики для всієї урбоєкосистеми міста, особливо для водопостачання.

Дані за останні п'ять років показують, що місто вже зараз відчуває наслідки цих змін. Наприклад, сільське господарство споживає на чверть менше води, ніж раніше, через посухи, а промислові підприємства скоротили використання води на третину через економічні фактори. При цьому комунальний сектор, хоча і зменшив обсяги водокористування, залишається під загрозою через старі труби та великі втрати води. Якщо ситуація не зміниться, у майбутньому місто може зіткнутися з ще більшими труднощами – від перебоїв у водопостачанні до економічних втрат.

Отримані дані підтверджують необхідність перегляду традиційних підходів до водокористування в умовах змін клімату. Дослідження підкреслює, що вже зараз потрібно вживати заходів, щоб адаптуватися до нових умов. Це включає модернізацію водогосподарської інфраструктури, запровадження ефективних методів збереження води та розумний розподіл ресурсів між різними секторами. Без таких кроків подальші кліматичні зміни можуть призвести до серйозної кризи, яка вплине на життя всіх мешканців міста. *Ключові слова:* водокористування, кліматичні зміни, вразливість, адаптація, урбанізовані території, водний дефіцит.

Assessment of climate change impacts on vulnerability of urban water users. Hurelya I., Vasylenko O.

The article examines the impact of climate change on water resources in the city of Uman and the vulnerability of its main water users (municipal services, industry, agriculture, and the population). The relevance of the study stems from global trends of water scarcity, increasing anthropogenic pressure, and changes in hydrological patterns in Ukraine, which ranks 124th in the world in terms of water availability.

Analysis of data from 2015–2024 revealed a steady decline in annual precipitation (13–16% below normal), particularly noticeable during summer. These changes have led to a drop in groundwater levels (a 2-meter decrease over the past five years) and deterioration of surface water bodies. Such conditions pose serious challenges for the city's urban ecosystem, especially for water supply.

Data from the past five years show that the city is already experiencing the consequences of these changes. For example, agricultural water use has decreased by a quarter due to droughts, while industrial enterprises have cut water consumption by a third due to economic factors. Meanwhile, the municipal sector, despite reducing water usage, remains at risk due to aging pipes and significant water losses. If the situation does not change, the city may face even greater difficulties in the future – from water supply disruptions to economic losses.

The findings highlight the need to revise traditional water management approaches in the context of climate change. The study emphasizes that immediate action is required to adapt to new conditions. This includes modernizing water infrastructure, implementing efficient water conservation methods, and smart resource allocation among different sectors. Without such measures, further climate change could lead to a severe crisis affecting all city residents. *Key words:* water use, climate change, vulnerability, adaptation, urban areas, water scarcity.

Постановка проблеми. Прогнозоване зростання населення, соціально-економічні зміни та вплив кліматичних змін призводять до значного тиску на водні ресурси у багатьох регіонах світу [1, 2]. Очікується, що дефіцит води посилюватиметься в найближчі десятиліття [3]. Оскільки вода є базовою потребою людини, забезпечення доступу до чистої питної води визначено одним із ключових завдань Цілей сталого розвитку, прийнятих ООН у 2015 році [4].

Значна частина міського населення світу досі не має належного доступу до водних ресурсів.

Згідно з дослідженнями [5], близько 1 мільярда людей не мають доступу до безпечної питної води, а 2,4 мільярда позбавлені базових санітарних умов.

За рівнем забезпеченості водними ресурсами Україна знаходиться в нижній частині рейтингів. Серед 20 європейських держав – лише 17-та позиція, а у глобальному масштабі (181 країна) – 124 місце (за даними 2014 року). На одного жителя України припадає в середньому 1 тис. м³ місцевого стоку [6]. Питне водопостачання в Україні на 80% забезпечується з поверхневих джерел, а в окремих регіонах

майже на 100% [7]. За результатами оцінки можливих змін водних ресурсів України в умовах глобального потепління клімату відмічається, що протягом ХХІ ст. в Україні буде спостерігатися зменшення водного стоку на 25–50% [8].

Актуальність дослідження. На сучасному етапі розвитку практично у всіх регіонах світу відзначається посилення деградації водних ресурсів, що проявляється у зниженні їх кількості та погіршенні якісних характеристик [9]. Основними драйверами цього процесу є, перш за все, кліматичні зміни (зміна режиму опадів, збільшення кількості екстремальних явищ) [10], а також певні антропогенні фактори: інтенсивне освоєння територій (зміни землекористування), демографічний тиск та забруднення водних об'єктів [11]. Така комплексна дія чинників створює загрозу для сталого водозабезпечення як нинішнього, так і майбутніх поколінь.

При аналізі впливу змін клімату на міські водні системи доступність водних ресурсів (опадів, поверхневих та підземних вод) виявляється ключовим обмежуючим фактором. Міста потребуватимуть значних адаптаційних заходів для підтримки надійного водопостачання та розподільчих мереж у умовах дедалі більш мінливих водних ресурсів.

Міські водогосподарські організації мають запроваджувати адаптивні підходи, що включають: використання ймовірнісних кліматичних сценаріїв замість детермінованих прогнозів, модульні інфраструктурні рішення з можливістю поступового вдосконалення, використання природоохоронних рішень на додаток до технічних споруд

Цей підхід суттєво відрізняється від адаптації в сільському господарстві, де можливі більш тривалі терміни адаптації та рослинні рішення. Міста потребують точної оцінки вразливостей та негайного впровадження захисних заходів для захисту щільної популяції та економічних активів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дані дослідження проводились в рамках загальних наукових досліджень на тему: «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування» (державний номер реєстрації – 0108U009772) Уманського національного університету.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вітчизняними [12–14] та іноземними [15, 16] науковцями проаналізовано сучасні дослідження, пов'язані з оцінкою впливу кліматичних змін на вразливість водокористувачів у міських умовах. Дослідження [17, 18] підкреслюють, що зміни клімату призводять до змін у режимі опадів (збільшення інтенсивності дощів та тривалих періодів посухи), зниження якості води через забруднення під час паводків і надмірне випаровування, деградації водних екосистем, що впливає на доступність ресурсів. У містах це призводить до напруженості у водопостачанні, особливо в регіонах із високою урбанізацією [19].

Звіт Міжурядової групи експертів зі зміни клімату [17] узагальнює взаємозв'язки між кліматичними змінами та водними ресурсами через фізичні компоненти гідрологічного циклу та глобальні ефекти, проте не розглядає міські водогосподарські системи детально. Аналогічно, проект ADAPT [20] досліджував адаптацію у регіональному управлінні водними ресурсами в семи типових водозборах світу, але зосереджувався переважно на поверхневих водах та їх впливі на сільське господарство, продовольчу безпеку та енергетику; ризиках повеней та проблемах ґрунтових вод, без акценту на міському середовищі.

Таким чином, існує нагальна потреба в цілеспрямованому аналізі сектору водопостачання в урбанізованих територіях та впливу на нього змін клімату.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Вперше системно досліджується взаємодія двох критичних факторів – кліматичних змін (зокрема аридизації) та структурної трансформації водокористування у контексті середнього міста України.

Новизна. Новизна даної наукової статті полягає в комплексному аналізі взаємозв'язку між динамікою кліматичних змін (зокрема, зменшенням опадів та зростанням посушливих періодів) та структурою водокористування в умовах урбоєкосистеми м. Умань, що вперше дозволило кількісно оцінити рівень вразливості окремих секторів економіки міста (комунального, промислового, сільськогосподарського) та розробити ієрархію адаптаційних пріоритетів, з урахуванням як кліматичних, так і соціально-економічних факторів, що відкриває нові можливості для прийняття управлінських рішень у сфері сталого водокористування.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення даного дослідження полягає в тому, що воно інтегрує методи кліматології, екології та соціально-економічного аналізу, що дозволяє розширити можливості комплексного вивчення проблем водокористування в умовах змін клімату. Запропонована методика може бути адаптована для інших регіонів з подібними кліматичними умовами. Крім того, проведено наукову оцінку взаємозв'язку між кліматичними факторами та споживанням води різними секторами економіки урбоєкосистеми та розроблено критерії вразливості відповідних водокористувачів. Результати дослідження можуть бути використані як основа для подальших досліджень з кліматичної адаптації урбоєкосистем.

Викладення основного матеріалу. Умови формування водних ресурсів будь-якого регіону значною мірою залежать від кількісних і якісних характеристик атмосферних опадів. Для Уманського району, що розташований у центральній частині України, аналіз багаторічної динаміки опадів є особливо актуальним через зростаючу частоту кліматичних аномалій. Останнє десятиліття спостерігається тенденція до зміни режиму зволоження, що безпосередньо впли-

ває на водний баланс території та стан водних екосистем.

Наведені на рисунку 1 дані відображають річні суми опадів за період 2015–2024 років, отримані від місцевих спостережень Уманської гідрометеорологічної станції. Аналіз цих показників дозволяє виявити ключові тенденції: зниження середньорічної кількості опадів та збільшення частоти посушливих періодів.



Рис. 1. Динаміка річної кількості опадів в м. Умань (2015–2024 рр.)

Отже, можна зробити висновок, що зберігається загальна тенденція до зменшення опадів: у 2020, 2023 та 2024 роках спостерігалися рекордні мінімуми (466–448 мм), що на 13–16% нижче норми. Період 2017–2024 рр. має переважно негативне відхилення, що підтверджує тенденцію до посухи. Літні місяці стають більш посушливими, що впливає на водний баланс річок (наприклад, Уманка) та ґрунтові води. Весняні опади часто носять екстремальний характер (зливи 2016 року), що не компенсує літній дефіцит.

Тому вивчення динаміки опадів має важливе практичне значення для розробки адаптаційних заходів у сфері водокористування, сільського господарства та екологічного менеджменту. Отримані результати свідчать про необхідність врахування кліматичних змін при плануванні водогосподарської діяльно-

сті в регіоні, зокрема для прогнозування можливих дефіцитів водних ресурсів у майбутньому.

У зв'язку з описаною вище зміною кліматичних умов та зростанням антропогенного навантаження на водні ресурси аналіз водоспоживання стає критично важливим для розробки стратегій сталого водокористування. Місто Умань, розташоване в центральній частині України (Черкаська область), є репрезентативним прикладом регіону, де спостерігається поєднання таких чинників, як знос інфраструктури водопостачання, скорочення промислового виробництва, збільшення частоти посушливих періодів.

Останні п'ять років у місті Умань спостерігається суттєва динаміка у споживанні водних ресурсів, що обумовлено комплексом соціально-економічних, технологічних та кліматичних факторів. Зменшення обсягів водокористування пов'язане, перш за все, із скороченням промислового виробництва. Одночасно значний вплив мають демографічні зміни, зростання тарифів на воду та зміни у поведінці споживачів, спрямовані на економію ресурсів.

Важливу роль у зниженні водоспоживання відіграють і кліматичні умови, зокрема посухи останніх років, які призвели до обмеження використання води для зрошення в сільському господарстві. Крім того, зношеність водорозподільних мереж сприяє втратам води, що також впливає на загальну статистику. Аналіз динаміки водокористування дозволяє виявити ключові тенденції, зокрема перерозподіл споживання між секторами та ефективність заходів щодо раціонального використання водних ресурсів.

Наведені в таблиці 1 дані відображають зміни у споживанні води за основними категоріями водокористувачів – комунальним господарством, промисловістю, сільським господарством та населенням. Ця інформація є важливою для розробки стратегій сталого водокористування, оцінки ефективності існуючих програм з водозбереження та прогнозування майбутнього попиту на водні ресурси в умовах зростаючого дефіциту та кліматичних змін.

Загальне зменшення споживання на 21% за 5 років пов'язане зі скороченням промислового виробництва (найбільший спад – 33%), втратами води в зношених

Таблиця 1

Споживання водних ресурсів у місті Умань (середні значення за 2020–2024 рр.)

Категорія водокористувачів	Об'єм споживання, тис. м³/рік			Зміна за роки, %	Причини змін
	2020 рік	2022 рік	2024 рік		
Комунальне господарство	2,500	2,300	2,100	зменшення на 16%	економія через тарифні зміни, втрати в мережах
Промисловість	1,800	1,600	1,200	зменшення на 33%	скорочення виробництва
Сільське господарство	1,200	1,100	900	зменшення на 25%	посухи, перехід на крапельне зрошення
Населення (побутове водоспоживання)	1,700	1,650	1,500	зменшення на 12%	зменшення чисельності населення, економія
Загалом	7,200	6,650	5,700	зменшення на 21%	комплекс факторів

мережах комунального сектору та кліматичними умовами для сільського господарства(посухи). Крім того, комунальний сектор залишається основним споживачем, але його частка зменшується через неефективність інфраструктури.

Сучасні зміни клімату, що характеризуються підвищенням середньорічних температур, зростанням частоти та інтенсивності посушливих періодів та зміною режиму атмосферних опадів, становлять серйозну загрозу для стабільності водних ресурсів міста Умань. Урбоєкосистема міста, що включає комунальну інфраструктуру, промисловість, сільське господарство та житлові райони, демонструє різний рівень вразливості до цих змін.

Аналіз вразливості основних водокористувачів дозволяє виявити критичні точки системи водопостачання міста та розробити адаптаційні стратегії. Найбільш чутливими до кліматичних змін є сільськогосподарський сектор, який залежить від зрошення, та комунальне господарство, що стикається із зростанням втрат води через старіння інфраструктури. Промисловість, у свою чергу, вразлива через необхідність технологічного охолодження та обмеження водозабору в періоди маловоддя. Наведена таблиця 2 систематизує рівні вразливості різних секторів економіки міста, що дозволить органам місцевого самоврядування та водогосподарським організаціям пріоритизувати заходи щодо адаптації до кліматичних змін.

Аналіз даних таблиці підтверджує, що основні водокористувачі м. Умань демонструють різний рівень вразливості до кліматичних змін, причому найбільш критичними є сільськогосподарський та комунальний сектори, які вже зазнають негативного впливу посух та зростання температур. Особливу стурбованість викликає зниження рівня підземних вод. За даними щомісячного моніторингу Регіонального офісу водних ресурсів у Черкаській області, середній рівень

підземних вод у криницях за період 2020–2024 років знизився приблизно на 0,4 м щорічно, що становить близько 2 м загального падіння за п'ять років.

Отримані результати свідчать про необхідність термінового впровадження адаптаційних заходів, таких як модернізація інфраструктури водопостачання, запровадження водозберігаючих технологій та розробка стратегій раціонального водокористування, що дозволить зменшити ризики для міської екосистеми в умовах прогнозованого посилення кліматичних змін у регіоні.

Головні висновки. Проведене дослідження чітко демонструє, що Уманський регіон переживає суттєві зміни у водному балансі, спричинені кліматичними змінами. Аналіз даних за 2015–2024 роки виявив стійку тенденцію до зменшення річної кількості опадів (на 13–16% нижче норми), що особливо помітно у літній період. Ці зміни призводять до зниження рівня підземних вод (зафіксовано падіння на 2 м за останні 5 років) та погіршення стану поверхневих водних об'єктів. Такі умови створюють серйозні виклики для всієї урбоєкосистеми міста, особливо для водопостачання та сільського господарства.

Дані про споживання водних ресурсів за 2020–2024 роки свідчать про суттєву трансформацію структури водокористування. Найбільш значне зменшення спостерігається у промисловому (33%) та сільськогосподарському (25%) секторах, що обумовлено як економічними факторами, так і кліматичними обмеженнями. Комунальний сектор, незважаючи на зниження обсягів на 16%, залишається основним споживачем, що підкреслює його вразливість у зв'язку зі старінням інфраструктури та зростанням втрат води. Отримані дані підтверджують необхідність перегляду традиційних підходів до водокористування в умовах змін клімату. Результати дослідження вказують на критичну потребу в розробці та впровадженні комплексних адаптаційних заходів.

Таблиця 2

Аналіз ймовірної вразливості основних водокористувачів м. Умань залежно від змін клімату

Категорія водокористувача	Характер водо-користування	Потенційні кліматичні загрози	Ймовірна вразливість	Потенційні наслідки
Комунальні служби (водо- постачання)	Водозбір підземних і поверхневих вод	Зниження рівня водоносних горизонтів, посухи	Висока	Ризик дефіциту питної води влітку, зниження якості води
Промислові підприємства	Технічне водо-постачання	Нестабільність стоку, перегрів води, зниження дебіту річок	Середня	Порушення технологічних процесів, потреба у модернізації
Аграрний сектор (околиця міста)	Зрошення, технічні потреби	Тривалі посухи, зменшення доступності води для поливу	Висока	Нестабільність врожаїв, збільшення витрат на полив
Туристично-рекреаційна сфера	Естетична якість вод, рекреація	Цвітіння водоростей, забруднення, обміління ставків	Середня	Зниження привабливості об'єктів (ДП «Софіївка» тощо)
Побутові споживачі (населення)	Питне водо-постачання, господарські потреби	Переванта-ження систем, посухи, забруднення	Середня	Соціальна напруга, обмеження споживання

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані дані можуть бути використані для розробки адаптаційних стратегій – модернізації водогосподарської інфраструктури та запровадження водозберігаючих технологій у кому-

нальному, промисловому та сільськогосподарському секторах. А також, для планування водокористування – прогнозування дефіциту водних ресурсів та оптимізації їх розподілу в умовах кліматичних змін.

Література

1. Wada Y., van Beek L. P. H., Wanders N., Bierkens M. F. P. Human water consumption intensifies hydrological drought worldwide. *Environ. Res. Lett.*, 2013. 8. P. 1–14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/034036>.
2. Schewe J. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2014. USA111. P. 3245–3250. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222460110>
3. Gosling S.N., Arnell N.W. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 2016. 134. P. 371. <https://doi.org/10.1007/s10584013-0853-x>.
4. UN-GA. United Nations Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations General Assembly. New York, NY, 2015.
5. Parry Martin, Nigel Arnell, Pam Berry, David Dodman, Samuel Fankhauser. Assessing the Costs of Adaption to Climate Change: A Review of the UNFCCC and Other Recent Estimates. Martin Parry. London: International institute for environment and development (IIED), 2009.
6. Інформаційно-аналітична довідка про стан водних ресурсів держави та особливості сільськогосподарського виробництва в умовах змін клімату. URL: <http://naas.gov.ua/upload/iblock/78a/> (дата звернення: 01.05.2025).
7. Аналіз актуальних чинників погіршення якості питного водопостачання в контексті національної безпеки України. Аналітична записка. URL: <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/analiz-aktualnikh-chinnikiv-pogirshennya-yakosti-pitnogo> (дата звернення: 04.05.2025).
8. Сніжко С. Оцінка можливих змін водних ресурсів місцевого стоку в Україні в XXI столітті. *Водне господарство України*, 2012. № 6 (102). С. 8–16.
9. Case T. Climate change and infrastructure issues. AWWA Research Foundation. Drinking Water Research. *Climate Change Special Issue*, 2008. 18. P. 15–17.
10. Kundzewicz Z. W., Krysanova V., Benestad R. E., Hov O., Piniewski M., Otto I. M. Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environ. Sci. Policy*, 2018. 79 (Jan). P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008>.
11. Mirdashtvan M., Najafinejad A., Malekian A., Sa'doddin A.. Sustainable water supply and demand management in semi-arid regions: Optimizing water resources allocation based on RCPs scenarios. *Water Resour. Manage.*, 2021. 35 (15). P. 5307–5324. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-03004-0>.
12. Хільчевський В. К. Характеристика водних ресурсів України на основі бази даних глобальної інформаційної системи FAO Aquastat. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2021. №1(59). С. 6–16.
13. Ромащенко М. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво. *Меліорація і водне господарство*, 2020. 1. С. 5–22.
14. Гребінь В. В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с.
15. Bonelli S., Vicuna S., Meza F. J., Gironás J., Barton J.. Incorporating climate change adaptation strategies in urban water supply planning: The case of central Chile. *J. Water Clim. Change*, 2014. 5 (3). P. 357–376. <https://doi.org/10.2166/wcc.2014.037>.
16. Stagge J. H., Moglen G. E. Water resources adaptation to climate and demand change in the Potomac River. *J. Hydrol. Eng.*, 2017. 22 (11). P. 4017–4050. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001579](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001579).
17. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/> (дата звернення: 24.04.2025).
18. UN World Water Development Report 2023. URL: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2023> (дата звернення: 23.04.2025).
19. Azhoni A., Jude S., Holman I. Adapting to climate change by water management organisations: Enablers and barriers. *J. Hydrol.*, 2018. 559 (Apr). P. 736–748. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.047>.
20. Aerts J. C., Droogers J. H. P. Climate Change in Contrasting River Basins: Adaptation Strategies for Water, Food and Environment. Oxfordshire, UK: Commonwealth Agricultural Bureaux (CAB) International Press., 2004.

РЕАЛІЗАЦІЯ ОСНОВНИХ ЗАСАД КОНЦЕПЦІЇ ОЗЕЛЕНЕННЯ МІСТА ЧЕРНІГОВА В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ

Карпенко Ю.О., Аравін П.А., Свердлов В.О., Потоцька С.О.

Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка

вул. Гетьмана Полуботка, 53, м. Чернігів, 14013

yuch2011@i.ua, rv.pasha@gmail.com, vovasv8989@ukr.net, s_pototska@ukr.net

У роботі досліджуються теоретичні та практичні засади реалізації концепції озеленення міста Чернігова в умовах кліматичних змін. З огляду на зростання середньорічних температур, збільшення кількості екстремальних погодних явищ, зниження рівня атмосферних опадів та посилення ризиків деградації міського середовища, питання озеленення набуває особливої актуальності. Проведено оцінку поточного стану зеленої інфраструктури міста, визначено найбільш уразливі ділянки, види рослин та угруповання, які не потерпають від сучасних екологічних викликів.

Акцентовано увагу на необхідності перегляду підходів до проектування та догляду за зеленими зонами з урахуванням кліматичних ризиків. Проаналізовано кращі практики адаптивного озеленення та можливості їх імплементації в локальний контекст. Запропоновано оновлену модель озеленення міста, що передбачає використання аборигенних та інтродукованих видів, стійких до посухи, температурних коливань і міського забруднення. Також розглядається важливість інтеграції зелених просторів у загальну систему міського планування як чинників підвищення якості життя населення, покращення мікроклімату та зниження ефекту теплових впливів.

Стаття формулює практичні рекомендації для органів місцевого самоврядування, ландшафтних архітекторів та екологів щодо вдосконалення підходів до формування сталого міського ландшафту в умовах кліматичної нестабільності та температурних коливань. Запропоновані заходи можуть бути використані як основа для розробки локальних стратегій адаптації та екологічного розвитку Чернігова. Реалізація таких підходів дозволить не лише підвищити адаптаційну здатність міста Чернігова до кліматичних змін, а й створити передумови для сталого розвитку урбанізованого середовища в довгостроковій перспективі. *Ключові слова:* озеленення, кліматичні зміни, місто Чернігів, зелені зони, адаптація, кліматичні насадження, сталий розвиток, урбаністичне середовище, екосистемні послуги.

Implementation of the basic principles of the greening concept of the city of Chernihiv in the conditions of climate change.
Karpenko Yu., Aravin P., Sverdlov V., Pototska S.

The paper explores the theoretical and practical principles of implementing the concept of greening the city of Chernihiv in the context of climate change. Given the increase in average annual temperatures, the increase in the number of extreme weather events, the decrease in the level of atmospheric precipitation and the increase in the risks of degradation of the urban environment, the issue of greening is becoming particularly relevant. An assessment of the current state of the city's green infrastructure was carried out, the most vulnerable areas, plant species and groups that do not suffer from modern environmental challenges were identified.

The emphasis is on the need to review approaches to the design and care of green areas taking into account climate risks. The best practices of adaptive greening and the possibilities of their implementation in the local context are analyzed. An updated model of greening the city is proposed, which involves the use of native and introduced species that are resistant to drought, temperature fluctuations and urban pollution. The importance of integrating green spaces into the general urban planning system as factors of improving the quality of life of the population, improving the microclimate and reducing the effect of thermal influences is also considered.

The article formulates practical recommendations for local governments, landscape architects and ecologists on improving approaches to the formation of a sustainable urban landscape in conditions of climatic instability and temperature fluctuations. The proposed measures can be used as a basis for developing local adaptation strategies and ecological development of Chernihiv. The implementation of such approaches will not only increase the adaptive capacity of the city of Chernihiv to climate change, but also create the prerequisites for the sustainable development of the urban environment in the long term. *Key words:* greening, climate change, the city of Chernihiv, green zones, adaptation, climate plantations, sustainable development, urban environment, ecosystem services.

Постановка проблеми. Сучасні міста дедалі частіше стикаються з негативними наслідками глобальної зміни клімату, серед яких – підвищення середньодобових температур, зростання частоти екстремальних погодних явищ, посухи, а також підвищення рівня забруднення повітря та зниження якості міського середовища. Ці явища особливо критично впливають на території з високою щільністю забудови, обмеженими площами зелених зон та недостатньо розвиненою системою екологічного планування.

Озеленення міського простору визнано одним із найефективніших способів адаптації до зміни клі-

мату та підвищення стійкості міського середовища. Зелені насадження не лише покращують мікроклімат, але й виконують низку важливих екосистемних функцій таких як: зменшують ефект «міського теплового острова», фільтрують та очищають повітря, сприяють регуляції водного режиму, підвищують естетичну привабливість та рекреаційну цінність територій [15].

Водночас впровадження ефективної системи озеленення потребує стратегічного підходу, з урахуванням локальних кліматичних, географічних та соціально-економічних умов. У цьому контексті розробка та

реалізація Концепції озеленення міста Чернігова на 2021 – 2025 роки була спробою системно вирішити питання збереження та розвитку зеленої інфраструктури [4]. Проте виникає низка проблем, пов'язаних з її реалізацією, зокрема: недостатнє фінансування, фрагментарність реалізації заходів, потреба в оновленні нормативної бази та необхідність залучення громадськості до прийняття рішень.

Актуальність дослідження. У контексті посилення кліматичних змін, які дедалі інтенсивніше впливають на міське середовище, зростає потреба у переосмисленні підходів до просторового планування, управління зеленими зонами та формування екологічно стійкої міської інфраструктури. Українські міста, зокрема Чернігів, зіштовхуються з такими викликами, як зростання літніх температур, часті опади та локальні підтоплення, зменшення площ зелених насаджень, що вимагає ряду заходів із адаптації до нових кліматичних умов.

У цьому контексті озеленення постає не лише як інструмент благоустрою, а як важливий засіб пом'якшення наслідків зміни клімату та підвищення якості життя міського населення. Концепція озеленення м. Чернігова на 2021 – 2025 роки є першою цілісною спробою систематизувати підходи до формування зеленої інфраструктури міста з урахуванням сучасних екологічних викликів. Проте її реалізація потребує постійного наукового супроводу, обґрунтування ефективності обраних рішень, а також аналізу практичних результатів та наявних проблем [16].

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю оцінити, наскільки впроваджені в Чернігові підходи до озеленення відповідають завданням адаптації до зміни клімату, якими є їхні сильні сторони та обмеження, а також які управлінські, фінансові й технічні аспекти потребують доопрацювання. Окрім того, досвід Чернігова може бути репрезентативним для інших українських міст, що перебувають у подібних кліматичних та соціальних умовах.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Наукове осмислення проблеми адаптації міського середовища до змін клімату є пріоритетним напрямом сучасної міждисциплінарної прикладної екологічної науки. Особливої актуальності набуває вивчення ролі зеленої інфраструктури в процесах забезпечення екологічної рівноваги, підтримання комфортного мікроклімату, зменшення вразливості до кліматичних стресів, а також збереження природного та інтродукованого фіторізноманіття в межах урбанізованих територій. У цьому контексті авторське дослідження відповідає сучасним науковим завданням, які стосуються:

- аналізу ефективності локальних екологічних політик;
- впровадження природоорієнтованих рішень у міське середовище;

- удосконалення стратегій адаптації міст до глобальних змін;

- дослідження просторових трансформацій та формування стійких міських ландшафтів з відповідними кліматотолерантними і адаптованими видами.

На практичному рівні авторський доробок спрямовано на підтримку процесів прийняття управлінських рішень у сфері озеленення міських територій. Враховуючи, що Концепція озеленення м. Чернігова є одним із перших, системно сформованих документів такого рівня у середньому місті України, її реалізація супроводжується низкою труднощів, пов'язаних із ресурсними обмеженнями, недосконалістю інституційних механізмів, відсутністю належного моніторингу та зворотного зв'язку.

Проведене авторське дослідження дозволяє:

- виявити типові бар'єри впровадження стратегій озеленення на місцевому рівні;
- запропонувати напрями оптимізації зелених зон і насаджень з урахуванням зміни клімату;
- забезпечити зворотній зв'язок між теоретичними моделями управління зеленими зонами та реальною практикою;
- створити основу для формування локальних кліматичних стратегій, які інтегрують озеленення як один із ключових інструментів поліпшення негативних наслідків.

Окрім того, врахування аспектів залучення громадськості, децентралізації управління та використання цифрових технологій в управлінні зеленими насадженнями (зокрема створення електронних кадастрів дерев та паркових зон) відображає відповідність дослідження світовим практикам сталого міського розвитку.

Таким чином, авторський внесок полягає у поєднанні міждисциплінарного аналізу теоретичних засад урбаністичного озеленення з оцінкою локального досвіду м. Чернігова. Це дозволяє не лише критично переосмислити наявні підходи до управління зеленим парканом та зеленими зонами, а й запропонувати дієві рішення для їх удосконалення, що має значущість як на місцевому, так і на загальноукраїнському рівні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика озеленення міських територій в умовах зміни клімату є предметом численних міждисциплінарних досліджень у галузях урбаністики, екології, географії, ландшафтно-архітектури та публічного управління. Останніми роками спостерігається зростання наукової уваги до природоорієнтованих рішень (nature-based solutions), які розглядаються як один із ключових механізмів адаптації міст до кліматичних викликів. Зокрема, у працях М. Шепелюка, В. Андреєва, В. Кучерявого та інших вітчизняних дослідників наголошується на необхідності інтеграції екологічної компоненти у стратегічне планування розвитку міст [15, 5].

У публікаціях міжнародного рівня, зокрема авторів таких як Tzoulas, Kabisch, Cohen-Shacham [16],

окреслюються функціональні переваги зеленої інфраструктури, включаючи здатність знижувати температуру повітря, поглинати вуглекислий газ, зменшувати поверхневий стік, а також формувати сталі міські екосистеми. Дослідження Європейського агентства з навколишнього середовища (EEA, 2022) підкреслюють роль локального озеленення в досягненні кліматичних цілей, визначених Європейським зеленим курсом.

Щодо українського контексту, актуальними є аналітичні звіти екологічних організацій, зокрема ГО «Екодія», WWF-Україна, Ecorolitic, які надають практичні рекомендації щодо адаптації міст до змін клімату, з особливим акцентом на роль озеленення та водорегулюючих рішень. Праці О. Шевченка, І. Трофимова, Д. Бідолаш порушують питання організації зелених зон в урбанізованих умовах, оптимізації посадкового матеріалу та догляду за насадженнями в контексті змін клімату [1,13,14].

У той же час, попри наявність загальнотеоретичних досліджень, кількість публікацій, присвячених аналізу реалізації конкретних муніципальних стратегій озеленення на прикладі українських міст, зокрема Чернігова, залишається обмеженою. Недостатньо вивченими залишаються питання ефективності виконання стратегічних документів, інтеграції природоорієнтованих рішень у міську політику та оцінки їхнього впливу на кліматичну стійкість локального середовища.

Таким чином, актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю доповнення наукового доробку емпіричними матеріалами щодо реалізації озеленювальних ініціатив у конкретному місті України, що дозволить розширити уявлення про дієвість існуючих підходів та сприятиме розробці більш ефективних моделей міського озеленення в умовах зміни клімату.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність ґрунтовних наукових досліджень, присвячених ролі зеленої інфраструктури в підвищенні кліматичної стійкості міст, а також загальним теоретичним підходам до озеленення урбанізованих територій, низка важливих аспектів залишаються недостатньо опрацьованими. Зокрема, науковий інтерес переважно зосереджується на мегаполісах або столичних регіонах, тоді як середні міста України, до яких належить Чернігів, рідко виступають об'єктом цілісного аналізу в контексті реалізації стратегічних екологічних документів [4].

Однією з невирішених проблем є відсутність системного моніторингу та наукового супроводу реалізації концепцій озеленення на муніципальному рівні. Брак актуалізованих даних щодо стану зелених насаджень, змін у структурі міських екосистем, соціального сприйняття озеленювальних заходів з боку мешканців ускладнює оцінку ефективності впроваджуваної політики [8].

Окрім того, малодослідженим залишається питання відповідності цільових заходів, визначених у стратегічних документах, реальним кліматичним загрозам, характерним саме для регіону Полісся, і насамперед Лівобережжю. Відсутність глибокої локалізованої оцінки адаптаційного потенціалу міських зелених зон Чернігова в умовах зростання температур, зміни режиму опадів та збільшення частоти екстремальних погодних явищ створює розрив між стратегічним плануванням та практичною реалізацією завдань екологічної безпеки.

Таким чином, у межах даної статті особлива увага приділяється:

- аналізу ступеня реалізації положень «Концепції озеленення м. Чернігова на 2021 – 2025 роки»;
- виявленню факторів, які уповільнюють впровадження природоорієнтованих рішень у практику міського озеленення;
- оцінці відповідності запланованих заходів екологічним і кліматичним умовам регіону;
- формуванню рекомендацій щодо підвищення ефективності реалізації політики озеленення на рівні місцевого самоврядування з урахуванням принципів адаптації до змін клімату.

Новизна. На основі комплексного, міждисциплінарного підходу до оцінки реалізації стратегії міського озеленення у м. Чернігові в умовах зміни клімату, що поєднує урбаністичний, екологічний, кліматологічний та управлінський аспекти, наведено характеристику сучасного стану зелених насаджень у межах міської зеленої зони.

Уперше в науковій практиці:

- здійснено цілісний аналіз процесу реалізації «Концепції озеленення м. Чернігова на 2021–2025 роки» крізь призму її відповідності викликам сучасної кліматичної трансформації, характерної для північного регіону України;
- охарактеризовано рівень адаптивності запланованих заходів озеленення до проявів зміни клімату – підвищення середньорічної температури, посухи, зменшення тривалості снігового покриву, нерівномірного розподілу опадів, зниження повітряної вологості;
- розроблено концептуальну модель взаємозв'язку між кліматичними ризиками, функціональним станом зелених насаджень міста та ефективністю реалізації управлінських рішень;
- виокремлено організаційні та інституційні бар'єри впровадження природоорієнтованих рішень на рівні органів місцевого самоврядування, зокрема – нестачу фахових кадрів, відсутність сучасного обліку зелених насаджень, недостатнє громадське залучення та фінансування;
- сформульовано індикативно-критеріальну базу для оцінки ефективності реалізації заходів з озеленення, а також урахування екосистемного підходу та кліматичної стійкості видів озеленення;

- запропоновано практичні рекомендації для оновлення стратегії озеленення Чернігова з урахуванням сценаріїв зміни клімату, включаючи оновлення видового та культивованого складу насаджень, створення кліматично адаптивних мікрозелених зон, використання цифрових інструментів для моніторингу зелених ресурсів [6].

Таким чином, дослідження розширює наукове уявлення про локальні стратегії озеленення як складову частину адаптації міських екосистем до змін клімату. Воно також закладає підґрунтя для створення типових моделей оцінки та оновлення стратегічних документів озеленення у середніх містах України, з урахуванням реалій кліматичної вразливості, бюджетних обмежень та необхідності сталого розвитку міського середовища.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Методологічне значення проведеного дослідження полягає у розробці, адаптації та апробації підходів до оцінювання ефективності реалізації місцевих стратегій озеленення в умовах зростаючих кліматичних загроз.

У роботі запропоновано комплексну дослідницьку модель, що поєднує просторово-територіальний, екологічний, кліматологічний, соціально-управлінський і нормативно-правовий аналізи, яка може бути застосована для дослідження подібних процесів в інших містах України та Східної Європи.

До основних методологічних здобутків дослідження належать:

- застосування міждисциплінарного підходу для аналізу політики міського озеленення в контексті глобальних змін клімату;
- поєднання кількісних та якісних методів – картографування зелених зон, контент-аналізу стратегічних документів, аналізу статистичних і метеорологічних даних, експертного оцінювання;
- інтеграція принципів сталого розвитку, екосистемного підходу, теорії соціо-екологічної резильєнтності та концепції Nature-Based Solutions як методологічної основи для оцінки адаптаційного потенціалу зеленої інфраструктури міста;
- апробація моделі оцінки відповідності локальних озеленувальних програм умовам регіонального клімату (на прикладі Чернігова) та формування адаптаційних рекомендацій на основі виявлених розривів між плануванням і реалізацією [13,14].

Загальнонаукове значення дослідження полягає в актуалізації та розвитку наукової дискусії щодо ролі зеленої інфраструктури в підвищенні кліматичної стійкості міського середовища. Робота сприяє:

- розширенню уявлень про трансформацію функцій зелених насаджень – від декоративно-рекреаційної до регуляторно-кліматичної;
- обґрунтуванню необхідності інтеграції озеленення в системи управління кліматичними ризиками на локальному рівні;

- посиленню науково-методичної бази для розробки регіональних стратегій екологічної трансформації урбанізованих територій;

- формуванню нового підходу до оцінювання ефективності муніципальних екологічних політик у пострадянських містах, що балансують між обмеженими ресурсами, високою екологічною вразливістю та вимогами до сталого розвитку [7].

Таким чином, результати дослідження мають значення не лише для практики місцевого самоврядування, екологічного планування та містобудування, а й для розвитку фундаментальних засад кліматичної урбоєкології, прикладної дендрології, публічного управління та адаптаційного менеджменту.

Викладення основного матеріалу. Урбаністичне озеленення є важливою складовою сталого розвитку міських територій, оскільки воно не лише покращує естетичний вигляд міста, а й виконує численні екологічні функції. Згідно з дослідженнями, зелені насадження в містах сприяють зниженню рівня забруднення повітря, зменшенню ефекту «міського теплового острова», покращенню мікроклімату та якості життя мешканців. В умовах зміни клімату ці функції стають ще більш актуальними, оскільки міста стикаються з новими викликами, такими як підвищення температури, зміна режиму опадів та збільшення частоти екстремальних погодних явищ [11].

У 2021 році Чернігівська міська рада (рішенням 10 сесії 8 квітня від 26 серпня 2021 року) затвердила «Концепцію озеленення міста Чернігова на 2021–2025 роки» [4], яка передбачає створення ефективної та екологічно збалансованої зеленої інфраструктури. Документ орієнтований на збереження існуючих зелених зон, їхню реконструкцію, створення нових насаджень, формування сприятливого міського мікроклімату та підвищення екологічної безпеки. Попри задекларовані цілі, хід реалізації концепції потребує критичного аналізу з урахуванням соціально-економічних, кліматичних і адміністративних умов.

Інституційно-організаційні аспекти реалізації

Виконання заходів Концепції покладено на профільні підрозділи Чернігівської міської ради, комунальні підприємства (зокрема КП «Зеленбуд»), а також залучені приватні компанії. У 2021–2023 рр. реалізовано низку ініціатив: часткова інвентаризація зелених насаджень (в основному в центральній частині міста); реконструкція скверів і парків («Сквер ім. Богдана Хмельницького», «Сквер Магдебурського права»); реалізація проєктів з озеленення новобудов і транспортних артерій; висадка молодих дерев і кущів уздовж магістралей та в мікрорайонах. У період 2021–2025 рр. було проведено ряд досліджень науковцями Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка у напрямку систематизованій відомостей з дендрофлори, екосистемних послуг та зеленої інфраструктури [9, 3,16].

Проте відсутність єдиного центру управління зеленими зонами, а також недостатня міжвідомча координація призводять до дублювання функцій або їх часткової реалізації. За оцінками незалежних експертів, облік насаджень ведеться фрагментарно, часто в ручному режимі, без використання цифрових картографічних сервісів, та без відповідного фінансового забезпечення.

Економічні та фінансові обмеження

Реалізація концепції стикається з хронічним недофінансуванням. Через обмеження міського бюджету та значне зростання вартості матеріалів після 2022 року (з урахуванням впливу повномасштабного вторгнення РФ та воєнного стану), обсяг фінансування озеленення зменшився. Значна частина коштів перенаправляється на критичні інфраструктурні потреби, оборону, соціальну підтримку [9].

У 2022–2023 рр. зменшилась кількість нових висаджень, що зумовлено як фінансовими обмеженнями воєнного стану, так і складністю логістики. Водночас не передбачено чіткого механізму залучення позабюджетних коштів (грантів, державно-приватного партнерства), що обмежує потенціал розвитку галузі.

Кліматичні фактори

У контексті кліматичних змін місто Чернігів опинився серед регіонів, що відчувають зростаючий дефіцит вологи у весняно-літній період. За даними Укргідрометцентру, за останні 5 років середньорічна температура зросла на 1,1–1,3 °C, при цьому фіксується скорочення тривалості снігового покриву, збільшення днів з температурою вище +30 °C, а також зменшення середньорічної кількості опадів на 8–12%. Ці зміни негативно впливають на стан зелених насаджень: приживлюваність молодих саджанців знижується, особливо у прибудинкових територіях без поливу; традиційні види дерев (липа, клен, тополя) демонструють ознаки стресу – передчасне опадання листя, загнивання коренів, засихання верхівок; збільшується захворюваність дерев (зокрема на бактеріоз, вплив комах-шкідників), що не враховано в системі догляду [3, 12].

У Концепції озеленення, хоча й декларовано потребу адаптації до кліматичних умов, відсутні конкретні індикатори або механізми оцінки стійкості насаджень до екстремальних погодних умов. Висадка нових дерев часто відбувається без попередньої фітосанітарної оцінки чи перевірки кліматичної відповідності.

Просторовий дисбаланс та доступність зелених зон

Виявлено суттєві просторові дисбаланси в розподілі зелених насаджень. У центральній частині міста спостерігається надлишок озеленення у порівнянні з околицями, особливо у новозбудованих мікрорайонах («Масани», «Астра», «Шерстянка»), де кількість зелених зон на 1000 мешканців є нижчою за нормативні показники.

Крім того, не врегульоване питання доступності озелених зон: близько 25% населення міста проживає на відстані понад 500 м від найближчої паркової або рекреаційної території. Це протирічить рекомендаціям ВООЗ щодо доступності зелених зон у межах 5–10 хвилин пішої доступності [3].

Відсутність кліматоадаптивних стандартів

У наявних документах озеленення не визначено критеріїв адаптації до зміни клімату. Не використується типологія зелених інтервенцій за кліматичною стійкістю. Відсутні норми щодо застосування мульчування, автоматичних систем крапельного зрошення, підбору видів за принципом «висока толерантність до стресу + низьке водоспоживання». Через це навіть реалізовані заходи можуть мати короткостроковий ефект або виявитися неефективними в середньо- і довгостроковій перспективі.

Аналіз реалізації Концепції озеленення м. Чернігова у поєднанні з сучасними кліматичними тенденціями, дозволив виявити низку системних проблем і викликів, які суттєво впливають на ефективність функціонування зеленої інфраструктури в місті. Умовно їх можна класифікувати за групами: організаційно-інституційні (фрагментарність управління зеленими зонами, недостатній кадровий потенціал, відсутність системного моніторингу стану зелених насаджень), фінансово-економічні (недостатнє фінансування, відсутність фінансових механізмів залучення приватного сектору, низька економічна мотивація громадян і підприємств долучатися до озеленення), екологічно-кліматичні (збільшення кліматичної вразливості міського середовища, невідповідність видового складу умовам сучасного клімату, підвищення навантаження на водні ресурси), соціально-просторові (нерівномірний розподіл зелених насаджень між мікрорайонами, низький рівень участі громади у плануванні озеленення, недостатня екологічна освіта населення) та нормативно-правові (відсутність локальних стандартів кліматоадаптивного озеленення, слабка інтеграція озеленення в стратегічне планування розвитку міста) [2,3].

На основі виявлених проблем і поточних тенденцій зміни клімату постає об'єктивна потреба перегляду підходів до планування, реалізації та моніторингу озеленення міста Чернігова. Запропоновані нижче стратегічні напрями мають стати основою для оновлення Концепції озеленення та її адаптації до нових реалій [10].

Інтеграція кліматоадаптації в систему озеленення

1. Впровадити систему оцінки стійкості зелених насаджень до кліматичних факторів, з урахуванням толерантності до спеки, посухи, забруднення повітря.
2. Розробити локальні стандарти підбору рослин із пріоритетом до автотонних і ксерофітних видів, що краще адаптуються до нестабільних умов середовища.
3. Закласти в проєктну документацію елементи мульчування, місцями крапельного зрошення, сис-

тем збору дощової води як обов'язкову умову для створення нових зелених насаджень.

Просторова оптимізація зелених зон

1. Провести геоінформаційний аудит зелених зон міста з використанням ГІС-технологій для виявлення зон дефіциту озеленення.

2. Забезпечити рівномірний доступ до зелених зон у межах кожного мікрорайону, з урахуванням пішої доступності (до 500 м).

3. Ініціювати створення зелених коридорів між парками, скверами та лісопарковими зонами з метою формування безперервного екологічного каркасу.

Управлінська та нормативна модернізація

1. Створити єдиний центр управління зеленою інфраструктурою (наприклад, у форматі відділу комунального підприємства, яке відповідає за озеленення та благоустрій з ГІС-інструментами).

2. Оновити Концепцію озеленення з урахуванням кліматичних ризиків, соціальних пріоритетів і новітніх європейських стандартів.

3. Впровадити міські стандарти кліматоадаптивного озеленення, які б були обов'язковими для всіх учасників містобудівного процесу, включаючи забудовників.

Підвищення участі громади та екологічної культури

1. Розробити програми залучення представників Чернігівської територіальної громади до озеленення, включаючи шкільні, студентські, корпоративні та волонтерські ініціативи.

2. Запустити інформаційно-просвітницькі кампанії, спрямовані на формування екологічної свідомості містян, особливо в частині догляду за молодими насадженнями.

3. Впровадити онлайн-платформи для моніторингу зелених зон, доступні громадянам, з можливістю подати звернення або ініціативу.

Фінансова та партнерська підтримка

1. Розробити механізми партнерства в озелененні, включаючи зелені інвестиційні проєкти.

2. Сприяти залученню грантів від міжнародних екологічних фондів (UNDP, GIZ, ЄБРР) для підтримки кліматоадаптаційних заходів у зеленому секторі міського середовища Чернігова.

3. Створити екофонд при Чернігівській міській раді, який акумулюватиме кошти на стратегічне озеленення, з можливістю внесків від бізнесу та окремих громадян.

У довгостроковій перспективі м. Чернігів має трансформувати свою зелену урбосферу з декоративного доповнення до ключового адаптаційного ресурсу міста. Зелений простір повинен розглядатися як критична інфраструктура, що підвищує стійкість міста до екстремальних погодних умов, забезпечує охолодження мікроклімату, сприяє соціальній інтеграції та якості життя, посилює біорізноманіття

та природні екосистемні зв'язки, стає елементом сталого просторового розвитку.

Головні висновки. Зелені зони та насадження міста Чернігова мають розглядатися як критично важливий елемент міського середовища, що сприяє адаптації до кліматичних викликів, покращує якість життя та забезпечує екологічну рівновагу. Досвід Чернігова засвідчує наявність низки проблем, серед яких фрагментарне управління, недофінансування, недостатній облік кліматичних змін і обмежене стратегічне планування. Сучасні кліматичні тенденції зумовлюють потребу у впровадженні кліматостійких рішень, таких як адаптивний вибір складу рослин, ефективне водокористування та створення зелених коридорів. Для ефективного реформування міського озеленення необхідне усунення нормативних прогалин, просторовий баланс зелених зон, посилення участі громади та інтеграція екосистемного підходу в програми містобудування. Рекомендовано оновити Концепцію озеленення Чернігова з урахуванням цифрових інструментів, ГІС-планування, кліматоадаптивних стандартів і принципів Європейської зеленої угоди та Цілей сталого розвитку ООН.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження озеленення Чернігова мають значний науково-практичний потенціал для впровадження інноваційних рішень у сфері урбаністики, прикладної екології та управління міським середовищем. Вони можуть бути використані для оновлення стратегічних документів, розробки локальних нормативів та інтеграції в містобудівну документацію. Дослідження сприяє розвитку природоорієнтованих рішень, таких як біодренажні системи, зелені дахи та стіни, що покращують міський мікроклімат.

Пропозиції та методичні підходи до озеленення можуть бути адаптовані для інших міст України, сприяючи обміну досвідом та розробці національних стандартів. Крім того, результати дослідження відкривають нові можливості для міждисциплінарних наукових досліджень, інтеграції інноваційних технологій моніторингу та розвитку освітніх програм, присвячених зміні клімату, озелененню та ідеям сталого розвитку. Важливим аспектом є популяризація природоорієнтованих рішень через навчальні матеріали, громадські ініціативи та інформаційні кампанії.

Значну роль відіграє підтримка міжсекторального співробітництва, залучення фінансування та впровадження систем моніторингу ефективності озеленення. У майбутньому дослідження може інтегруватися в загальні стратегії сталого розвитку Чернігівської територіальної громади та поліського регіону, енергоефективності та адаптації до зміни клімату, сприяючи застосуванню інноваційних рішень і міжнародного досвіду для покращення міських екосистем.

Література

1. Бідолах Д. І., Лакида П. І. Інвентаризація зелених насаджень з використанням сучасних інформаційних технологій, Лісове і садово-паркове господарство, 2019. № 16. Доступний за посиланням: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Lis/article/view/13631>.
2. Закон України «Про затвердження плану заходів щодо виконання Концепції реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року». Відомості Кабінету Міністрів України (КМУ), від 6 грудня 2017 р. № 878-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/878-2017-%D1%80#Text>
3. Карпенко Ю.О., Лукаш О.В., Потоцька С.О., Жиліна Т.М., Яковенко О.І., Івусь Т.І. НДР «Розробка концепції по озелененню міста Чернігова»: Звіт про НДР. Чернівці, 2016. 460 с.
4. Концепція розвитку озеленення міста Чернігова на 2021-2025 роки. *Офіційний веб - портал Чернігівської міської ради*. URL: <https://chernigiv-rada.gov.ua/poekty-rishen-sesiy/sid-58/scid-10/id-49641/> (дата звернення: 10.05.2025).
5. Кучерявий В.П. Ландшафтна архітектура: підручник. Львів: «Новий Світ-2000», 2020. 521 с.
6. Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату: Наказ Міндовкілля України № 386 від 03.06.2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0386926-23#Text> (дата звернення: 23.04.2025)
7. Олешко О.Г. Огляд природоорієнтованих рішень у адаптації міст до зміни клімату. Актуальні проблеми, шляхи та перспективи розвитку ландшафтної архітектури, садово-паркового господарства, урбоекотології та фітомеліорації: матеріали III Міжнародної науковопрактичної конференції (Біла Церква, 21 вересня 2023 р.). Біла Церква: БНАУ, 2023. С. 77–82 с
8. Потоцька С. О. Оптимізація зелених зон територій Чернігівського Полісся. Чернівці: НУ «Чернігівська політехніка». 2021. 198 с.
9. Потоцька С. О., Аравін П. А., Карпенко Ю. О., Свердлов В. О. Екосистемні послуги вуличних зелених насаджень м. Чернігова в умовах кліматичних змін. *Ukrainian Journal of Natural Sciences*. 2025. № 11. С. 303–313. URL: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.32> (дата звернення: 20.05.2025).
10. Про схвалення Стратегії формування та реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024-2026 роках : розпорядження Кабінету Міністрів України від 30 травня 2024 р. № 483-р. / Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/483-2024-p#Text> (дата звернення: 20.04.2025)
11. Рубан Л.І. Адаптаційна модель «блакитно зеленої» інфраструктури міста. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. К., КНУБА, 2018. Вип.52, 230 –237.
12. Сафранов Т. А. Катеруша Г. П., Катеруша О. В., Яраї К. Особливості динаміки хвиль тепла в окремих містах України. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія : Геологія. Географія. Екологія. 2021. Вип. 55. С. 232–244.
13. Трофимова І.В. Адаптація до змін клімату: наслідки, вразливість, ризики. Екологічна безпека та природокористування. Розділ 1. 2011. С. 128-135.
14. Шевченко О.В. Проблема глобальної зміни клімату в контексті міжнародної безпеки. Актуальні проблеми міжнародних відносин. Випуск 130. 2017. С. 24-38
15. Шепелюк М. О., Андрєєва В. В. Ландшафтна архітектура: Методичні рекомендації до виконання практичних робіт. Луцьк: 2019. 50 с.
16. Oleksandr Lukash, Iryna Miroshnyk, Vitalii Morskyi, Yuliia Stupak, Svitlana Strilets, Olena Shakhnazarian ,Alina Sliuta, Maksym Aravin, Olena Sazonova. Ecological Strategies of Decorative Invasive Tree and Shrub Plant Species in the City's Green Infrastructure. *International Electronic Conference on Processes*. Basel Switzerland, 2024. P.151. URL: <https://doi.org/10.3390/proceedings2024105151> (date of access: 22.05.2025).

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Аравін Павло Анатолійович (Чернігів) – аспірант кафедри екології, географії та природокористування, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка;

Барабаш Олена Василівна (Київ) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет;

Бельмега Іван Васильович (Житомир) – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Бистрянцева Анастасія Миколаївна (Херсон) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, провідний фахівець відділу забезпечення якості освіти, Херсонський державний університет;

Бігун Микола Віталійович (Львів) – аспірант кафедри інженерної геодезії, Національний університет «Львівська політехніка»;

Білецький Олег Олександрович (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Бойко Рита Василівна (Київ) – провідний інженер ландшафтного будівництва, Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України;

Бондар Олександр Богданович (Тернопіль) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони здоров'я, Західноукраїнський національний університет;

Бондар Олександр Іванович (Київ) – професор, академік Національної академії аграрних наук України, ректор, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України;

Борятинський Микола Юрійович (Київ) – аспірант кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет;

Бублієнко Наталія Олександрівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Валерко Руслана Анатоліївна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Василенко Ольга Володимирівна (Умань) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, завідувач кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет;

Васільєва Людмила Анатоліївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент (б.в.з.) кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Весельський Олександр Олександрович (Житомир) – аспірант, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Височін Дмитро Володимирович (Запоріжжя) – аспірант кафедри загальної та прикладної екології і зоології, Запорізький національний університет;

Волощук Ганна Дмитрівна (с. Центральне) – кандидат біологічних наук, провідний науковий співробітник лабораторії патентно-кон'юнктурних досліджень, економіки та інтелектуальної власності, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України;

Воронова Наталія Валентинівна (Запоріжжя) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри загальної та прикладної екології і зоології, Запорізький національний університет;

Галаган Оксана Костянтинівна (Кременець) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології, екології та методик їх навчання, Кременецька обласна гуманітарно-педагогічна академія імені Тараса Шевченка;

Ганошенко Геннадій Вікторович (Полтава) – аспірант кафедри прикладної екології та природокористування, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Герасимчук Людмила Олександрівна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Герасимчук Олена Леоніївна (Житомир) – кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Горбань Валерій Віталійович (Запоріжжя) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри загальної та прикладної екології і зоології, Запорізький національний університет;

Григор'єв Костянтин Володимирович (Миколаїв) – аспірант кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили;

Григор'єва Людмила Іванівна (Миколаїв) – доктор біологічних наук, професор, завідувачка кафедри екології Чорноморського національного університету імені Петра Могили;

Гуреля Іван Володимирович (Умань) – аспірант кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет;

Дрозд Олена Миколаївна (Харків) – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Завражний Анатолій Олександрович (Харків) – студент I курсу магістратури, Навчально-науковий інститут будівництва та цивільної інженерії Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова;

Іваненко Максим Костянтинович (Запоріжжя) – аспірант кафедри загальної та прикладної екології і зоології, Запорізький національний університет;

Іванюк Руслан Олександрович (Житомир) – аспірант, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Івусь Тетяна Ігорівна (Чернігів) – аспірант кафедри екології, географії та природокористування, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка;

Ілляш Оксана Едуардівна (Полтава) – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедрою прикладної екології та природокористування, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Кагукіна Анастасія Максимівна (Житомир) – PhD, асистент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Карпенко Юрій Олександрович (Чернігів) – кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри екології, географії та природокористування, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка;

Кириленко Ніна Павлівна (Житомир) – асистент кафедри гірничих технологій та будівництва імені професора Бакка М.Т., Державний університет «Житомирська політехніка»;

Кобзиста Оксана Петрівна (Київ) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет;

Кожемякін Геннадій Борисович (Запоріжжя) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, Інженерний навчально-науковий інститут імені М.Ю. Потебні Запорізького національного університету;

Кононенко Роман Олександрович (Житомир) – здобувач IV курсу природничого факультету, Житомирський державний університет імені Івана Франка;

Котляренко Лідія Теодорівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри теорії, методики та організації фізичної підготовки і спорту, Національний університет оборони України;

Краснов Володимир Павлович (Житомир) – доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Курилюк Олексій Миколайович (Рівне) – аспірант кафедри електротехнологій та експлуатації енергообладнання, Національний університет водного господарства та природокористування;

Лисак Роксолана Станіславівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет;

Литвиненко Артем Валерійович (Запоріжжя) – аспірант, кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Національний університет «Запорізька політехніка»;

Ломакіна Ольга Сергіївна (Харків) – старший викладач кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Лялюк-Вітер Галина Дмитрівна (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Можарівська Інна Анатоліївна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри здоров'я природи та якості харчових ресурсів, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Ничик Оксана Василівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Нонік Людмила Юріївна (Житомир) – аспірант, асистент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Оліненченко Юрій Олександрович (Київ) – директор, Медичний центр «Інститут планування сім'ї», аспірант кафедри екології, Державний університет «Київський авіаційний інститут»;

Пацева Ірина Григорівна (Житомир) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Пацюк Марина Костянтинівна (Житомир) – доктор біологічних наук, доцент, професор кафедри ботаніки, біоресурсів та збереження біорізноманіття, Житомирський державний університет імені Івана Франка;

Петрученко Андрій Олегович (Київ) – асистент кафедри теоретичної електротехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

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;

Пірич Аліна Володимирівна (с. Центральне) – кандидат сільськогосподарських наук, науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України;

Погорєлова Оксана Мирославівна (Тернопіль) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони здоров'я, Західноукраїнський національний університет;

Подзерей Роман Вікторович (Умань) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини;

Поліщук Михайло Миколайович (Київ) – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Полушкін Тимур Ігорович (Одеса) – аспірант кафедри екології та охорони довкілля Одеського національного університету імені І.І. Мечникова

Попіль Надія Іванівна (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу ландшафтного будівництва, Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України;

Потоцька Світлана Олександрівна (Чернігів) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка;

Припула Наталія Михайлівна (Запоріжжя) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри загальної та прикладної екології і зоології, Запорізький національний університет;

Пронь Олександр Володимирович (Київ) – аспірант кафедри екології, Державний університет «Київський авіаційний інститут»;

Ролік Олександр Іванович (Київ) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Руденко Валерій Петрович (Чернівці) – доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри економічної географії та екологічного менеджменту, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича;

Руденко Степан Валерійович (Дніпро) – кандидат географічних наук, докторант кафедри зоології та екології, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара;

Салавор Оксана Мирославівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Сафранов Тамерлан Абісалович Ігорович (Одеса) – доктор геолого-мінералогічних наук, професор, професор кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Свердлов Володимир Олександрович (Чернігів) – доктор філософії з біології, старший лаборант кафедри біології, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка;

Солошенко Вікторія Сергіївна (Біла Церква) – молодший науковий співробітник, Державний дендрологічний парк Олександрія Національної академії наук України;

Сопова Надія Валеріївна (Умань) – аспірантка кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет; старший викладач кафедри управління земельними ресурсами, геодезії та кадастру, Державний біотехнологічний університет;

Сталінська Ірина Вікторівна (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Тарасюк Микола Володимирович (Київ) – студент II курсу автомеханічного факультету, Національний транспортний університет;

Телюра Наталя Олександрівна (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії та інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Филипчук Віктор Леонідович (Рівне) – доктор технічних наук, професор кафедри електротехнологій та експлуатації енергообладнання, Національний університет водного господарства та природокористування;

Халмурадов Батир Данатарович – к.м.н., професор, завідувач кафедри цивільної та промислової безпеки імені Героя України Чуба Олександра Сергійовича Державний університет «Київський авіаційний інститут»;

Хандогіна Ольга Вадимівна (Харків) – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Харченко Михайло Володимирович (с. Центральне) – кандидат сільськогосподарських наук, науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України;

Хеншель Даяна (Блумінгтон, Індіана, США) – доктор філософії, професор, Інститут Соціальних та Екологічних Проблем Університету Індіани Блумінгтон;

Хорошилов Артем Валентинович (Харків) – студент I курсу магістратури, Навчально-науковий інститут будівництва та цивільної інженерії Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова;

Хрутьба Вікторія Олександрівна (Житомир) – доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет, професор кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Хрутьба Юлія Сергіївна (Житомир) – кандидат економічних наук, доцент, докторант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Чвартковська Анастасія Олександрівна (Херсон) – студентка I курсу магістратури факультет біології географії та екології, Херсонський державний університет;

Шамрай Володимир Ігорович (Житомир) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих технологій та будівництва імені професора Бакка М.Т., Державний університет «Житомирська політехніка»;

Шаповалов Євгеній Борисович (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Шахман Ірина Олександрівна (Херсон) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри географії та екології, Херсонський державний університет;

Шевчук Лариса Миколаївна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Шумик Микола Іванович (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора з наукової роботи (ландшафтне будівництво), завідувач відділу ландшафтного будівництва, Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України;

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;

Якименко Ігор Леонідович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій.

НОТАТКИ

Наукове видання

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

3(60)

- **Екологія водних ресурсів**
- **Екологія і виробництво**
- **Екологія земельних ресурсів**
- **Екологія і рослинництво**
- **Екологічні наслідки воєнних дій**
- **Екологічний моніторинг**
- **Загальні проблеми екологічної безпеки**
- **Збереження біологічного та ландшафтного різноманіття**
- **Природно-заповідний фонд України**
- **Управління відходами**
- **Зміна клімату**

Адреса редакції:

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2, Київ, 03035;
тел. +380 99 428 67 00;
www.ecoj.dea.kiev.ua
e-mail: 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

Підписано до друку 03.03.2025. Формат 64x84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 23,95. Тираж 100. Замовлення № 0725/597.
Ціна договірна. Віддруковано з готового оригінал-макета