

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

4(55)



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О.І. – К. :
Видавничий дім «Гельветика», 2024. – № 4(55). – 256 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:

Гандзюра В.П., доктор біологічних наук

Єрмаков В.М., доктор технічних наук

Захматов В.Д., доктор технічних наук

Іващенко Т.Г., кандидат технічних наук

Конішук В.В., доктор біологічних наук

Лукаш О.В., доктор біологічних наук

Машков В.А., доктор технічних наук

Михайленко Л.Є., доктор біологічних наук

Нецветов М.В., доктор біологічних наук

Ольшевський С.В., доктор технічних наук

Риженко Н.О., доктор біологічних наук

Рудько Г.І., доктор геолого-мінералогічних наук,

доктор географічних наук, доктор технічних наук

Улицький О.А., доктор геологічних наук

Фінін Г.С., доктор фізико-математичних 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.

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 (091 – Біологія), природничих наук (101 – Екологія, 103 – Науки про Землю) та технічних наук (183 – 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

ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ.....	7
Васютинська К.А. Оцінка впливу чинника урбанізації на параметри техногенних пожеж в регіонах України.....	7
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ.....	16
Бургаз О.А., Гарабазій Т.А., Тимошук М.О. Огляд стану забруднення атмосферного повітря міста Одеса за даними маршрутних спостережень.....	16
Поліщук М.М., Ролік О.І. Дрон для екологічного моніторингу стану водойм.....	22
Боголюбов В.М., Клепко А.В., Бондарь В.І. Моніторинг атмосферного повітря у контексті переходу до сталого сільського розвитку.....	30
Коляда О.В., Головань Л.В., Чуприна Ю.Ю., Сургай Л.Л. Біоіндикаційна оцінка якості атмосферного повітря в умовах антропогенного навантаження.....	35
Якименко Г.М., Гай А.Є. Оцінка впливу на довкілля як складова державної системи моніторингу довкілля.....	40
ЕКОЛОГІЯ АГРОВИРОБНИЦТВА.....	44
Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В., Харченко М.В. Патентно-винахідницька діяльність у Миронівському інституті пшениці імені В.М. Ремесла щодо еколого-фізіологічних, генетико-селекційних та біотехнологічних досліджень.....	44
ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ.....	49
Берія В.Д., Гандзюра В.П. Зміни еколого-популяційних особливостей угруповань літорального зоопланктону водних екосистем річки Ірпінь та її приток у весняно-літній період 2024 року.....	49
Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Герасимчук О.Л., Скиба Г.В., Хоменко С.В. GAP-аналіз водокористування у контексті запобігання евтрофікації річки Тетерів в межах урбоєкосистеми м. Житомира.....	53
Магась Н.І. Характеристика природних та кліматичних умов формування сучасного гідроекологічного стану в пониззі річки Синюха.....	59
ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ.....	70
Бондар О.І., Риженко Н.О., Четвериков В.В. Методичні засади очищення забруднених ділянок від стійких органічних забрудників.....	70
ЕКОЛОГІЯ І ВИРОБНИЦТВО.....	79
Давибіда Л.І. Використання платформи Google Earth Engine для систематизації даних геоекологічних досліджень на прикладі території Карпатського регіону.....	79
Волошин В.С. Про деякі закономірності щодо мінімізації відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі.....	84
Вольчин І.А., Кривошеєв С.І. Шлях впровадження вимог директиви 2015/2193/EU про обмеження викидів забруднюючих речовин до середніх спалювальних установок нафтогазової галузі України.....	90
Лопушанська М.Р., Іванов Є.А., Біланюк В.І., Пилипович О.В., Циганок Л.В., Ревуцька Н.В. Екосистемні послуги при проектуванні та експлуатації об'єктів відновлюваної енергетики (на прикладі Львівської області).....	95
Сірик А.О., Євтушенко О.В. Еколого-безпекові особливості експлуатації промислових котельних установок підприємств харчової промисловості.....	100
Шибанова А.М., Руда М.В., Джумеля Е.А., Паславський М.М. Врахування екосистемних послуг в методології оцінки життєвого циклу складних технічних систем.....	105
ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ.....	114
Божко Т.В., Ігнатенко М.Я. Стан річки Сіверський Донець та шляхи його покращення. Вплив воєнних дій на водні ресурси України.....	114

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ	120
Лемєга Н.М. Перспективи розвитку агрофотовольтаїки у Львівській області.....	120
Соколов А.В., Улицький О.А., Д'яченко Н.О. Впровадження технології декантації та вакуумної дистиляції небезпечних речовин для підвищення рівня екологічної безпеки.....	124
ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ	130
Ричак Н.Л., Кізілова Н.М., Внукова Н.В. Залишкова здатність до природної саморегуляції урболандшафтних басейнових геосистем в умовах мегаполісу.....	130
Волошина Н.О., Бондар К.О., Мартюхін А.В., Волошин О.Г. Аналіз передумов впровадження біологічних переходів для диких тварин.....	140
Причєпа М.В., Коваленко Ю.О. Видовий склад та структура іхтіофауни річки Горєнка (басейн р. Ірпінь).....	146
Суслова О.П. <i>Tilia cordata</i> Mill. в паркових насадженнях промислових міст степової зони України.....	151
УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ	157
Козуля Т.В., Сакун А.О. Розробка системологічної моделі об'єкта «зберігання рідинних відходів – довокілья» з контролю рівня безпеки.....	157
Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г., Ігнатюк Р.М. Оцінка впливу гірничо-видобувної галузі на довкілля: система управління відходами.....	164
Василенко О.М., Овдіюк О.М., Сапронов Р.С. Управління утилізацією промисловими відходами на підприємстві виготовлення хімічних волокон.....	169
Горбачова О.С., Павлюх Л.І., Якименко Г.М. Модель ефективного управління відходами на прикладі супермаркетів.....	174
Ілляш О.Е., Серга Т.М., Бредун В.І., Чепурко Ю.В., Максюта Н.С. Порівняльний аналіз методологічних підходів до проведення сортувальних аналізів побутових відходів в Україні та Австрії.....	181
Сорочинська О.Л. Особливості національної стратегії управління відходами в Україні.....	187
Сталінська І.В., Хандогіна О.В. Реагентне очищення фільтрату полігонів твердих побутових відходів як фактор комплексного управління відходами.....	193
ПИТАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ	197
Валерко Р.А., Герасимчук Л.О., Пацева І.Г., Бондарчук В.М., Войналович І.М. Оцінка прогресу досягнення цілі сталого розвитку № 6 в Україні.....	197
Герасимчук О.Л., Мельник-Шамрай В.В., Шевчук Л.М., Васільєва Л.А. Інноваційні підходи до розвитку землеустрою в контексті сталого розвитку території.....	202
ТЕОРЕТИЧНА ЕКОЛОГІЯ	207
Петруша Ю.Ю., Пушкарьова Є.Р., Сохрякова І.М. Дослідження антикорозійних властивостей водних вилучень з рослинної сировини.....	207
Федоряк М.М., Черлінка Л.В., Черлінка В.Р., Москалик Г.Г., Легєта У.В., Жук А.В., Ситнікова І.О., Москалик І.М., Курищук А.Д. Розробка елементів адаптивного моніторингу екосистемних послуг на модельних засадах.....	211
Харитонов М.М., Бабенко М.Г., Клімкіна І.І., Мартинова Н.В. Післядія внесення осаду стічних вод на родючість технозему та якість біосировини міскантусу і тополі.....	225
Хом'як І.В., Овдіюк О.М. Контрольоване самовідновлення рослинності як альтернатива лісової рекультивациі.....	229
Khomiak I.V., Onyshchuk I.P., Vasylenko O.M. Theoretical basis of classification of terraforming methods.....	234
Шевченко Р.Ю. Український національний етноекологічний простір у мистецьких творах художньої геоіконіки та екографії.....	238
ЕКОЛОГІЧНА ОСВІТА	243
Шляніна А.В., Дунаєвська О.Ф. Використання хімічних дисциплін як інтеграційного матеріалу для формування екологічної компетентності.....	243
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ	250

CONTENTS

GENERAL ISSUES OF ENVIRONMENTAL SAFETY	7
Vasyutynska K. Assessing the impact of urbanisation on man-made fire parameters in Ukrainian regions.	7
ENVIRONMENTAL MONITORING	16
Burhaz O., Harabazhii T., Timoshchuk M. Overview of the atmospheric air pollution state in the Odesa according to the route observations data.....	16
Polishchuk M., Rolik O. Drone for environmental monitoring of water reservoirs.	22
Bogoliubov V., Klepko A., Bondar V. Monitoring of atmospheric air in the context of the transition to sustainable rural development.....	30
Koliada O., Golovan L., Chuprina Yu., Surgai L. Bioindicative assessment of atmospheric air quality under conditions of anthropogenic pressure.....	35
Yakymenko H., Hai A. Environmental impact assessment as a component of the state environmental monitoring system.....	40
ECOLOGY OF AGRICULTURAL PRODUCTION	44
Pykalo S., Demydov O., Yurchenko T., Kharchenko M. Patent and inventive activity at the V.M. Remeslo Myronivka Institute of Wheat regarding ecological-physiological, genetic-breeding and biotechnological research.....	44
ECOLOGY OF WATER RESOURCES	49
Beriia V., Gandzyura V. Changes in ecological and population characteristics among the groups of litoral zooplankton of aquatic ecosystems of the Irpin river and its tributary in the spring-summer period of 2024.....	49
Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Herasymchuk O., Skyba G., Khomenko S. GAP analysis of water usage in the context of preventing eutrophication of the teteriv river within the urban ecosystem of Zhytomyr.....	53
Magas N. Characteristics of natural and climatic factors that influence the current hydroecological state of lower reaches of the Syniukha river.....	59
ECOLOGY OF LAND RESOURCE	70
Bondar O., Ryhenko N., Chetverykov V. Methodical principles for cleaning contaminated sites from persistent organic pollutants.....	70
ECOLOGY AND PRODUCTION	79
Davybida L. Using the Google Earth Engine for the systematization of geoecological research data: the case of the Carpathian region.....	79
Voloshyn V. On some regularities of waste minimization in the source of their origin – the technological process.....	84
Volchyn I., Kryvosheiev S. The way of the implementation of the requirements of the directive 2015/2193/EU on the limitation of emissions of pollutants to medium combustion plants of the oil and gas industry of Ukraine.....	90
Lopushanska M., Ivanov Ye., Bilaniuk V., Pylypovych O., Tsyganok L., Revutska N. Ecosystem services in the planning and operation of renewable energy facilities (on the example of Lviv region).....	95
Siryk A., Yevtushenko O. Environmental and safety features of operation of industrial boiler plants at food industry enterprises.....	100
Shybanova A., Ruda M., Dzhumelia E., Paslavskiy M. Accounting of ecosystem services in the life cycle assessment methodology of complex technical systems.....	105
ENVIRONMENTAL IMPLICATION OF MILITARY ACTIONS	114
Bozhko T., Ignatenko M. State of the Siverskyi Donets river and ways of its improvement. Impact of military actions on water resources of Ukraine.....	114

INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF ENVIRONMENTAL PROTECTION	120
Lemeha N. Prospects for the development of agro-photovoltaics in the Lviv region.....	120
Sokolov A., Ulytsky O., Diachenko N. Introduction of decantation and vacuum distillation technology for hazardous substances to improve environmental safety.....	124
PRESERVATION OF BIOLOGICAL AND LANDSCAPE DIVERSITY	130
Ruchak N., Kizilova N., Vnukova N. The residual capacity for natural self-regulation of urbollandscape river basin geosystems on a megalopolis territory.....	130
Voloshyna N., Bondar K., Martiukhin A., Voloshyn O. Analysis of the preconditions for the implementation of biological transitions for wild animals.....	140
Prychepa M., Kovalenko Yu. Species composition and structure of the Horenka river (Irpın river basin).....	146
Suslova O. <i>Tilia cordata</i> Mill. in park plantations of industrial cities of the steppe zone of Ukraine.....	151
WASTE MANAGEMENT	157
Kozulia T., Sakun A. Systemological model “liquid waste storage – environment” development for safety level control...	157
Melnyk-Shamrai V., Shamrai V., Patseva I., Ihnatiuk R. Assessment of the impact of the mining industry on the environment: the waste management system.....	164
Vasylenko O., Ovdiuk O., Sapronov R. Management of industrial waste disposal at the chemical fiber manufacturing enterprise.....	169
Horbachova O., Pavliukh L., Iakymenko G. A model for effective waste management in supermarkets.....	174
Illiasb O., Serga T., Bredun V., Chepurko Yu., Maksiuta N. Comparative analysis of methodological approaches to sorting household waste in Ukraine and Austria.....	181
Sorochynska O. Features of the national waste management strategy in Ukraine.....	187
Stalinska I., Khandohina O. Reagent treatment of landfill leachate from municipal solid waste as a factor in comprehensive waste management.....	193
SUSTAINABLE DEVELOPMENT ISSUES	197
Valerko R., Herasimchuk L., Patseva I., Bondarchuk V., Voinalovych I. Assessment of the progress of achieving Sustainable Development Goal № 6 in Ukraine.....	197
Herasymchuk O., Melnyk-Shamrai V., Shevchuk L., Vasilieva L. Innovative approaches to land development in the context of sustainable territory development.....	202
THEORETICAL ECOLOGY	207
Petrusha Yu., Pushkarova Ye., Sokhriakova I. Study of anti-corrosion properties of aqueous extracts of plant raw materials.....	207
Fedoriak M., Cherlinka L., Cherlinka V., Moskalyk H., Legeta U., Zhuk A., Sytnikova I., Moskalyk I., Kuryshchuk A. Development of elements of adaptive monitoring of ecosystem services on a model basis.....	211
Kharytonov M., Babenko M., Klimkina I., Martynova N. The aftereffect of sewage sludge on the fertility of technosol and the quality of biofeedstuffs of miscanthus and poplar.....	225
Khomiak I., Ovdiuk O. Controlled self-regeneration of vegetation as an alternative to forest reclamation.....	229
Khomiak I., Onyshchuk I., Vasylenko O. Theoretical basis of classification of terraforming methods.....	234
Shevchenko R. Ukrainian National Ethnoecological Space in art geoiconic and ecology works.....	238
ENVIRONMENTAL EDUCATION	243
Shlianina A., Dunaievskaa O. Use of chemical disciplines as an integration material for formation of environmental competence.....	243
AUTHORS’ CREDENTIALS	250

ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

УДК 504.05:614.841.2(519.25)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.1>

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЧИННИКА УРБАНІЗАЦІЇ НА ПАРАМЕТРИ ТЕХНОГЕННИХ ПОЖЕЖ В РЕГІОНАХ УКРАЇНИ

Васютинська К.А.

Національний університет «Одеська політехніка»

пр. Шевченко, 1, 65044, м. Одеса

e.a.vasutinskaya@op.edu.ua

Стаття присвячена актуальній проблемі аналізу динаміки пожеж техногенного походження в регіонах країни залежно від оцінки урбогенного навантаження. Урбанізаційний процес загострює вплив чинників зростання енергоспоживання, зношеності інженерних мереж, збільшення промислового навантаження і наслідків глобальних кліматичних змін, та через збільшення компактності житлових забудов та щільності населення примножує ризики міських пожеж за кількістю жертв та значними матеріальними збитками. Тому *актуально* розглядати пожежі техногенного походження як частину широкій проблематики оцінювання урбанізаційних впливів на природно-техногенну небезпеку урбанізованих територій. *Мета роботи* – проаналізувати динаміку міських пожеж та ризиків міського населення за останній 15-річний період, а також провести кореляційний аналіз регіональних індексів кількості пожеж техногенного походження та індикаторів еколог-демографічної урбанізації адміністративних областей. *Новизна* роботи полягає в застосуванні індикаторного методу для оцінювання пожежної ситуації в країні в контексті диференціації урбогенного насичення регіонів. В статті проведений аналіз основних причин виникнення міських пожеж та надана класифікаційна характеристика асоційованих небезпек. Методом аналітично-графічного аналізу динаміки показників пожеж техногенного походження в містах за період 2009–2023 рр. показане зменшення ризиків міського населення, яке пояснено позитивними ефектами урбанізаційного процесу (рівень урбанізації країни зростає від 68,5% в 2009 р. до 69,7% в 2022 р.). Зростання питомого показника частоти міських пожеж за цей період обґрунтоване наслідками кліматичних змін. Проведений функціонально-графічний аналіз регіонального коефіцієнту пожежної небезпеки (розрахований як середньо медіанне значення кількості пожеж в області за означений період) від індексу еколого-демографічної урбанізації показав їх достатній рівень кореляції (коефіцієнт кореляції Пірсона склав 0,56). Надані рекомендації щодо інтеграції чинника урбанізації в стратегічне планування безпекових заходів задля підвищення здатності міської системи оперативно реагувати на ризики та зменшити вразливість населення. *Ключові слова*: урбанізаційні процеси, природно-техногенна безпека, надзвичайна ситуація, пожежа техногенного походження, індивідуальний ризик населенню.

Assessing the impact of urbanisation on man-made fire parameters in Ukrainian regions. Vasyutynska K.

The article addresses the critical issue of analysing the dynamics of man-made fires in regions across the country, based on an assessment of urban load. The urbanisation process has a significant impact on energy consumption, utility networks, industrial load and global climate change. It also increases the risk of urban fires, with a greater number of victims and significant material damage due to the increasing compactness of residential buildings and population density. Therefore, it is *relevant* to consider man-made fires as part of the broader issue of assessing urbanisation impacts on natural and technological hazards in urban areas. The *purpose* of the study is to analyse the dynamics of urban fires and urban population risks over the past 15 years. It will also conduct a correlation analysis of regional indices of the number of man-made fires and indicators of environmental and demographic urbanisation of Ukrainian regions. The *novelty* of the work lies in the application of the indicator method for assessing the fire situation in the country in the context of differentiation of urban saturation of regions. The article analyses the main causes of urban fires and provides a classification characteristic of the associated hazards. The article demonstrates that the risks faced by urban populations have decreased as a result of the positive effects of urbanisation. It uses analytical and graphical analysis of the dynamics of man-made fires in cities for the period 2009–2023. The country's urbanisation level increased from 68.5% in 2009 to 69.7% in 2022. The increase in the proportion of urban fires during this period is justified by the effects of climate change. The functional and graphical analysis of the regional fire hazard coefficient (calculated as the average median value of the number of fires in the region for the specified period) from the index of ecological and demographic urbanisation showed a sufficient level of correlation (Pearson's correlation coefficient was 0,56). It is imperative that strategic planning of security measures integrates the urbanisation factor to enable the urban system to respond rapidly to risks and reduce the vulnerability of the population. *Key words*: urbanisation processes, natural and technological safety, emergency situation, man-made fire, individual risk to the population.

Постановка проблеми. Міста завжди відігравали ключову роль у соціально-економічному розвитку регіонів і держави в цілому, впливали на зростання добробуту населення та задоволення максимального рівня всіх потреб людини. Проте масштаби техно-

генних аварій, збільшення частоти їх виникнення, створюють додаткові проблеми для міських населених пунктів. Зокрема, техногенні пожежі стали значною загрозою для міст через зростання концентрації промислового виробництва, інтенсивний розвиток

інфраструктури, збільшення компактності житлових забудов та щільності населення. Міські пожежі часто є результатом людської діяльності, а урбанізація посилює комплексний вплив таких техногенних чинників як зростання енергоспоживання, зношеність інженерних мереж, збільшення транспортного потоку та промислового навантаження одночасно із загостренням наслідків глобальних кліматичних змін. Ці процеси сприяють підвищенню ризиків виникнення пожеж, які можуть мати суттєві наслідки для людей, економіки та довкілля, та, в цілому, обмежують сталий розвиток міст.

Актуальність дослідження. Руйнівний вплив пожеж забудованого простору неможливо переоцінити. Так, за даними Центра статистики Міжнародної організації пожежно-рятувальних служб (СТІФ) [1], у всьому світі щороку гинуть понад 120 тис. людей у пожежах чи від їх смертоносних чинників (травми, опіки, отруєння чадним газом, інші). Понад 95% цих смертей і травм припадає на країни з низьким і середнім рівнем доходу, де ризики зростають пропорційно швидкій урбанізації. Наприклад, кількість пожеж у населених пунктах країн з низьким рівнем доходу за останні роки зросла на 300%. Представлений аналіз статистики пожеж для країн, які доєдналися до Міжнародної організації СТІФ (включає дані з 55 країн і 42 міст та охоплює 20% населення світу) за період 1993–2022 роки включає дані щодо щорічної кількості пожеж до 4,5 млн. та кількості загиблих до 62 тис. осіб [2]. З початку ХХІ століття зросла загальносвітова тенденція збільшення всіх кількісних показників пожеж: кількість щорічних пожеж зросла до 8 млн, кількість загиблих – до 500 людей за рік, постраждалих – до 600–800 тис. Лише в США у 2019 році пожежі спричинили 3704 смертей та прямих матеріальних збитків на 14,8 мільярдів доларів [3], на материковому Китаї у 2020 році сталося 252 000 пожеж, що призвело до 1183 смертей і прямих матеріальних збитків на суму 621 млн \$ США [4].

В Україні пожежі завжди виділялись серед надзвичайних ситуацій техногенного походження великими кількостями жертв та значними матеріальними збитками. Тільки за сім місяців 2024 р., за даними Державної служби надзвичайних ситуацій (ДСНС) [5], зареєстровано 54845 пожеж, серед них 27740 у містах, а їх прями матеріальні збитки склали 15 млрд 994 млн 828 тис. грн (приблизно 390 млн. \$ США). Більшість людей також загинуло унаслідок пожеж у містах – 461 людина, що складає 55% від загальної кількості загиблих (843 людей). Так само, травмуване 704 людини на пожежах в містах, що складає 66% від загальної кількості.

Такі дані свідчать про нарощення небезпеки міського середовища, збільшення відповідних ризиків та вразливості міського населення. Тому актуально розглядати пожежі техногенного походження не як окремі події, а як частину ширшої проблематики

оцінювання стану природно-техногенної небезпеки урбанізованих територій. В статистиці пожеж [6] щорічно відмічається перевищення питомої ваги пожеж у містах промислово розвинених, високо урбанізованих регіонів: в 2023 р. – Запорізької (73,2%), Дніпропетровської (65,2%), Сумської (60,9%) областей; в 2022 р. – Луганської (94,0%), Донецької (76,4%), Запорізької (73,4), Дніпропетровської (69,6%), Харківської (67,8%) областей. Для детального аналізу джерел та основних чинників виникнення міських пожеж в цілях запобігання надзвичайних ситуацій цього типу та вдосконалення систем прогнозування, попередження і мінімізації наслідків доцільно враховувати особливості урбанізаційного процесу в регіональному розрізі.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проведено у напрямку «Цілей сталого розвитку на період 2016–2030 рр. та відповідає стратегічним цілям та завданням, які визначені у Законі України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» [7], а саме, завданню «зменшення негативного впливу процесів урбанізації на навколишнє природне середовище». Вдосконалення значення чинника урбанізації в системі управління регіональною безпекою співпадає з завданнями стратегічної екологічної оцінки в програмах сталого розвитку [8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблемі зв'язку між різними чинниками урбанізації та виникненням міських пожеж присвячені чисельні вітчизняні та зарубіжні дослідження. Вплив на рівень пожежної безпеки чинників щільності населення, рівня доходів, валового регіонального продукту на душу населення, типу домогосподарства простежений в наукових розробках на прикладі різних країн. За допомогою методів просторової статистики та регресійного аналізу вивчені взаємозв'язки між соціально-економічними факторами та різними типами пожежних інцидентів в районах Брісбена (Австралія) та Кардіффа (Сполучене Королівство) авторами роботи [9], так само, як в роботі [10] виявлені райони найвищої інтенсивності пожеж в Торонто (Онтаріо, Канада) відповідно щільності населення. Використання таких змінних як щільність населення, щільність зношених будівель та купівельна спроможність людей дозволило авторам роботи [11] підвищити достовірність запропонованої моделі просторової помилки та показати вплив урбанізації на ризики пожеж, які концентруються в центральних районах Португалії.

Відмітимо, що переважна більшість досліджень просторово-часового розподілу пожежних інцидентів проводиться сьогодні із поєднанням методів статистичного, геоінформаційного аналізу та використанням супутникових даних. Наприклад, на основі геопросторових та статистичних методів виявлені зони пожежонебезпеки в центральних районах міст

Індії. Автори роботи [12] застосували ГІС-данні та два статистичних метода – непараметричний метод ядерної регресії KDE (Kernel Density Estimation – метод оцінки щільності ядра) та метод аналізу гарячих крапок GOG (визначення показнику Getis-Ord G_i^*). На основі означених підходів визначені зони високих пожежних ризиків в районах, які мають компактну забудову та найвищу щільність населення на рівнях 29860 особа/км² та 27994 особа/км², відповідно методам KDE і GOG. Зроблені висновки щодо найпоширеніших причин пожеж, серед яких коротке замикання електромережі та витoki газових балонів детерміноване різноманітною людською діяльністю в міському забудованому просторі як елемента урбанізаційного процесу.

В умовах урбанізації міста прагнуть до розширення за рахунок розростання міської забудови з трансформацією землекористування, що призводить до багатьох проблем, пов'язаних зі збільшенням частоти пожеж і появою нових пожежних ризиків. Так, проведені оцінки впливу міської експансії на кількість лісових пожеж в Австралії [13], на збільшення частоти пожеж в мезичних лісах південного регіону Аппалачів (США) [14], водно-болотних угіддях Аргентини [15]. В дослідженнях показане, як житлове будівництво швидко розширюється на межі дикої природи та міст, створюючи комбіновані урбогенні впливи на пожежні порушення в рослинних угрупованнях, зменшення вегетаційного індексу (NDVI) майже вдвічі та збіднення біорозмаїття. Зауважимо, що вплив урбанізованих територій на прилеглі природні ландшафти викликають чисельні лісові та торф'яні пожежі, які можуть зворотно охоплювати міста та міські агломерації. Оскільки через зміну клімату в найближчі роки кількість техногенних пожеж, ймовірно, збільшиться, постає проблема законодавчого регулювання збереження та відновлення природних систем на приміських територіях.

В наукових працях вітчизняних вчених поряд із дослідженнями соціально-економічних чинників пожеж техногенного характеру та їх наслідків в природних екосистемах [16, 17] значне місце займають проблеми використання аналітичних методів та інтелектуальних технологій в системах протипожежного моніторингу та захисту населення [18, 19]. В представлених роботах використані еволюційні методи на основі генетичних алгоритмів та еволюційних стратегій, ймовірнісні методи для оцінювання індивідуального пожежного ризику. Пожежна безпека розглядається як важливий аспект національної безпеки країни в дослідженні [20], хоча, як показано авторами роботи [21], невисокий рівень пожежної безпеки в Україні обумовлений складним соціально-економічним становищем держави, недоліками місцевого та регіонального управління, проблемами з фінансуванням.

Безсумнівним позитивом українських добірок є оцінювання параметрів пожеж техногенного харак-

теру та ризиків населення на основі методів математичного моделювання та геоінформаційних систем. Так, авторами роботи [22] візуалізовані параметри зон ризику при розвитку аварії на близько розташованих автозаправних станціях (АЗС) в межах житлового району для сценарію витoku палива із наслідками пожежі проливу за розгалуженою схемою. Дані супутникового моніторингу викидів тепла використані авторами дослідження [23] для представлення просторово-часового розподілу пожежної ситуації по території України на основі критеріїв потужності та групування викидів тепла, сумарної потужності пожежі, матеріалу горіння, площі ареалу пожеж. На наш погляд, серед представлених в монографії даних особливу зацікавленість представляють розроблені критерії відокремлення потенційно небезпечних пожеж серед всіх, що виявлені аналізом супутникових даних.

Методи математичного оброблення статистики пожеж та їх наслідків застосовані для визначення одночасності потоку пожеж в містах авторами праці [24]. Для регіонального аналізу пожежної безпеки в Україні авторами роботи [25] застосовані метод інтегрального індикатора як зваженої суми окремих показників та метод ієрархічної кластеризації нормованих питомих показників пожежної безпеки. При цьому, зроблені висновки щодо взаємообумовленості показників пожежної та економічної безпеки.

Відомий метод статистичного аналізу економічної системи України на основі оцінювання структурних зрушень запропонований авторами роботи [26] для виділення однотипних за рівнями кількістю пожеж областей України. На основі статистичного аналізу показника кількості пожеж за період 2013–2021 р. отримані три кластера регіонів методом групового середнього. Зроблений висновок щодо найвищої пожежної безпеки для групи східних та південних областей, які належать до кластеру І. Необхідно зауважити, що, зазвичай, для аналізу економічної структури використовують ваги декількох абсолютних та відносних кількісних показників, наприклад, ВВП, обсяги капітальних інвестицій, фонд накопичення та споживання та інші. Позитивом означеного в дослідженні [26] підходу є можливості оброблення масиву статистичної інформації, що можна використати для оцінки змін структури та порівняння регіонів за нормованими показниками. На наш погляд, запропонованому методу доцільно додати теоретичне обґрунтування результатів кластеризації та складу отриманих груп.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Тож, проведений аналітичний огляд методів оцінювання динаміки пожеж в міському середовищі дозволив зробити наступні узагальнення. Традиційно, в роботах, що оглянуті, досліджувались співвідношення рівнів пожежної безпеки з окремими характеристиками урбанізованих тери-

торій, такими, як параметри будівлі, кліматичні та топографічні особливості районів, щільність забудов. В цілому, в роботах українських та зарубіжних вчених показаний наявний зв'язок між пожежними подіями та окремими демографічними, соціально-економічними характеристиками та параметрами навколишнього природного середовища. Але масштаби досліджень або стосувались території держави в цілому, або окремих міст, міських агломерацій чи локальних житлових районів. Загальним обмеженням проведених досліджень, на погляд автора чинної статті, є відсутність комплексного підходу до визначення ризику пожеж на основі врахування чинника глобальної урбанізації, який сьогодні є визначальним для переважної більшості техногенних та, навіть, природних небезпек.

Взаємозв'язок між рівнями урбанізації та інтенсивністю техногенних пожеж в різних регіонах України також залишається недостатньо вивченим. Недопрацювання методів оцінювання урбогенного впливу на ризики міських пожеж ускладнює розроблення ефективних превентивних заходів щодо запобігання та боротьби з пожежами. Тому в статті вирішується завдання оцінки та аналізу впливу урбанізації на динаміку техногенних пожеж із застосуванням індикаторного методу, що буде сприяти формуванню науково обґрунтованих стратегій підвищення рівня безпеки населення та мінімізації потенційних збитків.

Мета роботи – проаналізувати динаміку міських пожеж та ризиків міського населення за останній 15-річний період, а також провести кореляційний аналіз регіональних індексів кількості пожеж техногенного походження та індексів еколого-демографічної урбанізації адміністративних областей. **Новизна роботи** полягає в застосуванні індикаторного методу для оцінювання пожежної ситуації в країні в контексті диференціації урбогенного насичення регіонів.

Методологічне та загальнонаукове значення. Методологічні підходи дослідження базувались на концепції екологічної урбанізації як провідного чинника формування стану природно-техногенної безпеки територій [27, 28]. Поняття екологічної урбанізації як складової комплексного і багатофакторного урбанізаційного процесу розроблена автором чинної статті в попередніх дослідженнях [28, 29]. Екологічна складова урбанізації окреслює сукупність несприятливих процесів і явищ, що поширюються на всю урбанізовану територію, та визначають небезпеки, створені урбогенно-техногенними впливами. Застосування індексу еколого-демографічної урбанізації, який були визначений та розрахований автором в попередніх дослідженнях [28] на основі показників щільності міського населення, частки урбанізованої території регіонів та враховував структуру системи розселення міського населення, дозволяє комплексно враховувати вплив екологічних та демографічних чинників на прояви НС

техногенного походження та ризику для населенню регіонів країни.

Методи дослідження. В дослідженні використані методи статистичного, функціонально-графічного та кореляційного аналізу на основі емпіричної бази даних [5, 6, 30, 31]. Розрахунки параметрів, нормалізація даних та проведення кореляційного аналізу проводилося із використанням середовища Python [32] та підключенням бібліотек Pandas 3.0 [33]. Задля масштабування всіх досліджених даних до діапазону [0, 1], з метою проведення їх аналізу в регіональному розрізі, був застосований метод мінімально-максимальної нормалізації за алгоритмом, представленим автором чинної статті в роботі [34]. При проведенні кореляційного аналізу нормалізованих в діапазоні [0, 1] даних значення коефіцієнта кореляції та рівня статистичної значущості визначали згідно [35].

Викладення основного матеріалу. Визначення основних чинників впливу урбанізації на частоту виникнення пожеж у міських системах. Отже, в сучасних умовах щільного проживання населення в містах існує значний ризик високої інтенсивності пожеж, людських втрат і матеріальних збитків, що обумовлене концентрацією небезпечних виробництв; посиленням ролі міст як осередків кліматичних змін, недоліками міського планування, безсистемною забудовою багатоповерхівками, використанням неякісних будівельних матеріалів. При дослідженні впливу урбанізації на динаміку техногенних пожеж можна виділити низку ключових чинників, які впливають на частоту виникнення пожеж на урбанізованих територіях (табл. 1).

Зазначимо, що в табл. 1 представлені узагальнення, характерні для міських пожеж будь-якої країни світу. Війна в Україні перетворила всю територію країни в зону екологічної катастрофи та створила умови підвищення ризиків як суто техногенних аварій внаслідок руйнації об'єктів техносфери, так й таких, що пов'язані із природними лихами, які ініційовані ушкодженням довкілля. Тож, сполучення фактору урбанізації та військової агресії може призвести тільки до зростання людських жертв в надзвичайних ситуаціях.

Аналіз динаміки міських пожеж та ризиків міського населення. В попередніх дослідженнях [36] на основі вивчення динаміки пожеж техногенного походження за період 1997–2017 рр. було показано, що зростання рівня урбанізації країни з часом підсилювало індивідуальні ризики загибелі на фоні зменшення випадків пожеж. Проте, на рівні урбанізації вище 68%, значення цих показників мали тенденцію до зміни в протилежних напрямках. Різке збільшення загального числа пожеж техногенного характеру, в тому числі, в містах, супроводжувалась падінням показників індивідуальних ризиків загального та міського населення

На основі даних, представлених в [5, 6, 30, 31], був проведений аналітично-графічний аналіз дина-

Таблиця 1

Ключові чинники та характеристики урбанізаційного впливу на ризики техногенних пожеж

№	Чинник впливу	Ефекти чинника	Характер небезпек
1	Збільшення щільності населення	загострює вплив соціальних чинників, в тому числі, активізацію людської діяльності, деструктивну поведінку, злочинність, інше нарощує навантаження на міську інфраструктуру через перевантаження електромереж у житлових, комерційних і промислових об'єктах, підвищену експлуатацію будівель і систем безпеки.	Підвищення ризиків виникнення пожеж, індивідуальних ризиків загибелі населення
2	Збільшення компактності забудов	сприяє поширенню вогню від місця займання ускладнює евакуацію людей і доступ пожежних служб до місця займання	Збільшення масштабів пожеж
3	Промислова активність, Зростання кількості та щільності об'єктів техносфери	розширює кількість техногенних об'єктів, які можуть стати джерелами пожеж, підвищує ймовірність виникнення пожеж через складність устаткування, велику кількість електричних приладів, використання газу та інших горючих матеріалів недотримання норм безпеки, порушення технологічних регламентів, збільшення навантаження активізує ризики вторинних чинників аварій з витоком небезпечних хімічних речовин, які утворюються в процесах горіння	Збільшення частоти та масштабу пожеж Токсичний вплив продуктів горіння на мешканців Забруднення атмосфери
4	Розширення транспортного парку	зростає інтенсивність руху транспорту, кількість автомобілів, навантаження на дорожню інфраструктуру спричиняє аварії через технічні несправності транспортних засобів, які інтенсивно експлуатуються в міських умовах	Автомобільні аварії, пов'язані з займанням транспортних засобів Зростання пожежних ризиків
5	Інфраструктурне зношення	спричиняє аварії через застарілу інфраструктуру, електромережі, системи газопостачання та каналізації, зношеність інженерних мереж та будівель	Збільшення частоти та масштабу пожеж
6	Інтенсивне використання енергії	споживання енергії може спричинити перевантаження електромереж, вибухи газопроводів або пожежі через несправності в електропроводці	Підвищення ризиків виникнення пожеж Примноження матеріальних збитків
7	Кліматичні зміни та екстремальні погодні умови	змінює місцевий мікроклімат, що, в поєднанні з глобальними кліматичними змінами (підвищення температури, посухи), може створювати сприятливі умови для виникнення пожеж (наприклад, теплові хвилі можуть підвищувати ризик виникнення пожеж у міських районах, де відсутня достатня вентиляція і є багато потенційно горючих матеріалів)	Посилення ризиків пожеж в містах та на приміських територіях
8	Скорочення природних зон	порушує природні бар'єри для поширення пожеж зменшує природну можливість абсорбції тепла та диму через втрати зеленої рослинності	Збільшення масштабів пожеж Токсичний вплив продуктів горіння на мешканців Забруднення атмосфери
9	Соціально-економічні чинники	активізують нелегальні забудови підвищують ризик виникнення техногенних пожеж через бідність, відсутність ресурсів для належного утримання будівель і споруд, недотримання норм безпеки серед населення	Підвищення ризиків виникнення пожеж Примноження кількості жертв та матеріальних збитків

Джерело: розроблено автором

міки показників пожеж техногенного походження в містах за період 2009–2023 рр. (не враховані дані тимчасово окупованих територій, територій активних військових дій, та таких, що зазнали впливу російської агресії). Необхідно підкреслити, що динамічні зміни досліджуваних показників відбувались за умови зростання рівня урбанізації країни від 68,5% в 2009 р. до 69,7% в 2022 р. за даним [37].

Представлений в чинній статті огляд досліджень щодо чинників пожеж техногенного походження продемонстрував, що найбільш вагомими причинами виникнення пожеж в урбанізованому середовищі є активізація людської діяльності поряд із зростанням щільності населення. Тому показники кількості пожеж, кількості загиблих та загальної кількості постраждалих у містах (загальна кількість

загиблих та травмованих) за і-й рік приведені за кількістю міського населення в той же рік за формулами:

$$f_{urb_i} = \frac{F_{urb_i}}{N_{urb_i}}; R_{ind.urb_i} = \frac{N_{d.urb_i}}{N_{urb_i}}; R_{eff.urb_i} = \frac{N_{eff.urb_i}}{N_{urb_i}}$$

де: F_{urb_i} – кількість міських пожеж в і-му році;
 N_{urb_i} – чисельність міського населення в і-му році;

f_{urb_i} – питомий показник інтенсивності пожеж за і-й рік;

$N_{d.urb_i}$ – кількість загиблих у міських пожежах за і-й рік;

$N_{eff.urb_i}$ – кількість постраждалих (травмованих та загиблих) містян в міських пожежах за і-й рік;

$R_{ind.urb_i}; R_{eff.urb_i}$ – індивідуальний ризик загинути та ризик постраждати в міських пожежах в і-му році.

Результати графічного аналізу нормалізованих за алгоритмом мінімально-максимальної нормалізації [34] значень параметрів $f_{urb_i}, R_{ind.urb_i}, R_{eff.urb_i}$ представлені на рис. 1. Графічний аналіз динаміки показників за останній 15-річний період з достатнім рівнем кореляції демонструє збереження тенденції зростання показника частоти міських пожеж та зменшення ризиків міського населення. Найвище значення показника f'_{urbi} характеризує максимальну кількість міських пожеж в 2020 р., що співпадає з даними [38] щодо кліматичних змін в Україні. Дійсно, 2020 р. був найтеплішим за останні п'ятдесят років і, ймовірно, за сторіччя, а середньорічна температура склала 10,6°C. Перевищення склало 1,5°C по відношенню до багаторічних значень 1991–2020 років, та 2,8°C відносно 1961–1990 років.

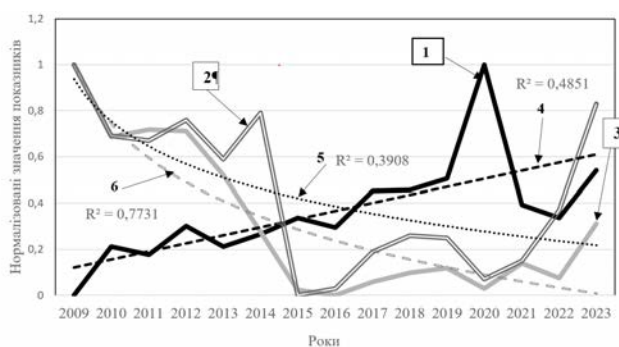


Рис. 1. Динаміка змін питомих параметрів кількості міських пожеж та ризиків міського населення протягом 2009–2023 рр.: 1 – f'_{urbi} ; 2 – $R'_{eff.urb_i}$; 3 – $R'_{ind.urb_i}$; 4 – лінія тренду показнику f'_{urbi} ; 5 – лінія тренду показнику $R'_{eff.urb_i}$; 6 – лінія тренду показнику $R'_{ind.urb_i}$

Таким чином, конкретні прояви збільшення частоти пожеж підтверджують більшу вразливість міст до глобального потепління внаслідок створення «теплових островів» через скупчення будівель, асфальту, бетону та інших матеріалів, які поглинають і утримують тепло, скорочення кількості зелених зон, посилення вітрів і нерегулярність опадів.

Зростання параметру f'_{urbi} не позначилось на ризиках міського населення, при цьому найвищий рівень кореляції ($R^2 = 0,77$) характеризує падіння показника індивідуального ризику як прямий причинно-наслідковий зв'язок з рівнем урбанізації за класифікацією [35]. Тож, окреслимо позитивний вплив урбанізації на зменшення вразливості міського населення внаслідок зростання організаційно-технічного потенціалу рятувних служб, кращого фінансування, впровадження інших заходів щодо запобігання та пом'якшення наслідків пожеж, але

Таблиця 1

Показники пожежної небезпеки та еколого-демографічної урбанізації адміністративних областей України (розраховані автором)

Область	пfi	п'fi	Г'edu	Область	пfi	п'fi	Г'edu
Вінницька	2332	0,16	0,07	Одеська	5290	0,50	0,261
Волинська	1152	0,03	0,30	Полтавська	2140	0,14	0,11
Дніпропетровська	7732	0,77	0,52	Рівненська	1248	0,04	0,013
Донецька	4937	0,46	1	Сумська	1710	0,09	0,17
Житомирська	2605	0,20	0,06	Тернопільська	1199	0,04	0,06
Закарпатська	1626	0,08	0,04	Харківська	5674	0,54	0,35
Запорізька	3763	0,33	0,31	Херсонська	2411	0,17	0,26
Івано-Франківська	2125	0,14	0,30	Хмельницька	1140	0,03	0,31
Київська*	9755	1,0	0,59	Черкаська	1322	0,05	0,13
Кіровоградська	1724	0,095	0,21	Чернівецька	878	0,0	0,08
Луганська	2541	0,19	0,80	Чернігівська	2047	0,13	0,054
Львівська	3039	0,24	0	АР Крим	Немає даних		
Миколаївська	2652	0,20	0,261				

Примітка*: дані Київської області враховують дані м. Київ

них ситуацій, з урахуванням широкої урбаністичної перспективи країни при відбудові зруйнованих та будівництві нових населених пунктів, відновленні промислових та інфраструктурних об'єктів, вирішенні питань розселення населення. Результати встановлених закономірностей динаміки змін показників небезпек міських пожеж в залежності від наслідків

урбанізації та глобальних кліматичних змін доцільно використовувати при формуванні стратегії попередження та пом'якшення наслідків техногенних аварій. Інтеграція чинника урбанізації в стратегічне планування безпекових заходів позитивно позначиться на стійкості міської системи, її здатності оперативного реагувати на ризики та зменшити вразливість населення.

Література

1. International Association of Fire and Rescue Services (CTIF). Center for World Fire Statistics. URL: <https://www.ctif.org/commissions-and-groups/ctif-center-world-fire-statistics> (дата звернення: 19.08.2024).
2. World Fire Report № 29. URL: https://www.ctif.org/sites/default/files/2024-06/CTIF_Report29_ERG.pdf (дата звернення: 20.08.2024).
3. U.S. Fire Statistics (2021) URL: <https://www.usfa.fema.gov/statistics/> (дата звернення: 20.08.2024).
4. Liu Z.-G., Li X.-Y., Grunde J. Effects of governmental data governance on urban fire risk: A city-wide analysis in China, *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2022. Vol. 78. 103138. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103138>.
5. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 7 місяців 2024 року. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/2/1/8/1/7/3/2/analitichna-dovidka-pro-rozejji-072024.pdf> (дата звернення: 29.08.2024).
6. Статистика пожеж: аналітичні матеріали. Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту. URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/statistika-pozhezh/analitichni-materiali> (дата звернення: 20.08.2024).
7. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28.02.2019 № 2697-VIII / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> [Дата звернення 9.09. 2024].
8. Про стратегічну екологічну оцінку: Закон України від 01.01.2020 № 2354-VIII / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2354-19#Text> [Дата звернення 9.09. 2024].
9. Corcoran J., Higgs G., Higginson Angela. Fire incidence in metropolitan areas: A comparative study of Brisbane (Australia) and Cardiff (United Kingdom). *Applied Geography*. 2011. Vol. 31, Issue 1. P. 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.02.003>.
10. Asgary, A., Ghaffari, A., Levy, J. Spatial and temporal analyses of structural fire incidents and their causes: A case of Toronto, Canada. *Fire Safety Journal*. 2010. Vol. 45(1). P. 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.10.002>
11. Bispo R., Vieira F. G., Bachir N., et al. Spatial modelling and mapping of urban fire occurrence in Portugal. *Fire Safety Journal*. 2023. Vol. 138. 103802. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103802>.
12. Priya S., Chandra S., Vijay K. Hotspot Analysis of Structure Fires in Urban Agglomeration: A Case of Nagpur City, India. *Fire*. 2021. Vol. 4. 38. <https://doi.org/10.3390/fire4030038>.
13. Price O., Bradstock Ross. Countervailing effects of urbanization and vegetation extent on fire frequency on the Wildland Urban Interface: Disentangling fuel and ignition effects. *Landscape and Urban Planning*. 2014. Vol. 130. P. 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.06.013>.
14. Mali M., Hubert J., Schweitzer A., Giam X., Pape M. Contrasting effects of urbanization and fire on understoryplant communities in the natural and wildland–urbaninterface. *Ecosphere*. 2023. Vol. 14. 4520. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4520>
15. Peltzer M., Cuzziol Boccioni A. P., Lorenzón R. E. Effects of Man-Made Fires on Wetlands of the Parana River in Argentina: Perspectives of Ecological Restoration. *Oecologia Australis*. 2023. Vol. 27(4). P. 344–357. <http://doi.org/10.4257/oeco.2023.2704.01>
16. Соціально-економічний аналіз надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру / Волошин С.М., Жарова Л.В., Хлобистов Є.В., Чебанов О.А. / За науковою ред. проф. Хлобистова Є.В. Сімферополь: НАН України, НДІ СРП. 2010. 258 с.
17. Долженкова О.В., Іванківа В.І. Динаміка економічних втрат України від пожеж. «Молодий вчений» 2018. № 12 (64). С. 610–613.
18. Чубань В.С., Горбаченко Ю.М. Еколого-економічні наслідки пожеж у природних екосистемах. *Центральноукраїнський науковий вісник. Економічні науки*. 2019. Вип. 2(35). С. 62–68.
19. Несенюк Л.П., Савченко О.В., Ніжник В.В., Нікулін О.Ф. Методи оцінювання ефективності функціонування систем протипожежного захисту. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2(14). С. 134–142.
20. Мартин О.М. Пожежна безпека як складник національної безпеки: концептуальний підхід до її визначення. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2017. Вип. 15(2). С. 10–13.
21. Бібік С., Григоренко А. Сучасний стан і рівень пожежної безпеки в Україні. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції Прикладні науково-технічні дослідження, Івано-Франківськ, Україна, 5-7 квітня 2021 року С. 408–411.
22. Vasutynska K., Smyk S., Ivanov O., Shevchuk I. Visualization of the pool fire action zones with using Mapinfo GIS for the number of filling stations of the Odessa (Ukraine) residential district. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. No 1/3 (39). p. 30–40. <https://10.15587/2312-8372.2018.124241>.
23. Осадчий В., Орещенко, А., Савенець М. Супутниковий моніторинг пожеж і забруднення атмосферного повітря монографія. Київ: ДСНС України, НАН України, УкрГМІ. 2023. 256 с
24. Гуліда Е. М., Войтович Д. П., Мовчан І. О. Потік пожеж та їх одночасність у містах. *Пожежна безпека*. 2017. № 31. С. 30–35. URL: <https://journal.ldubgd.edu.ua/index.php/PB/article/view/101>
25. Мартин О.М., Завада О.П. Пожежна та економічна безпека в Україні, їх взаємозв'язок: регіональні аспекти. *Глобальні та національні проблеми економіки: електронне наукове видання*. 2016. № 11. С. 17–22.
26. Супрович М. П., Шутяк О.В. Структурний аналіз чисельності пожеж в Україні. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Сільськогосподарські науки*. 2022. Вип. 1(36) С. 36–45. <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2022-15>

27. Васютинська К.А., Барбашев С.В. Оцінка ризиків надзвичайних ситуацій в регіонах України під впливом урбанізаційного процесу. *Екологічні науки*. 2020. № 5(32). С. 51–57. I <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.5-32.8>
28. Васютинська К.А., Барбашев С.В. Індикаторна оцінка впливу урбанізаційного процесу на стан природної та техногенної безпеки в регіонах України. *Sustainable development: environmental protection. Energy saving. Balanced nature management*: колект. монографія. Львів, 2020. С. 232–255. book doi: <https://10.23939/book.ecocongress.2020> <http://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2020/dec/22708/monograph2020.pdf>
29. Васютинська К.А., Барбашев С.В., Кімінчиджи М.І. Оцінка комплексного показника екологічної урбанізації регіонів України. *Екологічні науки*. 2020. № 3(30). С. 7–14. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.1>.
30. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2009–2012 роки: Статистичний збірник аналітичних матеріалів. За загальною редакцією В.С. Кропивницького. К.: УкрНДІЦЗ, 2018. 102 с. [Електронний ресурс] URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/6/2/1/8/0/0/Eoea1aBkV09QuQ86fGbFq3vnZypB4pLRCTU1RnVz.pdf> (дата звернення: 10.08.2024).
31. Статистика пожеж та їх наслідків в Україні за 2013–2016 роки: Статистичний збірник аналітичних матеріалів. За загальною редакцією В.С. Кропивницького. К.: УкрНДІЦЗ, 2018. 100 с. [Електронний ресурс] URL: <https://idundcz.dsns.gov.ua/upload/6/2/1/7/9/9/NqqqHaNp71KbJEw1YpwlByrmjrrKDbGJFMhsTjBK.pdf> (дата звернення: 10.08.2024).
32. Install Python support in Visual Studio/Article 04/18/2024. [Електронний ресурс] URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/visualstudio/python/installing-python-support-in-visual-studio?view=vs-2022> (дата звернення: 03.08.2024).
33. Pandas 3.0. Installation. [Електронний ресурс] URL: https://pandas.pydata.org/pandas-docs/dev/getting_started/install.html (дата звернення: 03.08.2024).
34. Vasutynska K.A., Barbashev S.V. Analysis of urbanization impact on the dynamics of emergencies and risks for population in Ukraine. *Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi*. 2018. No 2(55). P. 137–144.
35. Теорія статистики: навчальний посібник / М.К. Шапочка, О.М. Маценко. Суми. 2014. 312 с.
36. Vasutynska K. Barbashev S. Analysis of dynamics of man-made fires in conditions of urbanization in Ukraine. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. Vol. 4. No 3(42). p. 16–23. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141376>.
37. Державна служба статистика України. [Електронний ресурс] URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (Дата звернення 22.08. 2024).
38. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України: Національні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoring/natsionalni-dopovidi-pro-stand-navkolyshnogo-pryrodnogo-seredovyshha-v-ukrayini/> (Дата звернення 12.09. 2024).

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

УДК 502.3:613.15:519.246

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.2>

ОГЛЯД СТАНУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ МІСТА ОДЕСА ЗА ДАНИМИ МАРШРУТНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Бургаз О.А., Гарабазій Т.А., Тимошук М.О.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Львівська, 15, 65016, м. Одеса

alexburgaz84@gmail.com

Одеса одне з найбільших міст України, важливий транспортний, індустріальний, науковий, культурний і курортний центр з населенням 1013,4 тис. осіб. Всебічне дослідження екологічного стану атмосферного повітря міста Одеса є задачею вкрай актуальною. Вона не може бути вирішена без ретельного і всебічного вивчення характеру забруднення повітряного басейну шкідливими домішками.

В роботі були використані дані спостережень концентрацій забруднюючих речовин, які вимірювались пересувною муніципальною лабораторією в 24-ох затверджених точках контролю агломерації Одеса за кожен місяць 2021 року.

Спостереження пересувною лабораторією проводяться для отримання об'єктивної оцінки про забруднення атмосферного повітря. Разом з тим, результати таких вимірювань потребують всебічного критичного осмислення, оскільки виникає проблема значного обмеження довжини рядів маршрутних спостережень. Це, в свою чергу, робить неможливим розрахунок статистичних показників забруднення атмосферного повітря згідно діючих нормативних документів. З іншого боку, результати маршрутних спостережень дають змогу оцінки екологічного стану повітря в районах де відсутні стаціонарні пости спостережень.

Проведена перевірка статистичних характеристик рядів спостережень дає змогу стверджувати, про їх відповідність вимогам достовірності (надійності). Висновок про достовірність робилася на основі порівняння відношення величини статистичного показника до його помилки репрезентативності з t – критерієм. В якості t – критерію використовується критерій Стюдента.

За результатами вимірювань вмісту забруднюючих речовин у 2021 році зафіксовані перевищення ГДК_{мр} вмісту оксиду вуглецю. Перевищення фіксуються у лютому-березні та наприкінці осені – початку зими.

Перевищень концентрацій пилу та діоксиду сірки в атмосферному повітрі у 2021 році не зафіксовано.

Основним джерелом надходження забруднювачів в повітря можна вважати автотранспорт. При цьому значну роль у накопиченні або розсіюванні домішок в атмосфері відіграють метеорологічні умови. Особливо явно це проявляється у розподілі вмісту пилу у повітрі. *Ключові слова:* атмосферне повітря, забруднення, моніторинг, маршрутний пост, пил, оксид вуглецю, діоксид сірки.

Overview of the atmospheric air pollution state in the Odesa according to the route observations data. Burhaz O., Harabazhii T., Timoshchuk M.

Odesa is one of the largest cities of Ukraine, an important transport, industrial, scientific, cultural and resort center with a population of 1,013,400 people. A comprehensive study of the atmospheric air ecological state in Odesa is an extremely urgent task. It cannot be solved without a thorough and comprehensive study of the air pollution character by harmful impurities.

The paper used the observations data of pollutants concentrations, which were measured by a mobile municipal laboratory at 24 approved control points of the Odesa agglomeration for each month of 2021.

Observations by a mobile laboratory are conducted to obtain an objective assessment of atmospheric air pollution. At the same time, the results of such measurements require a comprehensive critical understanding, as there is a problem of significantly limiting the length of the series of route observations. This, in turn, makes it impossible to calculate statistical indicators of atmospheric air pollution in accordance with current regulatory documents. On the other hand, the results of route observations make it possible to assess the ecological state of the air in areas where there are no stationary observation posts.

The conducted verification of the statistical characteristics of the observations series makes it possible to assert that they meet the requirements of reliability. The conclusion about reliability was made on the basis of comparing the ratio of the statistical indicator value to its representativeness error with the t -criterion. Student's criterion is used as the t -criterion.

According to the results of measurements of the pollutants content in 2021, the exceedance of the maximum permissible limit for the content of carbon monoxide was recorded. Excesses are recorded in February-March and at the end of autumn-beginning of winter.

No excesses of dust and sulfur dioxide concentrations in atmospheric air were recorded in 2021.

Motor vehicles can be considered the main source of pollutants entering the air. At the same time, meteorological conditions play a significant role in the accumulation or dispersion of impurities in the atmosphere. This is especially evident in the distribution of dust content in the air. *Key words:* atmospheric air, pollution, monitoring, route post, dust, carbon oxide, sulfur dioxide.

Актуальність дослідження. Одеса одне з найбільших міст України, важливий транспортний, індустріальний, науковий, культурний і курортний центр з населенням 1013,4 тис. осіб [1].

Сьогодні місто знаходиться в зоні потужного антропогенного впливу. Така ситуація складається внаслідок незбалансованого використання природних ресурсів в останні десятиліття. Особливістю районів рекреаційного господарства є близькість розташування об'єктів енергетичного і нафтоперевалочного комплексів і транспортних магістралей [2].

На основі порівняння індексу забруднення атмосферного повітря у 2021 році для міст України, де проводять спостереження гідрометеорологічні організації, Одеса займає четверте місце серед найзабрудненіших міст України [3].

Таким чином, всебічне дослідження екологічного стану атмосферного повітря міста Одеса є задачею вкрай актуальною. Вона не може бути вирішена без ретельного і всебічного вивчення характеру забруднення повітряного басейну шкідливими домішками.

Мета роботи. Дослідження стану забруднення атмосферного повітря м. Одеса діоксидом сірки (SO_2), оксидом вуглецю (CO) та пилом.

Методи дослідження. В роботі були використані дані спостережень концентрацій забруднюючих речовин, які вимірювались пересувною муніципальною лабораторією в 24-ох затверджених точках контролю агломерації Одеса за кожен місяць 2021 року. Спостереження за концентраціями забруднювачів проводяться КП «Муніципальний центр екологічної безпеки» Одеської міської ради.

Спостереження пересувною лабораторією проводяться для отримання об'єктивної оцінки про забруднення атмосферного повітря, в затверджених точках контролю, розташованих на перетині транспортних магістралей міста, на кордонах санітарно-захисних зон потенційно небезпечних об'єктів м. Одеси, в прибережній зоні, а також в парках і скверах, з автоматичним відбором проб і вимірами концентрацій газоаналізаторами. В кожній точці спостережень пересувна муніципальна лабораторія, проводить від 2 до 6 відборів проб атмосферного повітря на місяць згідно до затвердженого плану. Дані представляють собою осереднені значення вимірювань концентрацій забруднювачів.

Надання надійної оцінки стану атмосферного повітря вимагає проведення значної кількості спостережень за вмістом забруднюючих речовин. Так згідно [4], для визначення середньомісячних концентрацій забруднювачів необхідно, як мінімум, 20 середньодобових чи разових концентрації, отриманих протягом місяця. Однак перед нами постає проблема обмеженості набору результатів спостереження за параметрами навколишнього середовища. В такому випадку виникає питання можливості їх використання.

Використання обмежених рядів спостережень можливо після оцінки їх достовірності. Серед мето-

дів оцінки достовірності розрізняють параметричні і непараметричні.

Як параметричні, так і непараметричні методи, які використовувались для порівняння результатів досліджень, тобто для порівняння вибірових сукупностей, полягають у застосуванні певних формул і розрахунку певних показників у відповідності із запропонованими алгоритмами. У кінцевому результаті вираховується певна числова величина, яку порівнюють з табличними пороговими значеннями. Критерієм достовірності буде результат порівняння отриманої величини і табличного значення при даному числі спостережень (або ступенів свободи) і при заданому рівні безпомилкового прогнозу.

Таким чином, у статистичній процедурі оцінки основне значення має отриманий критерій достовірності, тому сам спосіб оцінки достовірності в цілому іноді називають тим чи іншим критерієм за прізвиськом автора, який запропонував його в якості основи методу [5, 6].

Одиниці вибіркової сукупності (варіанти) повинні бути відібрані так, щоб по них з достатньою точністю можна було судити про властивості генеральної сукупності. Найчастіше в дослідженнях проводиться відбір так званих «типових» представників генеральної сукупності. Такий підхід суб'єктивний і не може служити основою отримання якісної інформації. Задана точність у характеристиці генеральної сукупності забезпечується випадковим відбором необхідної кількості варіант [7].

На початковому етапі перевірки достовірності отриманої інформації розраховуються її статистичні характеристики. До таких характеристик відносяться середнє арифметичне ряду, середньоквадратичне відхилення.

Середня величина сукупності розраховується за формулою:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

де: x_i – члени вибірки; n – об'єм вибірки.

Середньоквадратичне відхилення (СКВ) – основний показник варіації, що характеризує варіювання значень ознаки навколо центру розподілу, визначається за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (2)$$

Після визначення статистичних параметрів вихідного ряду даних здійснюється розрахунок помилок репрезентативності.

Помилка середньої величини обчислюється за формулою:

$$m_x = + \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (3)$$

Помилка стандартного відхилення обчислюється за формулою

$$m_{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{2n}}. \quad (4)$$

Достовірність статистичних показників (надійність) є відношення величини статистичного показника до його помилки репрезентативності. Висновок про достовірність того чи іншого показника робиться на основі порівняння отриманого відношення з t – критерієм: якщо відношення більше t – критерію то статистичний показник достовірний.

В якості t – критерію використовується критерій Стюдента, що визначається за таблицями виходячи з числа ступенів свободи ($n-1$) і рівня значущості (ступеня ймовірності безпомилкового прогнозу) [8, 9]. Значення t – критерію дорівнює 2,201 для вибірок з 11 членів та 2,228 для вибірок з 10 членів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню стану забрудненості атмосферного повітря міст України в наукових публікаціях присвячено багато уваги [2, 11–14]. У них застосовуються різні методологічні підходи, в тому числі системний аналіз інформації про рівні концентрацій забруднюючих речовин, що вимірюються на постах спостереження за забрудненням атмосферного повітря (ПСЗ) мережі державного моніторингу атмосферного повітря населених пунктів України.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в рамках НДР «Дослідження відповідності значення ІЗА екологічному стану атмосферного повітря міста» за номером Державної реєстрації 0122U200764. Тематика дослідження є основним та багаторічним науковим напрямом діяльності кафедри екологічного права і контролю Одеського національного університету ім. І. І. Мечникова.

Результати досліджень. У дослідженні, використовувались дані спостережень концентрацій (q) забруднюючих речовин, що вимірювались пересувною муніципальною лабораторією. Мережа точок спостереження наводиться на рисунку 1. У січні 2021 року спостереження не проводились. На деяких з точок (1–4 та 17–24) спостереження у червні також не проводились. Враховуючи це, об'єми вибірок (n) у 2021 році складають 10–11 членів.

У табл. 1 приведені результати оцінок достовірностей статистичних характеристик рядів спостережень за концентраціями CO, пилу та SO₂. Перевірка достовірності проводилася за описаною вище методикою.

Результати розрахунків дають змогу стверджувати, що статистичні характеристики рядів спостережень відповідають вимогам їх достовірності (надійності). Розраховані значення надійності математичного сподівання та середнього квадратичного відхилення в усіх випадках перевищують значення t – критерію. Таким чином, ми робимо висновок, що ряди виміряних концентрацій забруднювачів можуть

з достатньою надійністю характеризувати стан атмосферного повітря в районі точок спостережень.

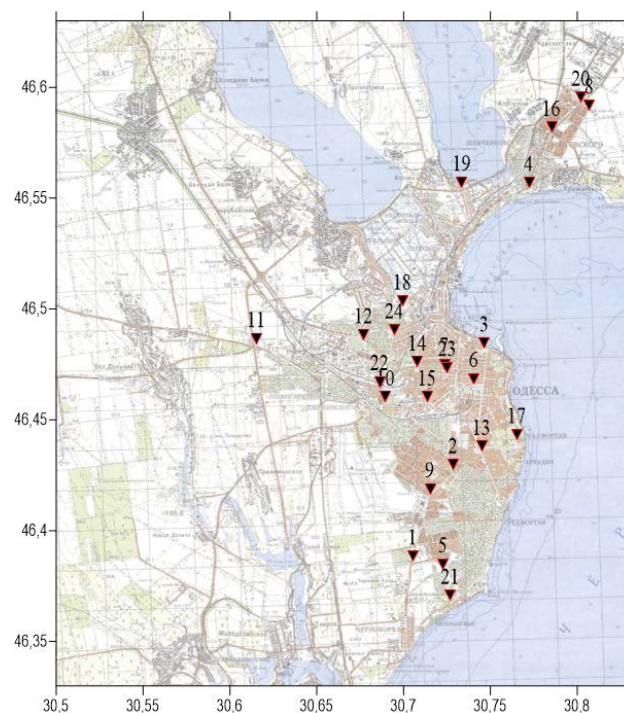


Рис. 1. Точки відбору проб атмосферного повітря пересувною муніципальною лабораторією

Оскільки, згідно [4], кількість проведених вимірів не дозволяє визначити середньомісячні концентрації, осереднені значення вмісту забруднюючих речовин більш коректно порівнювати з ГДК максимально – разовими (ГДК_{мр}). Для пилу ГДК_{мр} становить 0,5 мг/м³, оксиду вуглецю – 5 мг/м³, діоксиду сірки – 0,5 мг/м³ [15].

Стан забруднення атмосфери міста оксидом вуглецю. Оксид вуглецю відноситься до переліку найпоширеніших забруднюючих речовин, викиди яких в атмосферне повітря підлягають регулюванню [16]. За даними [17], в атмосферному повітрі міста спостерігається загальне зменшення концентрації CO, а його надходження пов'язане, в першу чергу, з автотранспортом.

На рис. 2 представлені часові зміни концентрації оксиду вуглецю в точках моніторингу. Як видно з рисунку, CO характеризується досить значними концентраціями від 3 до 6,5 мг/м³. Найбільші концентрації спостерігалися в районі точки 6 – Залізничний вокзал у серпні (6 мг/м³) та листопаді-грудні (6,2 та 6,5 мг/м³).

Перевищення ГДК_{мр} фіксуються також в районі площі Толбухіна в грудні (точка 2), в районі точки 13 (5 ст. Великого Фонтану) у березні та листопаді, а також автовокзалу (точка 14) в лютому та з серпня по грудень.

Слід зазначити, що райони перевищення концентрацій CO нормативних значень – це досить навантажені транспортом ділянки автошляхів міста.

Таблиця 1

Результати розрахунків статистичних характеристик рядів даних вмісту забруднюючих речовин в точках спостережень (Одеса, 2021 р.)

Номер точки	n	СО				Пил				SO ₂			
		m_x	m_σ	достов. середнього	достов. СКВ	m_x	m_σ	достов. середнього	достов. СКВ	m_x	m_σ	достов. середнього	достов. СКВ
1	10	0,11	0,075	38,51	4,47	0,011	0,0078	5,99	4,47	0,002	0,0010	29,49	4,47
2	10	0,19	0,137	23,41	4,47	0,003	0,0024	10,05	4,47	0,002	0,0017	17,84	4,47
3	10	0,11	0,077	35,86	4,47	0,004	0,0028	8,72	4,47	0,004	0,0031	10,86	4,47
4	10	0,05	0,039	56,52	4,47	0,002	0,0016	9,44	4,47	0,002	0,0010	23,84	4,47
5	11	0,21	0,146	20,41	4,69	0,001	0,0006	32,92	4,69	0,001	0,0005	55,22	4,69
6	11	0,20	0,141	26,33	4,69	0,005	0,0038	5,86	4,69	0,002	0,0014	22,74	4,69
7	11	0,12	0,084	30,48	4,69	0,006	0,0039	8,56	4,69	0,001	0,0009	33,41	4,69
8	11	0,20	0,143	16,71	4,69	0,004	0,0030	9,1	4,69	0,001	0,0010	30,39	4,69
9	11	0,19	0,134	19,87	4,69	0,005	0,0035	7	4,69	0,001	0,0008	35,08	4,69
10	11	0,06	0,041	68,70	4,69	0,007	0,0049	7,3	4,69	0,003	0,0023	16,63	4,69
11	11	0,16	0,117	25,42	4,69	0,008	0,0059	6,372	4,69	0,002	0,0011	31,93	4,69
12	11	0,11	0,076	40,11	4,69	0,009	0,0066	5,12	4,69	0,002	0,0014	23,26	4,69
13	11	0,14	0,098	35,07	4,69	0,008	0,0059	6,2	4,69	0,002	0,0014	25,70	4,69
14	11	0,17	0,124	29,67	4,69	0,009	0,0062	6,13	4,69	0,002	0,0010	33,32	4,69
15	11	0,13	0,090	31,45	4,69	0,008	0,0058	6,07	4,69	0,003	0,0020	18,29	4,69
16	11	0,11	0,079	37,77	4,69	0,007	0,0051	6,23	4,69	0,006	0,0042	9,03	4,69
17	10	0,17	0,123	18,24	4,47	0,005	0,0035	6,79	4,47	0,004	0,0025	11,60	4,47
18	10	0,11	0,081	34,66	4,47	0,006	0,0043	6,9	4,47	0,002	0,0013	26,98	4,47
19	10	0,08	0,056	38,38	4,47	0,004	0,0028	6,99	4,47	0,002	0,0017	15,46	4,47
20	10	0,13	0,092	31,54	4,47	0,011	0,0075	4,56	4,47	0,006	0,0043	9,60	4,47
21	10	0,07	0,052	52,64	4,47	0,006	0,0044	5,97	4,47	0,002	0,0016	18,92	4,47
22	10	0,13	0,094	33,00	4,47	0,010	0,0071	5,05	4,47	0,001	0,0010	32,83	4,47
23	10	0,16	0,110	25,06	4,47	0,008	0,0055	5,49	4,47	0,002	0,0012	28,01	4,47
24	10	0,10	0,073	38,03	4,47	0,007	0,0050	6,75	4,47	0,002	0,0011	28,06	4,47

Звертає на себе увагу різке зниження вмісту СО у жовтні в районах розташування точок 5, 7, 8, 9, 17, 18, 23 та 24. Чим обумовлене таке зниження, наразі потребує подальшого дослідження, оскільки точки розташовуються в різних районах міста з різними умовами накопичення та розсіювання домішок.

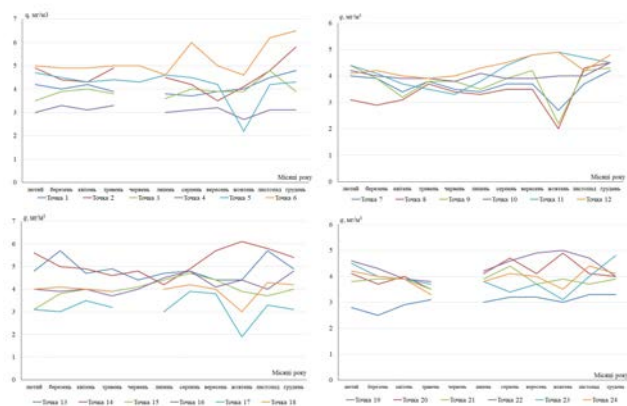


Рис. 2. Концентрації СО в точках спостережень (Одеса, 2021)

Стан забруднення атмосфери міста пилом. На рисунку 2 представлені часові зміни вмісту пилу в атмосферному повітрі міста Одеса.

Розглядаючи рисунок, можна дійти висновку, що на запиленість атмосфери міста суттєво впливають метеорологічні умови. Як бачимо, найбільші концентрації пилу спостерігаються в теплий сухий період року – з середини весни до кінця осені.

В цілому по місту спостерігаються значення вмісту пилу від 0,011 до 0,111 мг/м³, тобто від 0,02 ГДК_{мр} до 0,22 ГДК_{мр}.

Досить незвичайними є зміни концентрацій пилу в районі точки 8 та точки 9. Незважаючи на те, що це діаметрально протилежні райони міста, зміни вмісту пилу тут відбуваються майже синхронно. Причому величини концентрацій пилу також співставні.

Стан забруднення атмосфери міста діоксидом сірки. Часові особливості змін концентрації SO₂ можна бачити на рис. 4.

Аналізуючи рисунок, слід відмітити, що вміст SO₂ на усіх точках спостережень в усі сезони року не перевищує ГДК_{мр} і коливаються в межах від 0,04 ГДК_{мр} (точка 17, жовтень) до 0,17 ГДК_{мр} (точка 3 в серпні, точка 16 у грудні, точка 20 у вересні).

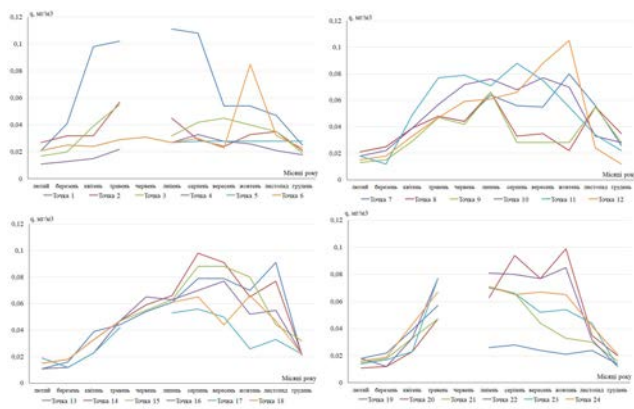


Рис. 3. Концентрації пилу в точках спостережень (Одеса, 2021)

З точки зору забруднення атмосферного повітря міста Одеса діоксидом сірки, ситуація досить складна. Слід враховувати, що спостереження відбувались в різних районах міста, в різні проміжки часу, а отже з різними умовами накопичення/розсіювання домішок. Такі особливості суттєво ускладнюють аналіз екологічного стану повітря.

Так ми можемо бачити синхронні зміни концентрації SO_2 в районі точок 16 та 17 незважаючи на те, що точка 16 розташовується в районі крупного перехрестя навантажених автодоріг, а точка 17 у прибережній частині міста (Французький бульвар, 85), де відсутні промислові підприємства і крупні автошляхи.

З огляду на рисунок 4, доцільно зазначити, що з лютого по травень зміни концентрації SO_2 атмосфері міста в усіх точках спостережень відбуваються подібно. Починаючи з червня розбіжність концентрацій діоксиду сірки в різних районах міста стають досить значущими.

Висновки. Спостереження пересувною лабораторією проводяться для отримання об'єктивної оцінки про забруднення атмосферного повітря. Разом з тим, результати таких вимірювань потребують всебічного критичного осмислення, оскільки виникає проблема значного обмеження довжини рядів маршрутних спостережень. Це, в свою чергу, унеможливає розрахунок статистичних показників забруднення атмосферного повітря згідно діючих нормативних документів. З іншого боку, результати маршрутних спостережень дають змогу оцінки еко-

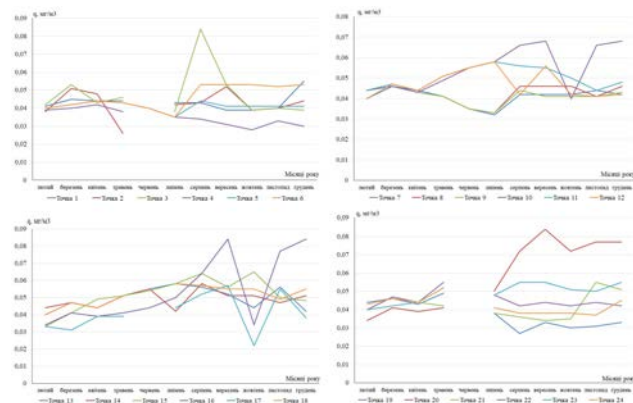


Рис. 4. Концентрації SO_2 в точках спостережень (Одеса, 2021)

логічного стану повітря в районах де відсутні стаціонарні пости спостережень.

В роботі, нами було використані дані маршрутних спостережень за станом забруднення атмосферного повітря міста Одеса у 2021 році. Вимірювання концентрацій забруднюючих речовин в 2021 році проводилися на 24 точках. Проведена перевірка статистичних характеристик рядів спостережень дає змогу стверджувати, про їх відповідність вимогам достовірності (надійності).

За результатами вимірювань вмісту забруднюючих речовин у 2021 році зафіксовані перевищення ГДК_{мр} вмісту оксиду вуглецю. Перевищення фіксуються у лютому-березні та наприкінці осені-початку зими.

Перевищення концентрацій пилу та діоксиду сірки в атмосферному повітрі у 2021 році не зафіксовано.

Основним джерелом надходження забруднювачів в повітря можна вважати автотранспорт. При цьому значну роль у накопиченні або розсіюванні домішок в атмосфері відіграють метеорологічні умови. Особливо явно це проявляється у розподілі вмісту пилу у повітрі.

Перспективи використання результатів дослідження. На нашу думку, використання результатів маршрутних спостережень для діагностування екологічного стану атмосферного повітря населених місць має значні перспективи. Для міста Одеса це є актуальним з огляду на необхідність реформування діючої системи стаціонарних постів спостереження за забрудненням атмосферного повітря. Маршрутні пости спостережень наразі охоплюють райони міста в яких стаціонарні пости відсутні.

Література

1. Паспорт Одеської області. 2021 рік. URL: https://oda.od.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/pasport_odeskoyi_oblasti_za_2021_rik.pdf
2. Владимірова О.Г, Бургаз О.А., Тимошук М.О. Особливості забруднення атмосферного повітря м. Одеси діоксидом сірки й оксидом вуглецю. *Екологічні науки*. Вип. 1 (34). 2021. С. 44–50. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.7-34.8>.
3. 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>
4. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Москва: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, Министерство здравоохранения СССР. 1991. 556 с.

5. Єременко В.С., Куц Ю.В., Мокійчук В.М., Самойліченко О.В. Статистичний аналіз даних вимірювань: навч. посіб. К. НАУ. 2013. 320 с.
6. Бургаз О.А., Верлан В.А., Тітяпкин А.С. Оцінка надходження забруднюючих речовин у Чорне море зі стоком головних річок. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія Географічні науки*. Вип. 8. 2018 р. С. 164–168.
7. Жлуктенко В.І., Наконечний С.І., Савіна С.С. Теорія ймовірностей і математична статистика: навч.-метод. посіб. У 2 ч. Ч. II. Математична статистика К. КНЕУ. 2001. 336 с.
8. Бургаз О.А., Верлан В.А., Тітяпкин А.С. Оцінка надходження забруднюючих речовин в Чорне море зі стоком річки Дунай. *Молодий вчений*. Херсон, 2017. № 9. С. 38–42.
9. Горват А.А., Молнар О.О., Мінькович В.В. Методи обробки експериментальних даних з використанням MS Excel: Навчальний посібник. Ужгород. Видавництво УжНУ «Говерла». 2019. 182 с.
10. Лосва І.Д., Владимирова О.Г., Верлан В.А. Оцінка стану забруднення атмосферного повітря великого міста: методи аналізу, прогнозу, регулювання: монографія. Одеса: Екологія, 2010. 224 с.
11. Бургаз О.А., Недострелова Л.В., Самойленко В.О. Забруднення атмосферного повітря міста Одеса формальдегідом. Огляд сучасного стану. *Матеріали Четвертої Всеукраїнської наукової конференції «Євроінтеграція екологічної політики України»*. 25 жовтня 2022 р. м. Одеса, Україна, С. 231–235. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/10944>.
12. Салій І.В., Риженко Н.О., Засельський В.Й., Пополов Д.В. Дослідження та шляхи поліпшення екомоніторингу в місті Кривий Ріг. *Екологічні науки*. 2020. № 5(32). С. 16–23.
13. Чугай А.В., Чернякова О.І, Гречанко Е.Р. Забруднення повітряного басейну міст Полтавської області. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2020. Вип. 5-6/(124-125). С. 51–56.
14. Лосва І.Д., Снісаренко В.В. Часові зміни концентрації діоксиду азоту в атмосферному повітрі м. Одеса. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія Географічні науки*. 2017. Вип. 7. С. 173–178.
15. Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 14 січня 2020 р. № 52. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-20#Text>.
16. Про затвердження переліку найбільш поширених і небезпечних забруднюючих речовин, викиди яких в атмосферне повітря підлягають регулюванню: Постанова Кабінету Міністрів України від 29 листопада 2001 р. N 1598. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1598-2001-%D0%BF#Text>.
17. Просторово-часова оцінка і діагноз стану забруднення атмосферного повітря м. Одеса. Звіт про НДР. № держреєстрації 0117U002426. Одеса. ОДЕКУ. 2020 р. 115 с. URL: <http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9551>.

УДК 621.313

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.3>

ДРОН ДЛЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ СТАНУ 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 сучасних проблем у сфері екології однією з домінуючих є моніторинг стану різноманітних водойм, який традиційно здійснюють шляхом забору води для подальшого лабораторного аналізу. Однак застосування для виконання вказаного завдання моторних надводних засобів не тільки не сприяє об'єктивності взяття проб води, а й шкодить навколишньому водному середовищу, оскільки робота двигунів внутрішнього згорання супроводжується викидами продуктів згорання палива. Найбільш негативні наслідки застосування таких плаваючих засобів, як моторні човни чи катери, мають місце при заборах проб води у важкодоступних місцях водойм, що поросли надводною рослинністю, наприклад очеретом, осокою, чагарником водяного горіха тощо. В той же час, все більшу популярність набувають приклади застосування для моніторингу стану водойм безпілотних літальних апаратів у вигляді квадрокоптерів чи мультикоптерів, відомих під загальною назвою дронів, які надають можливість альтернативного вирішення означеної проблеми. У запропонованій статті завдання підвищення об'єктивності забору проб води вирішується на основі двох аспектів: інженерного та наукового. До першого з них належить принципово нове проєктне рішення технологічного оснащення дрону на основі застосування підвісу Кардана для встановлення на ньому батометра – пристрою для забору проб води. До другого, наукового аспекту, відносяться вперше розроблені кінематична та динамічна моделі руху батометра та отримані графоаналітичні залежності кінематичного аналізу, які надають можливість інженерам та науковцям створювати аналогічне технологічне оснащення дронів для моніторингу стану водойм залежно від інших виробничих завдань в даній галузі. В кінцевому підсумку результати проведених досліджень спрямовані на розвиток створення екологічно чистого встаткування у вигляді безпілотного літального апарату, який призначений для моніторингу стану різноманітних водойм. *Ключові слова:* безпілотні літальні апарати, квадрокоптер, пристрої для відбору проб води, батометри, моніторинг водойм.

Drone for environmental monitoring of water reservoirs. Polishchuk M., Rolik O.

Among the modern problems in the field of ecology, one of the dominant ones is the monitoring of the condition of various water bodies, which is traditionally carried out by taking water for further laboratory analysis. However, the use of motorized surface vehicles for the specified task not only does not contribute to the objectivity of water sampling, but also harms the surrounding water environment, since the operation of internal combustion engines is accompanied by emissions of fuel combustion products. The most negative consequences of the use of such floating devices as motor boats occur when taking water samples in hard-to-reach places of water bodies overgrown with surface vegetation, for example, reeds, sedges, water walnut bushes, etc. At the same time, examples of the use of unmanned aerial vehicles in the form of quadcopters or multicopters, commonly known as drones, which provide an alternative solution to the problem, are becoming increasingly popular. In the proposed article, the task of increasing the objectivity of water sampling is solved on the basis of two aspects: engineering and scientific. The first of them includes a fundamentally new project solution for the technological equipment of a drone based on the use of a Cardan suspension for installing a bathometer on it - a device for taking water samples. The second, scientific aspect includes the first developed kinematic and dynamic models of the movement of the bathometer and the obtained grapho-analytical dependences of kinematic analysis, which enable engineers and scientists to create similar technological equipment of drones for monitoring the state of water bodies depending on other production tasks in this field. Ultimately, the results of the conducted research are aimed at the development of environmentally friendly equipment in the form of an unmanned aerial vehicle, which is designed to monitor the state of various water bodies. *Key words:* unmanned aerial vehicles, quadcopter, water sampling devices, bathometers, water body monitoring.

Постановка проблеми. В наш час все більш поширюється використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для екологічного моніторингу водних ресурсів, таких як річки, озера, водосховища тощо. Дистанційне керування та маневреність, що притаманні даному виду техніки, надають можливість обстежити великі площі акваторій без застосування надводних плаваючих засобів із двигунами внутрішнього згорання, які в наслідок викидів продуктів згорання палива не відповідають в повній мірі вимогам забезпечення екологічної безпеки. Однак такий новий вид техніки, як БПЛА, перебуває на початковій стадії розвитку і йому властиві деякі недоліки, зокрема від-

сутність технологічного оснащення для об'єктивного забору проб води з метою подальшого лабораторного аналізу. До того ж відсутність математичних моделей у вигляді кінематичного та динамічного аналізу функціонування вказаного оснащення стримує розвиток синтезу дронів для екологічного моніторингу стану різноманітних водойм.

Актуальність дослідження. Узяття проб води згідно з національними стандартами необхідно здійснювати на різних об'єктах глибин водойм рік і озер. Для об'єктивності узяття проб води не достатньо застосування тільки ємностей для забору проб води, які оснащені приводами опускання й підйому,

так званих батометрів. Щоб запобігти негативному впливу на батометр динамічних навантажень від вказаних приводів необхідно, щоб орієнтація батометра визначалося гравітаційною силою його ваги, тобто не залежала від положення троса лебідки, яку застосовують на дронах для опускання батометра у воду. Крім того, необхідно забезпечити точність виміру величини занурення батометра на різних горизонтах глибин водойм, а також виключити турбулентність при заборі води в батометр. Остання негативна якість є наслідком того, що сучасні конструкції батометрів передбачають ручне керування запірними елементами за допомогою людини, яка перебуває в човні. 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 26.04.2021 р. 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 визначення напрямків вдосконалення дронів, що призначені для забору проб води в різних акваторіях, виконаємо аналіз сучасних досліджень та найбільш перспективних технічних рішень прототипів в даній галузі.

Достатньо розлого виконано аналіз досягнень у зборі проб води з використанням дронів в роботі [1], а власне явище забруднення зі зливових вод досліджено в роботі [2], у якій наголошується, що забруднення води можуть містити в собі мікроорганізми, сміття, паливо й мінерали. Віддаючи належне об'єктивності наданої інформації, слід зауважити, що в обох дослідженнях не представлені проектні рішення дронів зазначеного типу. Не аби який інтерес викликає експериментальний дрон у вигляді квадрокоптера, що представлений в роботі [3]. Цей дрон оснащено відеокамерою для передачі зображення в режимі реального часу, що в свою чергу дозволяє здійснювати вимір мутності води портативним, так званим, турбодіметром при вертикальній відстані до 5 метрів між дроном і поверхнею води. Однак існує ряд технологічних обмежень [4] моніторингу якості води дронами, а саме: наявність відмінностей між параметрами хімічного складу води при використанні дрона й пробами, що зібрані із човна, а також не достатній рівень об'єктивності взяття проб води. Система Map Water [5] виконує екологічний моніторинг водойм на основі комплексного хмарного розв'язку, що надає можливість отримати дані про відбивну здатність води й показники якості води, такі

як мутність і Chl-a концентрація. Однак у наведених роботах не запропоновані конструктивні розв'язки пристроїв забору проб води.

На відміну від попередніх досліджень у роботах [6, 7] запропоновані технічні розв'язки пристроїв забору проб води, які мають приводи для опускання й підйому контейнерів з водою. Однак в обох випадках величина переміщення зазначених контейнерів обмежена, що не дозволяє здійснювати забір проб води на більших глибинах, наприклад у діапазоні (10...30) м. Унікальний дрон Aquatic Micro Air Vehicle запропонований в роботі [8], який може рухатися як в повітряному, так і в підводному просторі. Цей дрон може здійснювати збір даних про водні ресурси, крім обстеження важкодоступних ділянок акваторій, що поросли надводною рослинністю.

Вдосконалення дрону для забору проб води в різноманітних водоймах здійснила Американська компанія Reign Maker [9], оснастивши дрон спеціальною насадкою у вигляді довгого тримача для відкритої пляшки, яка опускається у воду. Однак слід зазначити, що забір проб води таким засобом супроводжується турбулентним потоком, що негативно впливає на об'єктивність забору води. Вкрай корисним для моніторингу стану водних ресурсів є складання батометричних карт [10] ділянок акваторій і статистичних експериментальних планів [11] при заборі проб води, що ілюструє новий методологічний підхід до розв'язку розглянутої проблеми. Не аби який інтерес викликає система Drone DOWSE, до складу якої входять пристрої, що надруковані на 3D принтері й прив'язані до дрону.

Для перевірки проб у важкодоступних або небезпечних місцях, був розроблений дрон [13], який оснащений відбірником проб для тонкої плівки мікроскопічної екстракції у стані твердої фази (TF-SPME). Такий розв'язок дозволяє відбірнику проб води захищати фазу сорбенту від зовнішнього забруднення. Евристичний алгоритм [14] польоту дрона дозволяє раціонально використовувати загальне енергоспоживання встаткування для забору проб води. Комплексним підходом до вирішення зазначеної проблеми є об'єднання функцій багатоцільового літаючого дрона [15] й плаваючого механізму для моніторингу якості води. Дослідження [16] підтверджують доцільність застосування дронів для збору гідрохімічних даних із прісноводних середовищ для біологічного й фізико-хімічного відбору проб води. Певний інтерес викликає застосування методу ортогональної мозаїки, яка створюється безпілотним літальним апаратом [17] для оцінки кількості зібраної дощової води. Використання дронів для моніторингу якості води в зрошувальних каналах з метою поліпшення якості води для землеробства запропоновано в дослідженнях [18]. Однак у розглянутих роботах відсутні пропозиції щодо удосконалення конструкцій власне дронів.

Дрон [19] використовує автоматизовану систему відбору проб води, яка містить підсистему GPS навігації,

літальний апарат. модуль контролю якості води, пристрій збору води, з'єднаний з нижньою частиною корпусу дрона, що опускає шланг, через який насосом засмоктуються певний об'єм води. Дана система дозволяє здійснювати аналіз води безпосередньо на місці її збору. Але згідно наказу МОЗ України від 30.05.2007р. № 284 (див. Методичні вказівки «Санітарно-вірусологічний контроль водних об'єктів». URL: <https://ips.ligazakon.net/document/MOZ6926>) за п. 4.2 «Обробка води поверхневих та підземних водойм...» вказано: «Проби води, ... доставлені в лабораторію, поміщають у холодильник або у холодну кімнату при температурі +4° С, дають відстоятися впродовж 30 хв. у доставленому посуді». Тобто час відстоювання проби води майже вичерпує час польоту дрону, що слід вважати недоліком даної системи. Дослідження [20, 21] підтверджують необхідність удосконалювання встаткування для моніторингу водних ресурсів. На підставі наведеного аналізу досліджень можна стверджувати, що завдання підвищення об'єктивності забору проб води для екологічного моніторингу стану водойм залишається актуальними.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Серед різноманіття технічних рішень дронів для екологічного моніторингу водних ресурсів відсутні пропозиції щодо підвищення об'єктивності забору проб води, а саме: забезпечення орієнтації батометру, що занурюється у воду, тільки дією гравітаційної сили, тобто не залежно від впливу динамічних навантажень приводів підйому та опускання пристрою для забору проб води. Також на сьогодні не запропоновані технічні рішення щодо підвищення точності виміру відстані занурення засобу відбору проб води на різних горизонтах глибин водойм, що вкрай необхідно для забезпечення об'єктивності взяття проб води.

Новизна. Інженерна новизна конструктивних рішень дрону для забору проб води полягає в установленні батометра на кільцях підвісу Кардана, що забезпечує орієнтацію вказаного засобу під дією гравітаційної сили його ваги, а також в наявності пристрою точного виміру величини занурення батометра на різних горизонтах глибин водойм. Наукову новизну досліджень складають 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 кінематичного аналізу та динаміки руху пристрою для забору проб води надають можливість дослідникам і інженерам здійснювати синтез аналогічного технологічного оснащення дронів для екологічного моніторингу водойм відповідно до інших виробничих завдань.

Викладення основного матеріалу. Спочатку розглянемо принципово нову конструкцію [22] та алгоритм функціонування дрону, що полегшить розуміння нижче наданої математичної моделі.

Конструкція дрону. На рис. 1 зображено перший варіант дрона, створений авторами та випробуваний у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» на кафедрі інформаційних систем і технологій. Цей дрон був успішно продемонстрований на Web Summit у Лісабоні (13–16 листопада 2023 року). Однак встановлення батометра цього дрона безпосередньо на його корпусі не дозволяло брати проби води на різних глибинах водойм. Тому в результаті подальших досліджень було створено нове технологічне обладнання для дрона з установкою батометра на карданному підвісі, як показано на рис. 2. На нижній частині квадрокоптера встановлену 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. Для того, щоб орієнтація батометра визначалась гравітаційним навантаженням від сили його ваги, батометр встановлено на підвісі Кардана, який закріплено на тросі лебідки.



Рис. 1. Прототип дрону для забору проб води

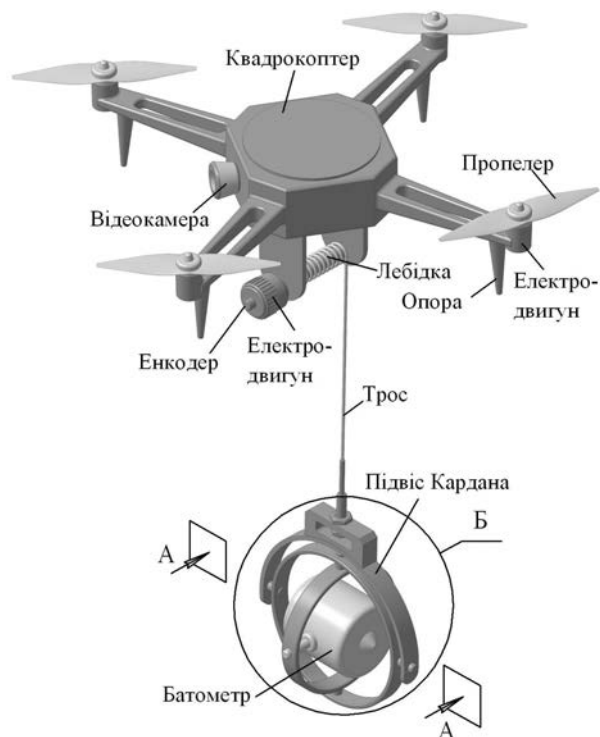


Рис. 2. Удосконалений дрон з підвісом Кардана

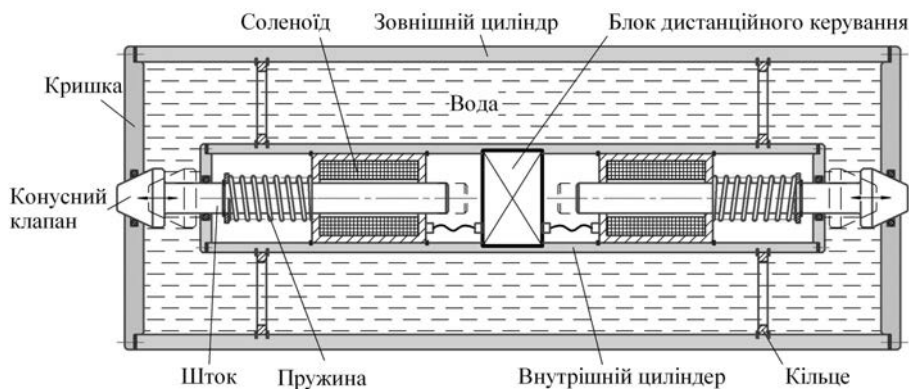


Рис. 3. Конструкція батометра для забору проб води (див. переріз А-А на рис. 2)

Принципово нова конструкція батометра, повздовжній переріз якого показано на рис. 3, 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 конусними клапанами з електромагнітними котушками у вигляді соленоїдів. Клапани є нормально закритими під дією сили пружин, а при подачі живлення на соленоїди останні втягують штоки і тим самим відкривають отвори для забору води.

Дрон працює наступним чином. Для взяття проби води дрон зависає над ділянкою акваторії за координатами, що задані оператором. З барабану лебідки (див. рис. 2), що оснащена приводом, розмотується трос і батометр занурюється у воду на величину h . Довжина витка тросу на барабані складає $l = \sqrt{s^2 + (\pi d^2)}$ (де: s – крок намотки витка тросу; d – діаметр по осі витка тросу). Це відстань, на яку опускається батометр за один оберт барабану лебідки. Залежно від розрядності енкодера, що встановлений на приводі, кожному оберт відповідає певна кількість імпульсів енкодера. Тоді величина заглиблення h батометра у воду буде дорівнювати: $h = n\sqrt{s^2 + (\pi d^2)} + R$ (де: n – кількість обертів барабану лебідки, R – відстань від осі батометра до точки кріплення Карданового підвісу до тросу). Якщо H – висота зависання дрона над поверхнею води, то загальна довжина L розмотаного тросу буде дорівнювати $L = H + h = n\sqrt{s^2 + (\pi d^2)} + R$. Після фіксації величини заглиблення h батометра у воду, оператором, що керує дроном (або за заздалегідь розробленою програмою), подається сигнал на соленоїди (рис. 3), котрі втягуючи штоки у електромагнітні котушки, відкривають конічні клапани, тобто отвори в торцевих кришках зовнішнього циліндра і батометр заповнюється водою в об'ємі, що визначається об'ємом проби води. Під час знаходження батометра у воді його положення буде визначатися тільки дією гравітаційного навантаження від сили ваги батометра завдяки тому, що останній встановлений на кіль-

цях Карданового підвісу, які обертаються за кутами Ейлера. Тобто орієнтація батометра у воді не буде залежати від таких негативних явищ як перекручення тросу чи довільного нахилу дрону від вітру чи інших динамічних впливів.

Після сплину регламенту часу заповнення батометра відключається живлення соленоїдів і під дією сили пружин клапани закривають отвори в кришках батометра. Підйом батометра з водою здійснюється реверсом двигуна барабану лебідки, що призводить до повного намотування тросу на барабан, а підвіс Кардану притискається до нижньої частини дрону, який повертається оператором на базу для доставки чергової проби води.

Кінематичний аналіз руху карданної підвіски. Як видно на рис. 4 батометр встановлено на внутрішньому кільці підвісу Кардана, яке, в свою чергу, закріплено на осі зовнішнього кільця, а останнє встановлено на осі нерухомого кільця з тросом лебідки.



Рис. 4. Карданна підвіска з трьома ступенями свободи у вигляді кутів повороту ψ , θ і φ (див. також елемент «Б» рис. 2)

Поєднаємо початки нерухомої системи координат $Ox_0y_0z_0$ і рухомої системи координат $Oxyz$ у точці O , яка незмінно з'єднана з тілом батометра і рухається

разом з ним. Для опису руху батометра, який має три степені волі, зручно користуватись кутами Ейлера (ψ, θ, φ) , що надасть змогу, здійснивши три повороти на задані кути, отримати необхідне положення незмінно скріпленої з батометром рухомої системи координат $Ox_0y_0z_0$. Перший поворот на кут ψ , що називається кутом *прецесії*, здійснюємо навколо осі Oy_0 . При цьому одержуємо систему координат $Ox_1y_1z_1$ скріплену з тілом, яка характеризує положення батометра після першого повороту. Напрявні косинуси отриманих осей відносно попередньої системи координат $Ox_0y_0z_0$ можна записати у вигляді матриці B_1 , стовпці якої і є напрямними косинусами осей Ox_1, Oy_1, Oz_1 відповідно отримаємо матрицю

$$B_1 = \begin{pmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Другий поворот на кут θ , який називається кутом *нутації*, проводимо навколо осі Oz_1 і одержуємо систему координат $Ox_2y_2z_2$, жорстко скріплену з тілом батометра. Напрявні косинуси отриманих осей відносно попередньої системи координат Ox_1, Oy_1, Oz_1 можна записати у вигляді матриці B_2 , стовпці якої і є напрямними косинусами осей Ox_2, y_2, z_2 , відповідно отримаємо матрицю

$$B_2 = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

І третій поворот на кут φ , кут власного обертання батометра, здійснюємо навколо осі Ox_2 . В результаті одержуємо остаточне положення батометра, яке характеризується системою координат $Ox_3y_3z_3$. Напрявні косинуси отриманих осей відносно попередньої системи координат Ox_2, y_2, z_2 можна записати у вигляді матриці B_3 , стовпці якої і є напрямними косинусами осей Ox, Oy, Oz відповідно

$$B_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Перемноживши матриці B_1, B_2, B_3 , одержимо матрицю B , стовпці якої є напрямними косинусами осей Ox, Oy, Oz відносно нерухомої системи координат $Ox_0y_0z_0$:

$$B = B_1 B_2 B_3 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де позначено:

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\theta \cos\psi; & a_{13} &= \sin\psi \cos\theta \sin\varphi + \sin\varphi \cos\psi \sin\theta; \\ a_{21} &= \sin\theta; & a_{22} &= \cos\theta \cos\psi \sin\varphi; \\ a_{23} &= -\sin\varphi \cos\theta; & a_{31} &= -\sin\psi \cos\theta \sin\theta; \\ a_{32} &= \sin\psi \cos\theta \sin\varphi + \sin\psi \cos\varphi \sin\theta; \\ a_{33} &= \cos\psi \cos\theta \sin\varphi - \sin\psi \sin\theta \sin\varphi. \end{aligned}$$

Кожному куту повороту ψ, θ, φ відповідає вектор кутової швидкості

$$\vec{\omega}_1 = \vec{j}_0 \frac{d\psi}{dt} = \psi \vec{j}_0; \quad \vec{\omega}_2 = \vec{k}_1 \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \vec{k}_1; \quad \vec{\omega}_3 = \vec{i} \frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi} \vec{i}, \quad (5)$$

де $\vec{j}_0, \vec{k}_1, \vec{i}$ – одиничні вектори напрямлені відповідно вздовж координатних осей Oy_0, Oz_1, Ox . Тоді сумарна кутова швидкість дорівнює геометричній сумі зазначених векторів кутових швидкостей

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2 + \vec{\omega}_3 = \dot{\psi} \vec{j}_0 + \dot{\theta} \vec{k}_1 + \dot{\varphi} \vec{i}. \quad (6)$$

Виразимо одиничні вектори \vec{j}_0, \vec{k}_1 , через одиничні вектори рухомої системи координат $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$

$$\vec{k}_1 = (\vec{k} \cos\varphi + \vec{j} \sin\varphi); \quad \vec{j}_0 = \vec{i} \sin\theta + \cos\theta(\vec{j} \cos\varphi - \vec{k} \sin\varphi). \quad (7)$$

Підставивши (7) у вираз (6), знаходимо проекції кутової швидкості на осі рухомої системи координат

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\varphi} + \dot{\psi} \sin\theta; & \omega_y &= \dot{\theta} \sin\varphi + \dot{\psi} \cos\theta \cos\varphi; \\ \omega_z &= \dot{\theta} \cos\varphi - \dot{\psi} \cos\theta \sin\varphi. \end{aligned} \quad (8)$$

Аналогічно, якщо виразити одиничні вектори \vec{k}_1, \vec{i} , через одиничні вектори нерухомої системи координат $\vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0$, а саме:

$$\vec{k}_1 = (\vec{k}_0 \cos\theta + \vec{i}_0 \sin\theta); \quad \vec{i} = \vec{j}_0 \sin\theta + \cos\theta(\vec{i}_0 \cos\psi + \vec{k}_0 \sin\psi),$$

то можна знайти проекції кутової швидкості на осі нерухомої системи координат

$$\begin{aligned} \omega_{x_0} &= \dot{\theta} \sin\psi + \dot{\varphi} \cos\theta \cos\psi; \\ \omega_{y_0} &= \dot{\psi} + \dot{\varphi} \sin\theta; \\ \omega_{z_0} &= \dot{\theta} \cos\psi - \dot{\varphi} \cos\theta \sin\psi \end{aligned} \quad (9)$$

Якщо вектор кутового прискорення тіла батометра складає

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \varepsilon_x \vec{i} + \varepsilon_y \vec{j} + \varepsilon_z \vec{k},$$

то проекції вектора кутового прискорення на осі рухомої системи координат обчислюємо за формулами:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{d\omega_x}{dt} = \ddot{\varphi} + \dot{\psi} \sin\theta + \dot{\psi} \dot{\theta} \cos\theta; \\ \varepsilon_y &= \frac{d\omega_y}{dt} = \ddot{\theta} \sin\varphi + \dot{\psi} \cos\theta \cos\varphi + \dot{\theta} \dot{\psi} \cos\varphi - \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta \cos\varphi - \dot{\psi} \dot{\varphi} \cos\theta \sin\varphi; \\ \varepsilon_z &= \frac{d\omega_z}{dt} = \ddot{\theta} \cos\varphi - \dot{\psi} \cos\theta \sin\varphi - \dot{\theta} \dot{\psi} \sin\varphi + \dot{\psi} \dot{\theta} \sin\theta \sin\varphi - \dot{\psi} \dot{\varphi} \cos\theta \cos\varphi. \end{aligned} \quad (10)$$

Отримані результати повністю визначають положення батометра для забору проб води у просторі довільної орієнтації.

Динамічна модель руху батометра. Для дослідження динаміки руху заданої механічної системи, тобто батометра на підвісі Кардана, використаємо рівняння Лагранжа 2-го роду, які мають стандартний вигляд

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i; \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

де q_i – узагальнені координати; \dot{q}_i – узагальнені швидкості; Q_i – узагальнена сила, що відповідає узагальненій координаті q_i ; $T = T(q_i, \dot{q}_i, t)$ – вираз кінетичної енергії механічної системи. Оскільки у нашому випадку $q_1 = \psi$; $q_2 = \theta$; $q_3 = \varphi$, то система рівнянь (11) матиме вигляд

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\psi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \psi} &= Q_{\psi}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \theta} &= Q_{\theta}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \phi} &= Q_{\phi}. \end{aligned} \quad (12)$$

Задана механічна система складається з трьох твердих тіл. Тіло 1 – це внутрішнє кругове кільце діаметром d_b і масою m_b (див. рис. 4). Це тіло має дві степені свободи і його положення повністю визначають кути ψ і θ , а вектор миттєвої кутової швидкості обчислюємо за формулою

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_1 + \vec{\omega}_2 = \dot{\psi} \vec{j}_b + \dot{\theta} \vec{k}_1. \quad (13)$$

Проекції цієї кутової швидкості на осі $Ox_2y_2z_2$, які незмінно скріплені зі вказаним вище кільцем Карданового підвісу, дорівнюють

$$\omega_{x_2} = \dot{\psi} \sin \theta; \quad \omega_{y_2} = \dot{\psi} \cos \theta; \quad \omega_{z_2} = \dot{\theta}. \quad (14)$$

Оскільки осі системи координат $Ox_2y_2z_2$ є для кільця головними осями інерції, то вираз для обчислення кінетичної енергії цього кільця матиме вигляд

$$T_1 = \frac{1}{2} ((\omega_{x_2})^2 I_{x_2} + (\omega_{y_2})^2 I_{y_2} + (\omega_{z_2})^2 I_{z_2}). \quad (15)$$

Обчислимо осьові моменти інерції кільця:

$$\begin{aligned} I_{y_2} &= \iint ((x_2)^2 + (z_2)^2) dm = \left(\frac{d_b}{2} \right)^2 \iint dm = \frac{m_b d_b^2}{4}; \\ I_{x_2} &= \iint ((y_2)^2 + (z_2)^2) dm = \frac{1}{2} I_{y_2} = \frac{m_b d_b^2}{8}; \\ I_{z_2} &= \iint ((y_2)^2 + (x_2)^2) dm = \frac{1}{2} I_{y_2} = \frac{m_b d_b^2}{8}, \end{aligned} \quad (16)$$

(для цього кільця координата $y_2=0$).

Підставимо вирази (14) і (16) у формулу (15) і отримаємо вираз для обчислення кінетичної енергії руху

$$T_1 = \frac{m_b d_b^2}{16} ((\dot{\psi})^2 (1 + \cos^2 \theta) + (\dot{\theta})^2). \quad (17)$$

Як зазначено вище, тіло 2, тобто батометр, має три степені вільності і його положення у просторі цілком визначають кути ψ , θ , ϕ , а проекції вектора кутової швидкості описують формули (8). Тоді для батометра вираз кінетичної енергії можна записати як для тіла, що здійснює сферичний рух

$$T_2 = \frac{1}{2} (\omega_x^2 I_x + \omega_y^2 I_y + \omega_z^2 I_z - 2\omega_x \omega_y I_{xy} - 2\omega_x \omega_z I_{xz} - 2\omega_y \omega_z I_{yz}), \quad (18)$$

де I_x, I_y, I_z – осьові моменти інерції батометра відносно осей системи відліку скріпленої з батометром; I_{xy}, I_{xz}, I_{yz} – відцентрові моменти інерції батометра.

Тілом 3 є зовнішнє кільце Карданового підвісу (див. рис. 4), діаметр якого d_3 і маса m_3 . Це кільце має одну ступінь вільності, воно здійснює обертальний рух навколо нерухомої осі і його положення повністю визначає кут ψ . Кінетична енергія цього кільця дорівнює

$$T_3 = \frac{1}{2} (\dot{\psi})^2 I_3 = \frac{m_3 d_3^2}{16} (\dot{\psi})^2. \quad (19)$$

Отже, повна кінетична енергія системи батометр – Карданів підвіс дорівнює сумі знайдених кінетичних енергій окремих тіл цієї системи:

$$T = \frac{m_b d_b^2}{16} ((\dot{\psi})^2 (1 + \cos^2 \theta) + (\dot{\theta})^2) + \frac{m_3 d_3^2}{16} (\dot{\psi})^2 + \frac{1}{2} (\omega_x^2 I_x + \omega_y^2 I_y + \omega_z^2 I_z - 2\omega_x \omega_y I_{xy} - 2\omega_x \omega_z I_{xz} - 2\omega_y \omega_z I_{yz}). \quad (20)$$

Далі, якщо знайти частинні похідні, що входять у рівняння (12) та проекції сили ваги батометра на осі нерухомої системи координат, а також надавати кутам обертання кільцям Карданового підвісу можливе переміщення δ_{ψ} з обчисленням елементарної роботи згідно класичній методиці, то задача зводиться до розв'язку системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = c_{11} D_1 + c_{12} D_2 + c_{13} D_3; \\ \frac{dv_2}{dt} = c_{21} D_1 + c_{22} D_2 + c_{23} D_3; \\ \frac{dv_3}{dt} = c_{31} D_1 + c_{32} D_2 + c_{33} D_3; \end{cases} \quad \begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = v_1; \\ \frac{d\theta}{dt} = v_2; \\ \frac{d\phi}{dt} = v_3. \end{cases} \quad (21)$$

У виразах (21) позначено:

$$\begin{aligned} D_1 &= Q_{\psi} - F_1 + \frac{\partial T}{\partial \psi}; \quad D_2 = Q_{\theta} - F_2 + \frac{\partial T}{\partial \theta}; \\ D_3 &= Q_{\phi} - F_3 + \frac{\partial T}{\partial \phi}; \quad \psi = v_1; \quad \dot{\theta} = v_2; \quad \dot{\phi} = v_3; \end{aligned}$$

$F_{1,2,3}$ – вираження часток похідних по кутах повороту кільця підвісу з урахуванням моментів сил $Q_{\psi}, Q_{\theta}, Q_{\phi}$.

Система диференціальних рівнянь (21) розв'язується числовими методами, зокрема, методом Рунге – Кутта четвертого порядку точності при заданих початкових значеннях кутів Ейлера (див. рис. 4) і їх похідних за часом. На основі такого розв'язку побудовані графіки зміни у часі кутів ψ , θ , ϕ обертання кільця Карданового підвісу, що надані нижче.

Аналіз результатів моделювання. Результати моделювання, що надані на рис. 5 (а, б) процесу повороту на кути прецесії ψ та нутації θ кільця підвісу Кардана показують наявність коливань внаслідок малого моменту сил тертя кочення в опорах осей кільця. Цей ефект однозначно вказує на необхідність застосування демпферів для гасіння коливань. Як видно з графіку рис. 5 (а) період коливань зміни кута прецесії ψ при наявності демпфера складає близько 4с, що достатньо для експлуатації, а при відсутності демпфера період коливань зміни кута нутації θ (рис. 5, б) зростає в кілька разів, що не припустимо, оскільки негативно впливає на забір проби води та ще й буде збільшувати час зависання дрону над точкою забору проб води.

Гідравлічні демпфери, що здійснюють перетворення енергії коливань у сили рідинного тертя, випускаються промисловістю серійно в якості комплектуючих виробів і можуть бути застосовані для зменшення як періоду, так і амплітуди коливань кільця підвісу. Зменшення періоду коливань можливо досягнути

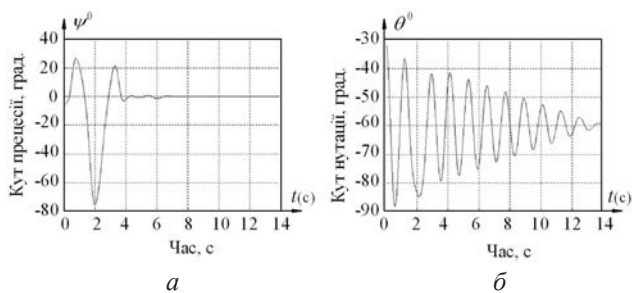


Рис. 5. Зміни кутів повороту ψ , θ карданних кілець з батометром (а – з демпфером; б – без демпфера)

також і збільшенням коефіцієнту тертя, замінивши опори кочення на опори ковзання, наслідком чого буде збільшення моменту сил тертя ковзання в опорах кілець. Окрім того, можлива експлуатація батометра на кільцях підвісу Кардана із двома ступенями свободи, коли відсутнє власне обертання батометра, наприклад при відсутності течії у такому водоймі як озеро. У цьому разі в наведених вище формулах слід покласти $\varphi = 0$; $\dot{\varphi} = 0$ і тоді вони значно спрощуються.

На рис. 6 видно, що куту між вертикаллю й радіус-вектором: центр підвісу \rightarrow центр мас батометра поступово зменшується, і батометр займає положення по лінії гравітаційного навантаження, що й було потрібно довести установкою батометра на Кардановому підвісі.

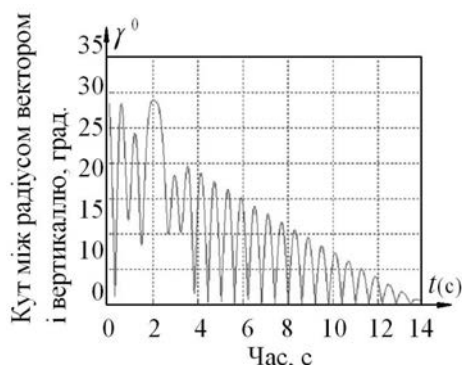


Рис. 6. Зміни куту повороту у карданних кілець між вертикаллю й радіус-вектором: центр підвісу \rightarrow центр мас батометра

На рис. 7 надано графіки зміни кутових швидкостей кілець Кардана: прецесії $\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt}$ та кутової швидкості нутації $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$. Очевидно, що період затухання коливальних змін швидкості кута прецесії $\dot{\psi} = \frac{d\psi}{dt}$ значно менший, ніж кута нутації, що остаточно підтверджує доцільність застосування демпферів для гасіння коливальних.

Вище було зазначено, що можлива експлуатація батометра на кільцях підвісу Кардана із двома ступенями свободи, коли відсутнє власне обертання батометра, наприклад при відсутності течії у закритих водоймах. Якщо в наведених вище формулах покласти $\varphi = 0$; $\dot{\varphi} = 0$, то при 2-х ступенях свободи підвісу Кардана елементи матриці B , що описується виразом (4), матимуть вигляд:

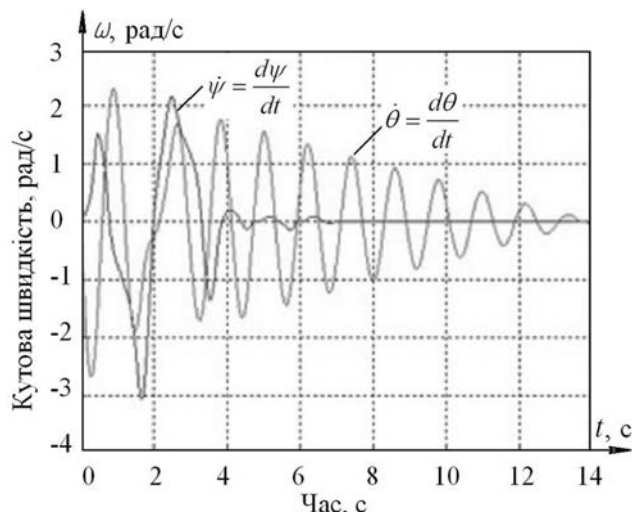


Рис. 7. Зміна в часі кутових швидкостей кілець карданної підвіски батометра.

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \theta \cos \psi; & a_{12} &= -\cos \psi \sin \theta; & a_{13} &= \sin \psi; \\ a_{21} &= \sin \theta; & a_{22} &= \cos \theta; & a_{23} &= 0; \\ a_{31} &= -\sin \psi \cos \theta; & a_{32} &= \sin \psi \sin \theta; & a_{33} &= \cos \psi. \end{aligned} \quad (22)$$

Тоді задача на відміну від постановки (21) спрощується і зводиться до розв'язку системи чотирьох (а не шести) лінійних диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = c_{11}D_1 + c_{12}D_2; & \frac{dv_2}{dt} = c_{21}D_1 + c_{22}D_2; \\ \frac{d\psi}{dt} = v_1; & \frac{d\theta}{dt} = v_2, \end{cases} \quad (23)$$

де позначено: $D_1 = Q_v - F_1 + \frac{\partial T}{\partial \psi}$; $D_2 = Q_\theta - F_2 + \frac{\partial T}{\partial \theta}$.

Аналогічно випадку (21) система диференціальних рівнянь (23), також розв'язується числовими методами, зокрема, методом Рунге – Кутта четвертого порядку точності при заданих початкових значеннях кутів Ейлера.

Головні висновки. Завдяки встановленню батометра – пристрою для взяття проб води, на підвісі Кардана надається можливість здійснювати орієнтацію положення батометра під дією гравітаційного навантаження сили його ваги, тобто коли положення батометра не залежить від таких негативних явищ як перекручення тросу чи довільного нахилу дрону від вітру або інших динамічних впливів від механізмів опускання та підйому батометра.

Оснащення батометра клапанами з приводом від соленоїдів 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.

В остаточноному підсумку застосування розробленого технологічного оснащення і рекомендацій, наданих в результаті моделювання функціонування

батометра, надає можливість значно підвищити об'єктивність забору проб води у різноманітних водоймах за допомогою дронів, що сприяє забезпеченню екологічної чистоти обладнання для моніторингу якості водних ресурсів.

Перспективи використання результатів дослідження. Оскільки створення безпілотних літальних апаратів для забору проб води з метою подальшого їх лабораторного аналізу знаходиться на початковій стадії, то вкрай важливі пропозиції не тільки нових конструкцій подібного обладнання,

а й розробка методологічного забезпечення синтезу безпілотних літальних апаратів для екологічного моніторингу стану водойм. Надані в статті математичні моделі дозволять дослідникам здійснювати імітаційне моделювання процесу функціонування аналогічного обладнання для інших виробничих завдань екологічного моніторингу навколишнього середовища.

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

Література

1. Sagar D. Shelare, Kapil R. Aglawe, Subhash N. Waghmare, Pramod N. Belkhode. Advances in water sample collections with a drone – A review, *Materials Today: Proceedings*, Volume 47, Part 14, 2021, Pages 4490-4494, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.327>
2. Walter McDonald. Drones in urban stormwater management: a review and future perspectives. *Urban Water Journal*, Volume 16, 2019, Issue 7, Pages 505-518.
3. Caio P. Cavallieri. Water sampling with drones. Conference: XXIII Brazilian Symposium on Water Resources At: Foz do Iguaçu (PR), Brazil, November 2019, pp. 1-10.
4. C.T. Graham, I. O'Connor, L. Broderick, M. Broderick, O. Jensen, H.T. Lally, Drones can reliably, accurately and with high levels of precision, collect large volume water samples and physio-chemical data from lakes, *Science of The Total Environment*, Volume 824, 2022, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153875>
5. Liesbeth De Keukelaere, Robrecht Moelans, Els Knaeps, Sindy Sterckx et al. Airborne Drones for Water Quality Mapping in Inland, Transitional and Coastal Waters–MapEO Water Data Processing and Validation. *Remote Sens.* 2023, 15, 1345. P. 18. <https://doi.org/10.3390/rs15051345>
6. Park Yang-gyu, Sungjae Lee, Dongmyeon Beoksang et al. Patent South Korea KR10-2326827 Int. Cl. G01N 1/14; B64C 39/02. Drone-mounted water sampler that shortens water sampling time. Filed: 2021.03.23. Date of Patent: 2021.11.10.
7. Wang Xianrong. Patent Japan 6789477 Int. Cl. G01N 1/12; B64D 1/22. A device that can take water samples from a sample bottle using a drone. Filed: 2019.8.2. Date of Patent: 2020.11.25.
8. Yu. I. Mushynskiy, B.P. Knysh Unit for monitoring the state of water by an unmanned aerial vehicle. *Vinnitsia National Technical University*. 2023, p. 1-3.
9. The drone helped environmentalists collect water samples. URL: <https://nplus1.ru/news/2021/06/28/nixie> (date of publication: 05.11.2023).
10. Aris Thomasberger and Mette Møller Nielsen. UAV-Based Subsurface Data Collection Using a Low-Tech Ground-Truthing Payload System Enhances Shallow-Water Monitoring Section for Coastal Ecology, National Institute of Aquatic Resources, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. *Drones* 2023, 7(11), 647; <https://doi.org/10.3390/drones7110647>
11. H.T. Lally, I. O'Connor, O.P. Jensen, C.T. Graham. Can drones be used to conduct water sampling in aquatic environments?, A review. / *Science of the Total Environment* 670 (2019) 569-575.
12. Regina Hanlon, Stephen J. Jacquemin, Johnna A. Birbeck, Judy A. Westrick et al. Drone-based water sampling and characterization of three freshwater harmful algal blooms in the United States. *Remote Sens.*, 24 August 2022, Sec. Unoccupied Aerial Systems (UASs and UAVs) Volume 3 – 2022, <https://doi.org/10.3389/frsen.2022.949052>
13. Jonathan J. Grandy, Virginia Galpin, Varoon Singh, and Janusz Pawliszyn. Development of a Drone-Based Thin-Film Solid-Phase Microextraction Water Sampler to Facilitate On-Site Screening of Environmental Pollutants. *Anal. Chem.* 2020, 92, 19, 12917-12924 <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01490>
14. Zhigang Wang, Liqin Tian, Lianhai Lin, Jianfei Xie et al. Data Collection System of IoT Based on the Coordination of Drones and Unmanned Surface Vehicle. *Research Article*, Volume 2023, Article ID 3426932, <https://doi.org/10.1155/2023/3426932>
15. P. Agarwal and M. K. Singh. A multipurpose drone for water sampling & video surveillance," 2019 Second International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms (ICACCP), Gangtok, India, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICACCP.2019.8883017.
16. 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.
17. 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>
18. 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/>
19. Jeon Jeong-Yeol, Hyunhwan Shin. Automated water sampling system and a dron using the same. Patent South Korea KP10-2301174 Int. Cl. G01N 1/14; B64C 39/02. Date of Patent: 2021.09.10.
20. Mbulisi Sibanda, Onesimo Mutanga, Vimbayi G. P. Chimonyo et al. Application of Drone Technologies in Surface Water Resources Monitoring and Assessment: A Systematic Review of Progress, Challenges, and Opportunities in the Global South. *Drones* 2021, 5(3), 84; <https://doi.org/10.3390/drones5030084>
21. Agata Krystosik-Gromadzińska. The use of drones in the maritime sector – areas and benefits. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin* 67 (139) ISSN 2392-0378, p. 10.
22. 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.

УДК 502.3:504.5

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.4>

МОНІТОРИНГ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У КОНТЕКСТІ ПЕРЕХОДУ ДО СТАЛОГО СІЛЬСЬКОГО РОЗВИТКУ

Боголюбов В.М., Клепко А.В., Бондарь В.І.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ

volbog@ukr.net, alla.klepko@gmail.com, ndieco@ukr.net

В роботі проаналізовано особливості виразів «стале сільське господарство» (*Sustainable agriculture*) і «сталий сільський розвиток» (*sustainable rural development*). Встановлено невідворотність переходу сільських громад до *сталого сільського розвитку* шляхом впровадження принципів сталого сільського господарства.

Питання якості атмосферного повітря та безпеки населення є актуальним, як на локальному, так і на регіональному та державному рівнях. Оновлений у 2019 році Порядок здійснення державного моніторингу стану атмосферного повітря¹ включає перелік з 13 пріоритетних забруднювальних речовин (список А діоксид сірки, діоксид та оксиди азоту, бензол, оксид вуглецю, озон, тверді частки діаметром 2.5 та 10 мкм (ТЧ_{2,5}; ТЧ₁₀) та інші поллютанти). З метою здійснення управління якістю атмосферного повітря цей Порядок на території України встановлює 25 зон і 24 агломерації, а також визначає верхній та нижній пороги оцінювання для пріоритетних забруднювальних речовин (а для діоксидів сірки та азоту окремі граничні величини для захисту здоров'я людини і для «захисту ... екосистем»). Постанова зобов'язувала обласні і міські державні адміністрації до 1 липня 2021 року подати для погодження Міндовкілля програми регіонального моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря. Автори відмічають, що на початок 2024 року ряд міст (агломерацій) та обласних державних адміністрацій (ОДА) розробили і впроваджують незалежні регіональні системи моніторингу довкілля але на рівні сільських населених пунктів про такі програми поки що невідомо..

Шляхом аналізу ринку автоматичних вимірювальних пристроїв (станцій) визначено можливості підприємств і місцевих органів влади забезпечити своєчасне і достовірне вимірювання концентрацій забруднювальних речовин. Автори акцентували увагу на основних проблемах і особливостях організації моніторингових спостережень на рівні сільської об'єднаної територіальної громади та спробували визначити задачі подальших наукових досліджень у цьому напрямі. У роботі використані порівняльно-аналітичні методи дослідження. *Ключові слова*: моніторинг якості атмосферного повітря, індикатори сталого розвитку, автоматичні станції.

Monitoring of atmospheric air in the context of the transition to sustainable rural development. Bogoliubov V., Klepko A., Bondar V.

The article analyzes the peculiarities of the expressions "sustainable agriculture" (*Sustainable agriculture*) and "sustainable rural development" (*sustainable rural development*). The inevitability of the transition of rural communities to sustainable rural development by implementing the principles of sustainable agriculture has been established.

The issue of atmospheric air quality and public safety is relevant both at the local, regional and state levels. Updated in 2019, the procedure for state monitoring of the state of atmospheric air includes a list of 13 priority pollutants (list A – sulfur dioxide, nitrogen dioxide and oxides, benzene, carbon monoxide, ozone, solid particles with a diameter of 2.5 and 10 μm (PM_{2.5}; PM₁₀) and other pollutants). In order to manage atmospheric air quality, this Order establishes 25 zones and 24 agglomerations on the territory of Ukraine, as well as determines the upper and lower assessment thresholds for priority pollutants (and for sulfur and nitrogen dioxides, separate limit values for the protection of human health and for "protection of ... ecosystems"). The resolution required regional and city state administrations to submit regional monitoring programs in the field of atmospheric air protection to the Ministry of Environment for approval by July 1, 2021. The authors note that by the beginning of 2024, a number of cities (agglomerations) and regional state administrations (ODA) have developed and are implementing independent regional environmental monitoring systems, but at the level of rural settlements, such programs are still unknown.

By analyzing the market of automatic measuring devices (stations), the possibilities of enterprises and local authorities to ensure timely and reliable measurement of pollutant concentrations were determined. The authors focused on the main problems and features of the organization of monitoring observations at the level of the rural united territorial community and tried to determine the tasks of further scientific research in this direction. Comparative and analytical research methods are used in the work. *Key words*: atmospheric air quality monitoring, indicators of sustainable development, automatic stations.

Постановка проблеми. Під сталим сільським господарством (*Sustainable agriculture*) треба розуміти «використання систем землеробства, які зберігають або покращують економічну доцільність сільськогосподарського виробництва» і його «природно-ресурсну базу» [1]. Автори ювілейної доповіді Римському клубу «Come On!» звернули увагу на

невідворотність переходу до сталого сільського розвитку (*sustainable rural development*) [2]. Вікіпедія, посилаючись на архів University of New England, надає таке визначення – «Стале сільське господарство» – це сільське господарство сталого розвитку, яке формується на основі розуміння екосистемних послуг з пріоритетним врахуванням взаємозв'яз-

¹ Постанова Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 року № 827

ків між організмами та їх середовищем існування з метою задоволення поточних потреб суспільства і збереження здатності майбутніх поколінь задовольняти власні потреби» [3].

Вираз «сталий розвиток» (sustainable development) з 1987 року розуміють як особливий шлях розвитку *суспільства*, при якому забезпечуються потреби нинішнього покоління і зберігається можливість майбутнім поколінням забезпечувати свої потреби [4]. Таким чином під «сталим сільським господарством» варто розуміти саме «сталий сільський розвиток», тобто таку організацію життєдіяльності сільської громади, при якій забезпечуються сучасні потреби всіх членів сільської громади з врахуванням можливостей майбутніх поколінь забезпечувати свої потреби [5]. Головними умовами переходу до *сталого сільського розвитку є збереження* природно-ресурсної бази сільської громади і врахування всього комплексу потенційних екосистемних послуг. До основних принципів сталості для переходу до сталого сільського господарства відносять [6]:

- інтегрування біологічних та екологічних процесів (кругообіг поживних речовин, фіксація азоту, регенерація ґрунту тощо) у процеси виробництва сільськогосподарської продукції,

- мінімізація використання невідновлюваних ресурсів в аграрній сфері для мінімізації шкоди довкіллю та здоров'ю населення,

- продуктивне використання знань і навичок фермерів для підвищення їхньої самозабезпеченості і *людського капіталу*;

- продуктивне використання колективного потенціалу сільської громади для спільної роботи над вирішенням загальних проблем.

Метою Концепції розвитку сільських територій, є поліпшення якості життя людей, що живуть на сільських територіях шляхом покращення взаємодії між центральними та місцевими органами виконавчої влади і органами місцевого самоврядування [7]. Більше того, для переходу сільських територій на засади сталого сільського розвитку необхідно визначити пріоритетні показники (індикатори) сталого розвитку на місцевому рівні [8], які визначені у 17-ти Національних Цілях сталого розвитку (ЦСР) України [9]. Зокрема, ЦСР3 (Міцне здоров'я і благополуччя), ЦСР11 (Сталий розвиток міст і громад) і ЦСР17 (Партнерство заради сталого розвитку) передбачають відповідно «забезпечення здорового способу життя» та забезпечення «життєстійкості й екологічної стійкості ... населених пунктів», зокрема, шляхом досягнення партнерства між владою і бізнесом. Одним з проявів втрати життєстійкості населених пунктів, зокрема, сільських, є забруднення атмосферного повітря. При цьому ЦСР3 розглядається експертами «в якості акселератора перетворень», а ЦСР11 – «як основа або вимір якості перетворень» [8]. Тому для переходу до сталого сільського розвитку важливо, щоб місцеві органи виконавчої влади, органи місцевого самоврядування і громадськість мали змогу контролювати якість атмосферного повітря і своєчасно приймати управлінські рішення щодо забезпечення достатньої якості атмосферного повітря на території сільської громади.

Можна стверджувати, що атмосферне повітря є одним із найбільш життєво критичних природних ресурсів, без якого неможливе життя і повноцінна діяльність людини. Від якості атмосферного повітря залежить здоров'я як окремого громадянина, так і всієї громади. Саме тому питання якості атмосферного повітря є актуальним на рівні кожної адміністративної одиниці та держави в цілому.

За останні роки більшість зон і агломерацій в Україні розробили власні програми моніторингу довкілля, зокрема, атмосферного повітря, їхню повноцінну реалізацію почали тільки зона Київська, агломерації Київ, Чернівці, Дніпро та деякі інші, а на рівні сільських населених пунктів про такі програми поки що невідомо.

Актуальність досліджень. Порядок функціонування державної системи моніторингу довкілля був суттєво вдосконалений Постановою КМУ від 13 червня 2024 р. № 684 [10]. Система моніторингу розглядається Постановою як інструмент державного управління в галузі охорони довкілля та допомога у розробленні науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття ефективних управлінських рішень з метою забезпечення переходу до сталого сільського розвитку шляхом досягнення Цілей сталого розвитку в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розроблене Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів Положення про регіональні центри моніторингу довкілля визначає основні вимоги до організації і функціонування регіональних центрів і системи моніторингу довкілля для забезпечення органів влади і місцевого самоврядування об'єктивною та своєчасною інформацією для прийняття управлінських рішень [11].

Форма регіональної програми моніторингу довкілля передбачає можливість отримання інформації про потенційні джерела впливу на довкілля, розташовані на відповідній території (підприємства, зареєстровані транспортні засоби; загальна протяжність доріг тощо); викиди забруднюючих речовин від усіх джерел забруднення; інформацію щодо сертифікації обладнання [12]. Програму державного моніторингу атмосферного повітря рекомендовано розробляти на 5 років і вона має включати інформацію про «мережу спостережень, *перелік пунктів спостережень* та лабораторії, які здійснюють фіксовані вимірювання, їх адреси та географічні координати, карти-схеми розміщення пунктів спостережень; перелік показників, які визначають лабораторним способом та іншими методами аналізу» [13]. Вимоги до кількості та розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах і агломераціях регламентовані Наказом Міністерства внутрішніх справ України 21 квітня 2021 року № 300 [14]. Згідно з цим наказом у сільській місцевості пункти спостережень розташовують не ближче ніж за 5 км від промислових міст безпосередньо на вулицях, а для отримання інформації про вплив забруднення атмосферного повітря на здоров'я населення, рекомендовано вимірювати концентрації діоксиду сірки (SO₂), діоксиду азоту (NO₂) та дрібнодисперсних твердих часток (ТЧ₁₀ і ТЧ_{2,5}). Окрім того, для

отримання інформації про вплив приземного озону (O_3) на населення та природні екосистеми пункт спостережень на території сільської громади треба розміщувати на відкритих ділянках місцевості якнайдалі від джерел безпосередніх місцевих викидів.

На сьогодні в Україні, паралельно з державними, активно і досить успішно розвиваються регіональні (муніципальні) та громадські мережі моніторингу атмосферного повітря (такі як Eco City, SaveDnipro, ЛУН Місто Air, Luftdaten info, PurpleAir, Airly та інші) [15]. Більшість цих мереж передають інформацію на платформи aqicn.org та waqi.info, веб-сайти яких створені проектом World Air Quality Index. Згадані платформи з автоматичними станціями можуть забезпечувати громадськість і органи місцевої влади відносно достовірною інформацією відповідно до вимог Постанови КМУ від 14 серпня 2019 р. № 827.

Сільську об'єднану територіальну спільнота можна вважати, на думку Г. Л. Монастирського, територіально-просторовою, економічною, соціальною, політичною та екологічною системою [16]. Міністерство розвитку громад та територій у рекомендаційній методиці вважає громади з чисельністю населення 3–5 тисяч і площею 200–400 кв. км середніми за рівнем спроможності і за площею [17]. Формування місцевої стратегії сталого розвитку (МССР) окрім аналізу сильних та слабких сторін (SWOT), передбачає «визначення цілей, індикаторів розвитку та пріоритетів, а також розробки плану дій, в рамках якого реалізовувати стратегічну мету та цілі» [18]. До цілей місцевого сталого розвитку, зокрема, сталого сільського розвитку, безумовно відноситься «забезпечення здорового способу життя» та «життєстійкості ... населених пунктів. Тому, при розробці місцевих планів дій логічно внести формування системи моніторингових спостережень за якістю атмосферного повітря.

Новизна. Розроблені методичні підходи до розробки програми моніторингу якості атмосферного повітря на рівні сільської громади в контексті переходу до сталого сільського розвитку. Запропоновано методику вибору засобів спостереження за якістю атмосферного повітря і місць розташування пунктів спостереження на території сільської громади. Це сприятиме більш ефективному функціонуванню системи моніторингу атмосферного повітря і покращенню якості життя мешканців сільської громади.

Результати досліджень. До потенційних джерел забруднення атмосферного повітря на територіях ОТГ відносяться тваринницькі ферми є потужним джерелом викидів метану (NH_4), який також сприяє забрудненню повітря приземним озоном (викликає астму та інші респіраторні хвороби). Метан є одним з головних парникових газів. Відкрите спалювання сільськогосподарських решток є головним вкладником забруднення повітря на території ОТГ твердими частинками в тому числі сажею. Побутове забруднення і викиди транспортних засобів також містять дрібнодисперсний пил, озон і діоксид азоту. Система моніторингу якості атмосферного повітря на рівні сільської громади повинна забезпечити органи місцевого самоврядування об'єктивною інформацією для прийняття ефективних управлінських рішень.

Згідно з Порядком здійснення державного моніторингу² в галузі охорони атмосферного повітря пріоритетними забруднювальними речовинами є діоксид сірки (SO_2), діоксид азоту (NO_2), озон (O_3), метан (NH_4) та дрібнодисперсний пил (TCH_{10} і $TCH_{2,5}$). Для вимірювання концентрацій цих речовин рекомендується використовувати сертифіковані пристрої, на кшталт фінської автоматичної станції Vaisala AQT420, яка внесена у «Реєстр затверджених типів засобів вимірювальної техніки»³ і коштує близько 20 тис. євро. Суттєво дешевшим варіантом для індикативного поста спостережень можна рекомендувати також сертифікований газоаналізатор SKY 8000 (близько 10 тис. євро).

Згідно з наказом МВС 21.04.2021 № 300⁴ при кількості населення в агломерації в межах 2750–3749 тис. чоловік (Київ) мінімальна кількість пунктів спостережень, де проводять фіксовані вимірювання (референтні станції), має бути не менше 10. Оскільки середня чисельність населення ОТГ становить 3–5 тис. чоловік, то згідно з Порядком розміщення пунктів спостережень⁵ на території ОТГ має бути 1–4 стаціонарних (індикативних) автоматичних постів. У випадку недостатньої фінансово-економічної спроможності можна рекомендувати органам місцевого самоврядування ОТГ розбудувати мережу громадського моніторингу на базі автоматичних станцій SaveDnipro, LUN misto Air, EcoCity, Luftdaten або інших, на платформах AirNet (<https://aqicn.org/>) або SaveEcoBot (<https://www.saveecobot.com/en/maps>). В Україні серед доступних за ціною автоматичних станцій можна рекомендувати бюджетні автоматичні станції, розробки громадських організацій SaveDnipro (SaveEcoSensor 3.0) та EcoCity (AirFreshMax), які можуть бути укомплектовані з урахуванням особливостей конкретної громади сенсорами. Як приклад можна навести використання таких станцій в навчальному процесі вже більше 5 років⁶. Станція AirFreshMax встановлена на висоті 5 м на фасаді 3-го корпусу НУБІП України за 20 м від центральної частини вулиці Героїв Оборони і вимірює концентрації основних поллютантів, рекомендованих Постановою КМУ від 14 серпня 2019 року № 827 (рис. 1).

Аналіз даних станції за 5 років роботи свідчить, що у весняно-літній період найбільш критичним для населення і довкілля видається приземний озон, концентрація якого на території університетського кампусу перевищує небезпечний рівень практично

² Постанова КМУ від 14 серпня 2019 року № 827

³ Реєстр затверджених типів засобів вимірювальної техніки <https://data.gov.ua/dataset/a507fe14-87d0-4da3-bd25-8fb6e7cab1e>

⁴ Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 21.04.2021 № 300 «Про затвердження Порядку розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0635-21#Text>

⁵ Додаток 1 Наказу МВС про "Порядок розміщення пунктів спостережень..." <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0635-21#Text>

⁶ Станція AirFreshMax була подарована кафедрі загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності НУБІП України в рамках реалізації проекту «Smog Alarm Ukraine: Expertise and law in the civic campaigns for air protection», одна станція SaveEcoSensor була придбана кафедрою ще у 2018 році, а друга станція (SaveEcoSensor 3.0) подарована університету у 2024 році.

кожну добу, інколи по 8 годин, при цьому концентрації інших показників практично не перевищують нормативні значення.

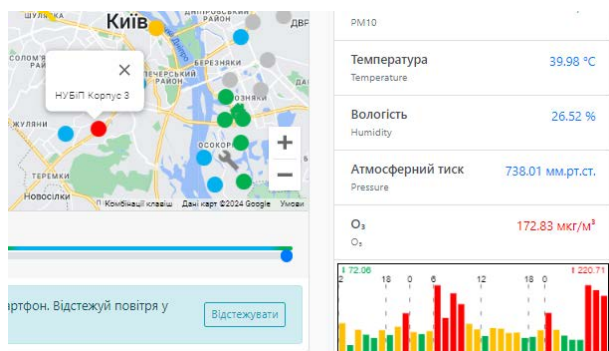


Рис. 1. Дані станції на 10 годину 02 липня 2024 року

Ще у 2004 році у США утворилась громадська організація «Коаліція чистого повітря», яка запропонувала «концепцію громадської науки» і створила відносно прості сучасні пристрої для аналізу якості атмосферного повітря [19]. Про важливість ролі громадськості у контролі якості атмосферного повітря, свідчить реакція Агенції з охорони навколишнього середовища США (EPA) на громадські ініціативи шляхом вдосконалення державної системи моніторингу якості повітря і створення сайту *Air Sensor Toolbox*.

В Україні схожу роль виконують громадські організації EcoCity⁷, SaveDnipro⁸, LUN misto та інші ГО разом з міжнародною програмою «Чисте повітря для України» [20]. Таким чином, активізація участі громадськості у контролі за якістю повітря сприяє впровадженню передових практик в системи як державного, так і локального моніторингу якості повітря. Треба підкреслити, що станції «AirFreshMax» і SaveEcoSensor – це станції моніторингу якості повітря нового покоління, в основу яких покладена популярна у всьому світі концепція «громадянської науки» [19].

Неконтрольоване зростання громадських мереж і кількості автоматичних станцій на території України має певний позитивний момент у контексті зростання можливостей поінформованості громадськості щодо якості повітря в проживання людей. При цьому, досить часто такі станції не забезпечують достатню точність вимірювань і функціональну достатність станцій. З іншого боку, сільська громада на рівні органів самоврядування має можливість координувати як кількісний, так і якісний склад станцій мережі моніторингу атмосферного повітря для отримання обґрунтованих даних, необхідних для прийняття управлінських рішень. Одним з шля-

хів підвищення точності і достовірності інформації, отриманої з станцій громадської мережі моніторингу, може бути своєчасна повірка і калібрування роботи таких станцій за допомогою сертифікованих мобільних (переносних) станцій, на кшталт газоаналізаторів SKY 8000¹⁰, Aeroqual Series 300¹¹ і незабаром Sapphire 64¹² (рис. 2).

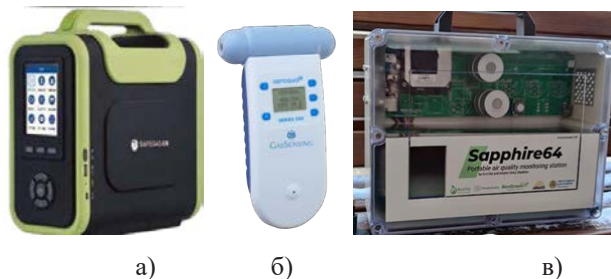


Рис. 2. Загальний вигляд переносних газоаналізаторів а) SKY 8000; б) Aeroqual Series 300; в) Sapphire 64

Ще одним варіантом формування мережі моніторингу атмосферного повітря є автоматичні станції GAIA (рис. 3), розроблені Earth Sensing [21].



Рис. 3. Загальний вигляд бюджетної автоматичної станції GAIA A12

Вартість GAIA A12 становить близько 200 доларів. Усі станції моніторингу якості повітря серії GAIA тестуються індивідуально і працюють досить надійно і точно визначають концентрації пріоритетних поллютантів з використанням 3 резервних датчиків – сенсорами дрібнодисперсного пилу (тверді частинки ТЧ1, ТЧ2,5, ТЧ10). Станції цієї серії мають метеодатчики: ASAIR АНТ-20; світлодіоди RGB для візуальної індикації забруднення повітря, а також можливість підключення через WIFI і додаткову SD-карту пам'яті для роботи поза мережею.

Таким чином, для формування громадської мережі моніторингу атмосферного повітря на рівні сільської громади можна використовувати декілька бюджетних автоматичних станцій (орієнтовно

⁷ Чисте повітря для України. Встанови свою станцію. <https://cleanair.org.ua/vstanovy-sviyu-sensor/>

⁸ Команда SaveDnipro сприяє впровадженню екологічних реформ та відкриттю суспільно-важливої екологічної інформації. <https://www.savednipro.org/about-team/>

⁹ Спільна програма ГО «Арніка» (Прага, Чехія) та мережі місцевих неурядових організацій з різних регіонів України, працює з 2017 року. <https://cleanair.org.ua/pro-nas/>

¹⁰ Багатофункціональні газоаналізатори SKY 8000 (PM 10/2.5, HCHO, CH₄, O₃, H₂S, CO, NO₂, SO₂). <https://industry.hlr.ua/katalog/sky8000-gas-analyzer-ukr-hlr.pdf>

¹¹ GasSensing. <https://www.aeroqual.com/s-series-portable-air-monitors/portable-particulate-monitor>

¹² Дослідна мобільна станція громадського моніторингу якості повітря Sapphire64 від команди розробників EcoCity, створена за ресурсної та технічної підтримки чеської громадської організації ARNIKA у рамках міжнародного проекту «Чисте повітря для України».

5–10 станцій на громаду) і хоча б одну сертифіковану мобільну автоматичну станцію, щоб мати можливість періодично калібрувати станції в мережі.

Висновки

1. Під «сталим сільським господарством» варто розуміти саме «сталий сільський розвиток», тобто таку організацію життєдіяльності сільської громади, при якій забезпечуються сучасні потреби всіх членів сільської громади з врахуванням можливостей майбутніх поколінь забезпечувати свої потреби. Однією з умов переходу до сталого сільського розвитку є збереження якості життя жителів сільської громади.

2. Головними умовами переходу до *сталого сільського розвитку* можна вважати розвиток сільського господарства на принципах сталого розвитку шляхом збереження природно-ресурсної бази сільської громади з врахуванням всього комплексу потенційних екосистемних послуг і продуктивним використанням колективного потенціалу сільської громади для спільної роботи над вирішенням загальних проблем підвищення якості життя.

3. Одним з пріоритетних індикаторів переходу сільської громади на засади сталого сільського розвитку можна вважати наявність мережі моніторингових спостережень і системи наукової підтримки прийняття управлінських рішень щодо забезпечення достатньої якості атмосферного повітря на території ОТГ, що сприятиме виконанню 3-х цілей сталого розвитку ЦСРЗ (завдання 3.4, 3.5), ЦСР11 (завдання 11.2, 11.4, 11.5) і ЦСР17 (завдання 17.3).

4. При підготовці місцевої програми моніторингу довкілля, зокрема, моніторингу якості атмосферного повітря, та її повноцінної реалізації на території ОТГ можна рекомендувати процедуру формування громадської мережі моніторингу атмосферного повітря з використанням декількох бюджетних автоматичних станцій (орієнтовно 5–10 станцій на громаду) і однієї сертифікованої мобільної (переносної) автоматичної станції для періодичної калібрування станцій в мережі.

Література

1. RIRDC Short Report N20: Developing Indicators for Sustainable Agriculture. URL: <https://web.archive.org/web/20070613145457/http://www.rirdc.gov.au/pub/shortreps/sr20.html>. (дата звернення: 04.07.2024).
2. Von Weizsaecker, E., Wijkman, A. Come On! Capitalism, Short-termism, Population and the Destruction of the Planet. – Springer, 2018. – 220 p.
3. Стале сільське господарство. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%B5_%D1%81%D1%96%D0%BB%D1%8C%D1%81%D1%8C%D0%BA%D0%B5_%D0%B3%D0%BE%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE. (дата звернення: 06.07.2024).
4. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
5. Пустова С.В., Боголюбов В.М. Соціально-економічний розвиток сільських громад в контексті сталого сільського розвитку. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u210/zb_tez_dop_.pdf#page=135.
6. Pretty, Jules (12 лютого 2008). Agricultural sustainability: concepts, principles and evidence. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* (англ.). 363 (1491): 447–465. URL: doi:10.1098/rstb.2007.2163 (дата звернення: 05.07.2024).
7. Сільський розвиток. Інформація про виконання Плану заходів з реалізації Концепції розвитку сільських територій у 2023 році. URL: <https://minagro.gov.ua/naryamki/rozvitok-silskih-teritorij>. (дата звернення: 06.07.2024).
8. Боголюбов В.М., Клепко А.В., Бондарь В.І., Наумовська О.І. Модель функціонування сільських територій на засадах сталого сільського розвитку. *Екологічні науки*, 2023, № 48. С. 17–22. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.3-48.2>.
9. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text>
10. Порядок функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем. Постанова КМУ від 13 червня 2024 р. № 684. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-%D0%BF#Text>
11. Примірне положення про регіональні центри моніторингу довкілля. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Ryuminne-polozhennya-regionalni-tsentry-pdf-3.pdf>.
12. Постанова КМУ від 14 серпня 2019 року № 827 «Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>.
13. Ткачук О.П., Мазур О.В. Проблеми адаптації системи моніторингу атмосферного повітря в Україні до вимог Європейського Союзу. *Екологічні науки*, 2024. № 1(52), Том 1. С. 65–70. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.9>.
14. Порядок розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0635-21#Text> (дата звернення: 06.07.2024).
15. Сагайдак Д.А., Боголюбов В.М. Аналіз систем моніторингу атмосферного повітря в місті Києві. *Екологічні науки*, 2024. № 1(52), Том 1. С. 51–58. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.7>
16. Територіальні громади в умовах децентралізації: ризики та механізми розвитку: монографія / за ред. Кравціва В. С., Сторонянської І. З. Львів: ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України, 2020. 531 с. URL: <https://ird.gov.ua/irdp/p20200001.pdf>
17. Як визначити, які громади є спроможними? URL: <https://decentralization.uacrisis.org/discussion19> (дата звернення: 04.07.2024).
18. Планування стратегії місцевого сталого розвитку. Посібник. К., 2005. URL: http://msdp.undp.org.ua/data/publications/losd_manual_ukr.pdf
19. The Air Sensor Toolbox | Citizen Scientists Measure Air Quality. URL: <https://www.citizenscience.gov/air-sensor-toolbox>. (дата звернення: 05.07.2024).
20. Все про повітря. Чисте повітря для України. URL: <https://cleanair.org.ua/>. (дата звернення: 09.07.2024).
21. Монітори якості повітря Gaia – серія продуктів. URL: <https://aqicn.org/gaia/>. (дата звернення: 06.07.2024).

БІОІНДИКАЦІЙНА ОЦІНКА ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УМОВАХ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Коляда О.В., Головань Л.В., Чуприна Ю.Ю., Сургай Л.Л.
Державний біотехнологічний університет
вул. Алчевських, 44, 61002, м. Харків
olyakolyadapovh@gmail.com, golovanlarisa14@gmail.com,
rybchenko_yuliya@ukr.net, zlusek4@gmail.com

На сьогодні в умовах надмірного антропогенного навантаження на навколишнє середовище надзвичайно важливим є моніторинг якості атмосферного повітря, в тому числі в невеликих населених пунктах. Одним із ефективних та економічно доцільних методів дослідження якості атмосферного повітря є ліхеноіндикація. У статті досліджено якість атмосферного повітря в межах смт Кранокутськ Харківської області методом ліхеноіндикації. В цілому, за результатами проведеної ліхеноіндикаційної оцінки стану атмосферного повітря в межах населеного пункту було визначено сім видів лишайників, а саме чотири види листових лишайників – фісція ніжна (*Physcia tenella*), гіпогімнія (*Hypogymnia*), пармелія борозниста (*Parmelia sulcata*), ксанторія настінна (*Xanthoria parietina*), два види накипних – ризокарпон географічний (*Rhizocarpon geographicum*), аспіцилія (*Aspicilia*), та один вид кущистих лишайників – евернія сливова (*Evernia prunastri*).

Визначено, що на ділянках із середньою інтенсивністю руху автотранспорту спостерігається, найнижчий ступінь проєктивного покриття стовбурів дерев лишайниками. В районі автостанції, на розі вулиці Миру та Захисників, а також поблизу АЗС Укрнафта атмосферне повітря є слабо забрудненим. Переважаючими на цих територіях є стійкі до забруднення види лишайників такі, як *Rhizocarpon geographicum* та *Xanthoria parietina*. На околицях дендропарку та прилеглий до нього вулиці, з мінімальною інтенсивністю руху автомобілів, ступінь проєктивного покриття лишайниками підвищувався, якість атмосферного повітря значно покращувалась, збільшувалась різноманітність видів лишайників, в тому числі кущистих. Ступінь проєктивного покриття дерев лишайниками становив 60,1–62,4%, індекс чистоти повітря – 11,9–12,5 одиниці. Встановлено дуже високий кореляційний зв'язок між інтенсивністю руху автомобілів та ступенем проєктивного покриття лишайниками, а відповідно і якістю атмосферного повітря на досліджуваних територіях. *Ключові слова:* атмосферне повітря, забруднення, ліхеноіндикація, антропогенне навантаження, лишайники.

Bioindicative assessment of atmospheric air quality under conditions of anthropogenic pressure. Koliada O., Golovan L., Chuprina Yu., Surgai L.

Today, in the context of increased anthropogenic pressure on the environment, it is extremely important to monitor the quality of atmospheric air, including in small urban-type villages. One of the effective and economically feasible methods for studying atmospheric air quality is lichen indication. The article investigates the quality of atmospheric air within the urban-type villages of Kranokutsk, Kharkiv region, using the method of lichen indication. In general, according to the results of the lichen-indication assessment of the state of atmospheric air within the village, seven species of lichens were identified, namely four species of leaf lichens – tender fissure (*Physcia tenella*), hypogymnia (*Hypogymnia*), furrowed parmelia (*Parmelia sulcata*), wall xanthoria (*Xanthoria parietina*), two species of scaling lichens – *Rhizocarpon geographicum* and *Aspicilia*, and one species of bushy lichen – *Evernia prunastri*.

It was determined that the areas with medium traffic intensity have the lowest degree of projective coverage of tree trunks with lichens. In the area of the bus station, at the corner of Myru and Zakhystnykiv streets, and near the Ukrnafta gas station, the air is slightly polluted. Pollution-resistant lichen species such as *Rhizocarpon geographicum* and *Xanthoria parietina* predominate in these areas.

It was determined that areas with medium traffic intensity have the lowest degree of projected lichen coverage of tree trunks. In the area of the bus station, at the corner of Myru and Zakhystnykiv streets, and near the Ukrnafta gas station, the air is slightly polluted. Pollution-resistant lichen species such as *Rhizocarpon geographicum* and *Xanthoria parietina* predominate in these areas. On the outskirts of the arboretum and the adjacent street, with minimal traffic, the degree of projected lichen coverage increased, air quality improved significantly, and the diversity of lichen species, including bushy lichens, increased. The degree of projected lichen coverage of trees was 60.1–62.4%, and the air purity index was 11.9–12.5 units. A very high correlation was found between the intensity of car traffic and the degree of projected lichen coverage, and, accordingly, the quality of atmospheric air in the study areas. *Key words:* atmospheric air, pollution, lichen indication, anthropogenic load, lichens.

Постановка проблеми. Одним з ключових параметрів якості життя населення будь-якої країни є якість навколишнього середовища. На сьогодні середня тривалість життя в Україні майже на 13 років нижча, ніж в Японії чи Швейцарії. Однією із причин такої ситуації є забруднене довкілля. Одним із основних життєво важливих елементів довкілля є атмосферне повітря. Сьогодні в умовах надмірного антропогенного навантаження, відбувається

значне його забруднення хімічними речовинами, твердими частинками та біологічними матеріалами. Це призводить до порушення природного механізму самоочищення атмосфери та стабільності кругообігу шкідливих речовин, і як наслідок, спричиняє глобальні зміни в атмосфері. Зокрема, змінюється хімічний склад атмосфери, її фізико-хімічні властивості, що проявляється негативним впливом на стан біорізноманіття, здоров'я населення та зміни клі-

мату [1]. Така ситуація вимагає постійного спостереження за основними параметрами якості атмосферного повітря, з метою своєчасного реагування на перевищення встановлених нормативів та розроблення відповідних рекомендацій щодо збереження здоров'я населення, запобігання негативних явищ в екосистемах та усунення наслідків антропогенної діяльності.

Актуальність дослідження. На сьогодні науково підтверджено тісний кореляційний зв'язок між рівнем забруднення атмосферного повітря та захворюваністю населення. Відповідно до даних Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) щороку в світі від забруднення атмосферного повітря передчасно помирають мільйони людей. Що стосується України, то за рівнем забрудненості повітря наша країна перебуває на восьмому місці в Європі та на сорок третьому – в світі. Згідно з інформацією бази даних Глобального тягаря хвороб (GBD) в Україні в 2019 році 42 900 передчасних смертей (10,0% від усіх випадків захворюваності та смертності) були пов'язаними із забрудненням атмосферного повітря [2]. В таких умовах дуже важливим є постійний моніторинг стану атмосферного повітря в населених пунктах, аналіз умісту основних забруднюючих речовин та своєчасне інформування населення щодо можливих ризиків. Саме на основі даних моніторингу стану забруднення атмосферного повітря розробляють заходи щодо покращення якості повітряного басейну.

Особливої уваги заслуговує моніторинг якості атмосферного повітря в невеликих населених пунктах, на території яких не організовано системи стаціонарних постів спостереження. Сьогодні, окрім стаціонарних джерел забруднення атмосферного повітря, значну небезпеку для атмосфери становить автотранспорт, в тому числі й для невеликих міст. Для моніторингу якості атмосферного повітря в невеликих населених пунктах доцільно використовувати біоіндикаційні методи, серед яких особливої уваги заслуговує ліхеноіндикація. Даний метод є простим у застосуванні, ефективним та економічно вигідним. Саме тому, метою нашої роботи є оцінка рівня забруднення атмосферного повітря смт Краснокутськ Харківської області методом ліхеноіндикації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Ліхеноіндикаційні дослідження стану атмосферного повітря активно почали проводитись в Україні з 90-х років ХХ ст. На сьогодні ліхеноіндикаційну оцінку якості атмосферного повітря здійснено у багатьох містах України. Зокрема, у роботах Федонюк В. В. та співавторів представлено результати ліхеноіндикаційної оцінки екологічного стану повітряного басейну міста Луцьк [3]. Зоріна Н. О., Радловська К. О., Боднар Н. В., Голембійовська М. Ю. провели оцінку екологічного стану атмосфери міста Івано-Франківськ даним методом [4]. Низка наукових

праць присвячена дослідженню стану атмосферного повітря міст Київської області [5]. Також на сьогодні ліхеноіндикаційну оцінку якості атмосферного повітря здійснено в багатьох інших містах України, зокрема в Чернівцях [6], Сумах [7], Путивлі [8] та ін. Що стосується міста Харків, науковцями Ричак Н. Л. та Свистуною А. М. [9] проведено оцінку атмосферного повітря методом ліхеноіндикації урбосистем Шевченківського району міста. Що стосується біоіндикації якості атмосферного повітря населених пунктів Харківської області, то останнім часом такі дослідження не проводились взагалі.

Матеріали та методи досліджень. Для оцінки якості атмосферного повітря в смт Краснокутськ Богодухівського району Харківської області застосовували метод так званої пасивної ліхеноіндикації, зокрема було проведено візуальні спостереження за поширенням лишайників у середовищі, зроблено необхідні підрахунки, обчислено та встановлено середні статистичні показники проєктивного покриття лишайниками дерев у визначених місцях дослідження. Дослідження було проведено в різних районах селища під час вегетативного сезону 2022 року. Зокрема, ліхеноіндикаційну оцінку якості атмосферного повітря здійснено в районі АЗС Укрнафтагаз, автостанції, на розі вулиці Миру та захисників України, Березівському провулку, а також на околиці Краснокутського дендропарку (рис. 1).

Для проведення дослідження використовували: збільшуваче скло (лупа), каталоги-визначники лишайників, олівець, блокнот, компас, коробку для збору лишайників, палетку з поліетилену 20*20 см, пляшку з водою, конверти для подальшого зберігання лишайників та пінцет.

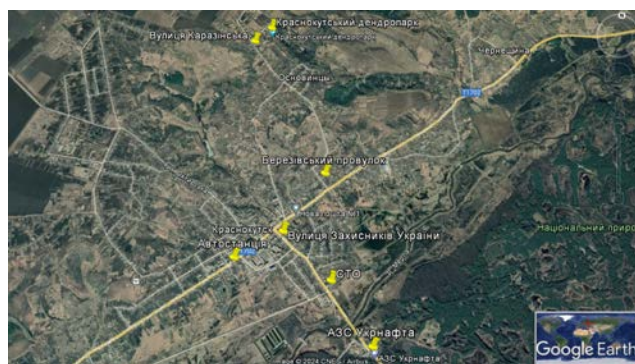


Рис. 1. Картосхема місць проведення ліхеноіндикаційних досліджень в межах смт Краснокутськ

Дослідження було проведено відповідно до методики, запропонованої Х. Трассом та його послідовниками. Вимірювання здійснювали на пробних майданчиках, які включали визначення проєктивного покриття лишайників із використанням бальної шкали Браун-Бланке (0 балів – лишайники вкрай рідкі, із практично незначним ступенем покриття;

1 бал – лишайники присутні великою кількістю, проте ступінь покриття є незначним або розрідженим, із великою площею покриття; 2 бали – лишайників багато, із проєктивним покриттям від 10,0 до 25,0%; 3 бали – лишайники присутні в будь-якій кількості, з покриттям від 25,0% до 50,0%; 4 бали – лишайники присутні в будь-якій кількості, із покриттям від 50,0% до 75,0%; 5 балів – лишайники мають високий ступінь покриття, більший за 75,0% [10]. Наступним етапом дослідження було передбачено розрахунок індексу чистоти повітря (ІЧП), який представляє собою числове значення, що формально відображає параметри ліхеноіндикаційних досліджень. Розрахунок індексу чистоти повітря проводили відповідно до методики Ле Блана та Де Слувера [8]. Відповідно до значення ІЧП виділяють наступні зони забруднення: дуже забруднена зона – ІЧП – 0–1,0; середньо забруднена зона – ІЧП – 1,0–5,0; слабо забруднена зона – ІЧП – 5,0–10,0; незабруднена зона – ІЧП – більше 10,0.

Для оцінки забруднення атмосферного повітря досліджуваного населеного пункту необхідно обирати вид дерева, який є найбільш поширеним на даній території. В нашому випадку в якості досліджуваного субстрату у визначених районах селища використовували каштани. На кожній досліджуваній ділянці було вибрано однакову кількість дерев без пошкоджень (більше 10 дерев одного виду на відстані 2,5–8,0 м), які мають приблизно однаковий вік. Ступінь покриття стовбурів дерев лишайниками визначали за допомогою палетки, також відмічали домінуючі види на кожній ділянці.

Викладення основного матеріалу. Стан атмосферного повітря певної території залежить від обсягів забруднюючих речовин стаціонарних та пересувних джерел забруднення. Стаціонарні джерела забруднення повітря в селищі представлені АЗС, котельнями, серед промислових підприємств в Краснокутській селищній громаді сьогодні функціонують ДП «Дублянський спиртзавод», КП «Джерело», ПП

«Явір», ПП «Цукровик-Агро», ТОВ «Партнер люкс» (проте дані підприємства знаходяться поза межами селища). З огляду на це, якість атмосферного повітря в смт Краснокутськ в основному формується обсягами викидів забруднюючих речовин від пересувних джерел забруднення. На сьогодні основними чинниками інтенсивного забруднення атмосфери автотранспортом є: постійно зростаюча кількість автомобілів; експлуатація технічно застарілого автомобільного парку; низька якість паливномастильних матеріалів; недостатня пропускна спроможність дорожньо-транспортної мережі, яка сформувалась в умовах існуючої забудови; незадовільний стан дорожнього покриття проїзної частини доріг. Саме дані фактори ймовірно мали вплив на формування забруднення атмосферного повітря в окремих районах селища.

За результатами проведеної ліхеноіндикаційної оцінки стану атмосферного повітря в смт Краснокутськ було визначено сім видів лишайників серед яких: чотири види листових лишайників – фісція ніжна (*Physcia tenella*), гіпогімнія (*Hypogymnia*), пармелія борозниста (*Parmelia sulcata*), ксанторія настінна (*Xanthoria parietina*); два види накипних лишайників – ризокарпон географічний (*Rhizocarpon geographicum*) та аспіцилія (*Aspicilia*), та один вид куцистих лишайників – евернія сливова (*Evernia prunastri*).

Найбільш чутливими до забруднення є види куцистих лишайників. Представників даного виду, зокрема *Evernia prunastri*, у наших дослідженнях було виявлено лише на околицях дендропарку на значній відстані від центральної автомагістралі. Переважаючими в цій зоні є листуваті лишайники – фісція ніжна (*Physcia tenella*), гіпогімнія роздута (*Hypogymnia physodes*), пармелія борозниста (*Parmelia sulcata*). Дані групи індикаторів належать до середньо чутливих до забруднення атмосферного повітря. Ступінь покриття лишайниками на околиці дендропарку та на вулиці Каразінській становив 62,4% та 60,1% відповідно, що згідно існуючих методик відповідає зоні відносно чистого повітря. Значення ІЧП складало 12,5 та 11,9 одиниці (табл. 1).

Таблиця 1

Результати ліхеноіндикаційної оцінки якості атмосферного повітря смт Краснокутськ

Місце дослідження	Ступінь покриття лишайниками, %	ІЧП	Ступінь забруднення повітря за проєктивним покриттям	Ступінь забруднення повітря за ІЧП
Околиця Краснокутського дендропарку	62,4	12,5	4-та зона, відносно чисте повітря	незабруднена зона
Вулиця Каразінська	60,1	11,9	4-та зона, відносно чисте повітря	незабруднена зона
Березівський провулок	52,3	10,5	4-та зона, відносно чисте повітря	незабруднена зона
Вулиця Миру (р-н автостанції)	45,3	9,0	3-тя зона, помірне забруднення	слабко забруднена зона
Вулиця Зарічна (АЗС Укрнафта)	48,1	9,6	3-тя зона, помірне забруднення	слабко забруднена зона
Вулиця Захисників України	49,5	9,9	3-тя зона, помірне забруднення	слабко забруднена зона

В різних районах дослідження вздовж автомагістралі найчастіше зустрічалися накипні лишайники – ризокарпон географічний (*Rhizocarpon geographicum*) та аспіцилія (*Aspicilia*), а також лише один вид листуватих – ксанторія настінна (*Xanthoria parietina*). Зовсім не спостерігалися куцисті і є характерною мала видова різноманітність листових лишайників, які є більш чутливими до забруднення атмосферного повітря. Найнижчий ступінь покриття лишайникам зафіксовано на вулиці Миру (в районі автостанції), на вулиці Зарічній (поблизу АЗС Укрнафта), та на розі вулиці Миру та вулиці Захисників – 45,3%, 48,1% та 49,5% відповідно. За ступенем забруднення повітря на даних територіях відноситься до третьої зони із характеристикою «помірне забруднення». Розрахований показник ІЧП становив в даних місцях дослідження становив 9,0–9,6 одиниці. Відповідно до розрахованих значень ІЧП повітря на даних територіях є слабо забрудненим.

Оскільки, одним з найбільш ймовірних джерел впливу на якість атмосферного повітря в межах смт Краснокутськ є автотранспорт, нами було визначено інтенсивність руху автомобілів на ділянках місць дослідження. Також було проведено кореляційний аналіз залежності показника ступеню покриття дерев лишайниками від інтенсивності руху автомобілів. Найбільшою інтенсивністю руху характеризувався в районі автостанції з показником загальної кількості автомобілів (легкові, легкі, середні та великі вантажівки, мотоскутери та автобуси) 295 шт./год. (рис. 2).

Для даної ділянки досліджень характерний найнижчий показник покриття лишайниками та найвище значення ІЧП. Відповідно до результатів проведеного кореляційного аналізу визначено, що коефіцієнт кореляції становить 0,99 одиниці, що підтверджує дуже високий вплив інтенсивності руху

автомобілів на рівень забруднення атмосферного повітря.

Висновки. Рівень забруднення атмосферного повітря в межах смт Краснокутськ залежав від досліджуваної частини селища. Вздовж автомагістралі з підвищеною інтенсивністю руху автотранспорту, зокрема в районі автостанції, на розі вулиці Миру та Захисників, а також поблизу АЗС Укрнафта повітря є слабо забрудненим. На цих територіях переважаючими є стійкі до забруднення види лишайників такі, як *Rhizocarpon geographicum*, *Aspicilia* та *Xanthoria parietina*. Ступінь покриття стовбурів дерев лишайниками в цих районах становив 45,3–49,5%, індекс чистоти повітря – 9,0–9,9 одиниці. На околиці дендропарку повітря є чистим, переважаючими видами лишайників є *Hypogymnia physodes*, *Parmelia sulcata* та *Evernia prunastri*. Ступінь проектного покриття дерев лишайниками становить 60,1–62,4%, індекс чистоти повітря – 11,9–12,5 одиниці. В цілому, за результатами проведеної оцінки стану атмосферного повітря смт Краснокутськ Харківської області, можна стверджувати про суттєвий вплив автомобільного транспорту на стан атмосферного повітря. Адже в районах автомагістралі рівень забруднення атмосфери був значно вищим, порівняно з територією навколо дендропарку. Дуже високий зв'язок між впливом інтенсивності руху автомобілів і якістю атмосферного повітря підтверджується і результатами кореляційного аналізу.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеної оцінки забруднення атмосферного повітря смт Краснокутськ Харківської області методом ліхеноіндикації можуть бути основою для проведення подальших більш детальних інструментальних досліджень якості атмосфери, розроблення заходів щодо покращення її стану й зниження рівня забруднення.

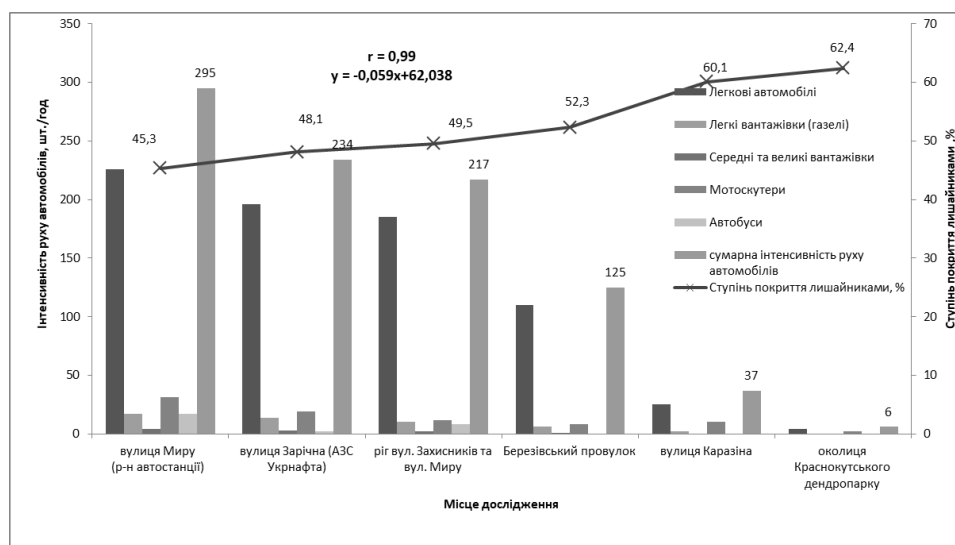


Рис. 2. Залежність ступеню покриття дерев лишайниками від інтенсивності руху автомобілів

Література

1. Естїлл Я. Вплив на здоров'я та соціальні витрати, пов'язані із забрудненням повітря у великих містах України. Ворбен, Швейцарія, 2022. 32 с.
2. World Air Quality Report reveals substantial air quality changes (2020). URL: <https://www.iqair.com/newsroom/covid-19-reduces-air-pollution-in-most-countries> .
3. Картографування екологічного стану повітряного басейну м. Луцька на основі ліхеноіндикації. Федонюк В. В., Іванців В. В., Федонюк М. А., Іванців О. В. Часопис картографії. 2016. Випуск 16. С. 259-270.
4. Оцінка екологічного стану атмосфери міста Івано-Франківська методом ліхеноіндикації. Зоріна Н. О., Радловська К. О., Боднар Н. В., Голембйовська М. Ю. Науково-технічний журнал. 2016. № 1 (13). С. 70-84.
5. Шершова Н.В. Ліхеноіндикація стану атмосферного повітря в місті Васильків Київської області. Український ботанічний журнал. 2018. Т. 75, № 2. С. 143-148.
6. Назарова К.В., Антонюк О.М. Ліхеноіндикація стану атмосферного повітря в умовах міста Чернівці. URL: http://www.rusnauka.com/15_DNI_2008/Geographia/32440.doc.htm.
7. Васькін Р. А., Васькіна І. В. Визначення забруднення атмосфери двоокисом сірки методом ліхеноіндикації. *Сучасні технології у промисловому виробництві*: матеріал. науково-технічної конференції (Суми, 14–17 квітня 2015 р.). Суми, 2015. С. 179.
8. Литвиненко Ю. І., Маслов Д. О. Ліхеноіндикаційна оцінка якості атмосферного повітря м. Путивль. Слобожанський науковий вісник. Серія Природничі науки. 2023. Випуск 1. С. 31-35.
9. Ричак Н. Л., Свистунова А.М. Оцінка якості атмосферного повітря урбосистеми методом ліхеноіндикації (на прикладі Держинського району міста Харкова). Вісник ХНУ імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія». № 1070. Вип. 9. 2013. 84 с.
10. Біоіндикація та біотестування довкілля: навчальний посібник / Л.В. Головань, Ю.Ю. Чуприна, І.М. Бузіна та ін. Харків: ДБТУ, 2024. 240 с.

ОЦІНКА ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ЯК СКЛАДОВА ДЕРЖАВНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ДОВКІЛЛЯ

Якименко Г.М., Гай А.Є.

Національний авіаційний університет
пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ
iakymenko.ann@gmail.com, anzhela.hai@npp.nau.edu.ua

Розглянуто стан імплементації європейських природоохоронних директив в українське законодавство. Визначено проблему «ігнорування» Державною системою моніторингу довкілля результатів досліджень параметрів навколишнього природного середовища, отриманих при Оцінці впливу на довкілля, Стратегічній екологічній оцінці та післяпроектному моніторингові. Розроблено Модель впливів на функціональність державної системи моніторингу довкілля. При аналізі моделі доведено, що результати ОВД, СЕО та ППМ не використовуються державними (національною та регіональними) системами управління природоохоронною діяльністю для прогнозування динаміки екосистем. Розроблено Модель інтеграції приватних (бізнесових) результатів моніторингу довкілля в ДСМД. Підтверджено, що результати спостережень за станом довкілля, які отримано при післяпроектному моніторингові та функціонуванні систем екологічного менеджменту за ISO 14000 не використовуються державною системою моніторингу довкілля. Надано пропозиції із вдосконалення ДСМД, а саме: впровадити діджиталізацію звітів Оцінки впливу на довкілля та звітів про результати післяпроектного моніторингу (подача звітів державним установам виключно в електронному вигляді); створити єдину національну базу даних моніторингу параметрів довкілля (сайт та застосунок); при аналізі та прогнозуванні динаміки стану екосистем використовувати результати ОВД, СЕО, ППМ та приватних результатів моніторингу довкілля; створити та оприлюднити перелік національно визнаних методик вимірювання параметрів довкілля; застосовувати найкращі світові практики при оновленні ДСМД. *Ключові слова:* державна система моніторингу довкілля (ДСМД), оцінка впливу на довкілля (ОВД), післяпроектний моніторинг (ППМ), моніторинг довкілля, екологічний менеджмент, управління природоохоронною діяльністю.

Environmental impact assessment as a component of the state environmental monitoring system. Yakymenko H., Hai A.

The status of the implementation of EU environmental directives into Ukrainian legislation is considered. The problem of "ignoring" of the Environmental Impact Assessment, Strategic Environmental Assessment and Post-project Monitoring results by the State Environmental Monitoring System has been identified. The Model of influence on the functionality of the State Environmental Monitoring System has been developed. It was proven the results of Environmental Impact Assessment, Strategic Environmental Assessment and Post-project Monitoring are not used by State (national and regional) Environmental Management Systems for forecasting ecosystem dynamics. A Model of the integration of private (business) environmental monitoring results into the SEMS has been developed. It has been confirmed that the results of environmental monitoring obtained during Post-project Monitoring and functioning of environmental management systems according to ISO 14000 are not used by the State Environmental Monitoring System. Proposals for improving the SEMS have been submitted: implement digitalization of Environmental Impact Assessment reports and Post-project Monitoring reports (submission of reports to state institutions only online); develop a Unified national database for monitoring environmental parameters (site and application); use the results of EIA, SEA, PPM and private environmental monitoring results when analyzing and forecasting the dynamics of the state of ecosystems; develop and publish a list of nationally recognized methods of measuring environmental parameters; apply the best practices for the SEMS updating. *Key words:* State Environmental Monitoring System (SEMS), Environmental Impact Assessment (EIA), Post-project Monitoring (PPM), environmental monitoring, environmental management, management of nature protection activities.

Постановка проблеми. Законом України від 20.03.2023 № 2973-IX [1] внесено суттєві зміни в природоохоронні нормативно-правові акти в сфері державної системи моніторингу довкілля: у Водний кодекс України, Земельний кодекс України, Лісовий кодекс України, Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» тощо. Відповідно до положень вищезазначеного Закону № 2973-IX, при впровадженні нової системи моніторингу довкілля державні органи повинні максимально використовувати всі наявні достовірні джерела інформації про поточний та минулий стани довкілля для аналізу та прогнозування його динаміки, поширювати серед стейкхолдерів екологічну інформацію через автоматизовану аналітичну систему та розробляти рекомендації для покращення стану навколишнього природ-

ного середовища задля сталого розвитку країни та планети. Проте серед джерел екологічної інформації, які планується застосовувати для вдосконалення державної системи моніторингу довкілля (ДСМД), відсутня база результатів спостережень, отриманих при Оцінці впливу на довкілля (ОВД), Стратегічній екологічній оцінці (СЕО) та післяпроектному моніторингу (ППМ). Тобто, наразі не використовується наявна безкоштовна база даних, яка налічує мільйони результатів фактичних спостережень за станом атмосферного повітря, водних джерел, ґрунтів, тваринного та рослинного звіту, природно-заповідного фонду.

Актуальність дослідження. Сучасний науковий аналіз діючої державної системи моніторингу довкілля [2–6] свідчить про необхідність докорінної її реформи: насамперед, потрібно створити сучасну

мережу моніторингових лабораторій; розробити методики аналізу стану довкілля та прогнозування його змін; широко впровадити ГІС-технології; провести комплексний аналіз сучасного стану довкілля та моделювання динаміки національної екосистеми тощо. Саме на верифіковані методики та на фактичні вимірювання параметрів довкілля в акредитованих лабораторіях спирається доказова база екоциду, заподіяного Україні російською агресією. Тому якнайшвидша інтеграція в ДСМД вже наявного пласту даних про зміни параметрів атмосферного повітря, водних ресурсів, ґрунтів, біорізноманіття, отриманих при оцінці впливу на довкілля, стратегічній екологічній оцінці та післяпроектному моніторингові, є критично важливою для нашої держави.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Угодою про асоціацію між Україною та Європейським Союзом передбачено імплементацію переважної більшості європейських природоохоронних директив в законодавство України не пізніше ніж через п'ять років з моменту підписання Угоди. Проте, навіть в 2024 році, через декаду після укладання Угоди, суттєва складова екологічної політики та права ЄС не інтегрована в національне природоохоронне право, а вимоги Додатків XXX–XXXI Угоди значною мірою не виконані [7]. Законами України «Про оцінку впливу на довкілля» [8] та «Про стратегічну екологічну оцінку» [9] адаптовано Директиви Європейського Парламенту та Ради від 13.12.2011 р. № 2011/92/ЄС та від 27.06.2001 р. № 2001/24/ЄС. Однак, результати ОВД та СЕО жодним чином не використовуються державною системою моніторингу довкілля та не враховуються у прогнозі динаміки екосистем. Інтеграція моніторингових спостережень ОВД, ППМ та СЕО в ДСМД та в національне управління природоохоронною діяльністю сприятиме виконанню євроінтеграційних зобов'язань України. Цей процес прискорить створення сучасних та ефективних державних природоохоронних систем менеджменту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За даними найновіших досліджень вітчизняних вчених (2022–2023 рр.), спостерігається суттєва прогалина між потребою та наявністю кількісних і якісних досліджень параметрів довкілля. Встановлено, що результати моніторингових досліджень не зведені в єдину національну базу даних. Невідповідність нормативного, матеріального та організаційного забезпечення системи моніторингу довкілля сучасним вимогам, відсутність нерозривної моніторингової мережі створюють колапс систем управління природоохоронною діяльністю на корпоративному, регіональному та національному рівнях [2–6].

Відповідно, натепер навіть не йде мова про швидкий та достовірний прогноз динаміки національної та регіональних екосистем. За висновками Команди підтримки реформ Міністерства захисту довкілля

та природних ресурсів України, наразі як державна система моніторингу довкілля, так і національна система управління природоохоронною діяльністю є ненадійними та неефективними через відсутність взаємозв'язків між ними. Однією з основних рекомендацій Команди щодо реформування державної системи моніторингу довкілля є інтеграція підсистем моніторингу довкілля до «ЕкоСистеми» та збір первинних моніторингових даних від усіх суб'єктів на он-лайн платформі [2–6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Згідно проведеного авторами аналізу ДСМД та наукових праць останніх років, результати ОВД, СЕО та ППМ не використовуються при аналізі сучасного стану екосистем та прогнозуванні їх динаміки. Щороку до Міндовкілля та обласних державних адміністрацій надходять результати сотень тисяч вимірювань параметрів довкілля зі звітами ППМ та ОВД. Проте ці дані не застосовуються державними установами ні для аналізу стану екосистем, ні для прогнозу їх динаміки, ні для розробки чи впровадження природоохоронних заходів. На думку авторів, інтеграція результатів моніторингових спостережень стану довкілля, отриманих при ОВД, ППМ та СЕО, вдосконалив та збагатить державну систему моніторингу довкілля. Кінцевим результатом ланцюга «Діджиталізація результатів спостережень при ОВД/СЕО/ППМ – Інтеграція результатів моніторингових спостережень при ОВД/СЕО/ППМ в ДСМД – Загальний аналіз бази ДСМД – Прогнозування динаміки екосистем» має стати науково обґрунтоване відновлення зруйнованих або деградованих екосистем через розробку оптимальних природоохоронних заходів.

Новизна. Вперше запропоновано системний підхід до покращення державної системи моніторингу довкілля через впровадження результатів ОВД, СЕО та ППМ в ДСМД.

Викладення основного матеріалу. Як зазначалось у попередніх розділах статті, реформа державної системи моніторингу довкілля, яка проводиться на виконання євроінтеграційних зобов'язань України, зазнає докорінних змін. Саме на етапі розбудови нової моделі ДСМД пропонуємо інтегрувати дані результатів моніторингу біотичних та абіотичних компонентів довкілля, отриманих при ОВД, ППМ та СЕО в ДСМД. На Рис. 1 наведена авторська модель впливів на функціональність ДСМД станом на 01.08.2024.

Як відображено у моделі на Рис. 1, державна система моніторингу довкілля натепер має суттєвий вплив на основні національні механізми спостереження за станом довкілля: ОВД, ППМ, СЕО. Розміщені у вільному доступі дані про стан довкілля, верифіковані методики та акредитовані лабораторії є підґрунтям для вибору методів та періодичності спостережень за якістю ґрунтів, атмосферного пові-

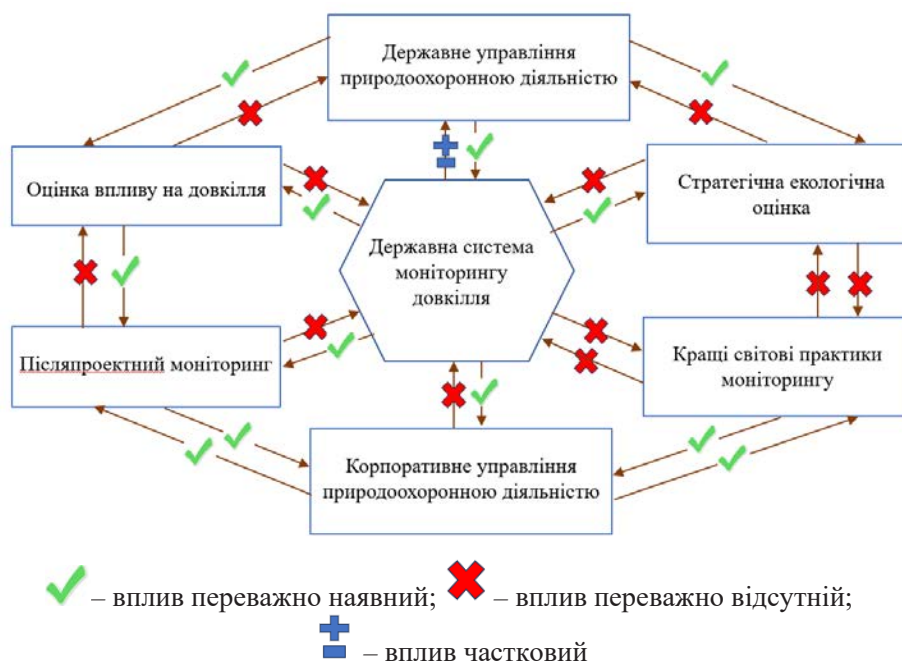


Рис. 1. Модель впливів на функціональність ДСМД

тря та водних ресурсів під час ОВД та ППМ. Однак сама ДСМД не враховує результати спостережень, отримані при ОВД, ППМ та СЕО. На думку авторів, всі звіти з оцінки впливу на довкілля, звіти про результати післяпроектного моніторингу мають бути оцифровані (приймається від суб'єктів господарювання виключно в електронному вигляді) та інтегровані у ДСМД.

Дані ДСМД частково використовуються при стратегічному плануванні, наприклад вони враховані при підготовці Національного плану дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року. Проте відсутня обов'язкова вимога враховувати поточний стан довкілля при плануванні природоохоронних заходів на всіх рівнях державного управління природоохоронною діяльністю. Спостерігається взаємний зв'язок цих компонентів моделі: у національних природоохоронних планах останніх 5 років майже завжди присутня вимога проводити моніторинг окремих компонентів довкілля. При цьому відмічена суттєва прогалина у впровадженні кращих світових практик моніторингу як у ДСМД, так і у ОВД та СЕО. Наразі відсутня законодавча чи розпорядча вимога у Україні використовувати найактуальніші, найефективніші, найдостовірніші методи досліджень та спостережень у екологічній сфері. Кумулятивний вплив забруднювачів на навколишнє природне середовище станом на поточний момент майже не досліджується.

На Рис. 2 представлена авторська модель інтеграції приватних результатів моніторингу довкілля в ДСМД. Дані моніторингу типових елементів корпоративної системи екологічного моніторингу підприємства зазвичай доводять до державних органів періодичними статистичними звітами. Звіти скла-

дені за типовими формами та легко можуть бути інтегровані в ДСМД.

Виключенням є внутрішній звіт про результати функціонування системи екологічного менеджменту за стандартом ISO 14001. Проте даний факт пояснюється тим, що наразі держава не вимагає обов'язкового впровадження стандарту ISO 14001 на підприємствах та сертифікація на відповідність стандарту, й, відповідно, підготовка звіту про результати функціонування системи екологічного менеджменту, є добровільними.

З інтеграцією результатів ОВД та ППМ в ДСМД ситуація протилежна: вони не аналізуються на державному рівні системно та не використовуються у національному прогнозуванні динаміки стану довкілля. При цьому спектр охоплення сфер моніторингу при ППМ та ОВД значно ширший за типовий моніторинг стану навколишнього природного середовища на корпоративному та національному рівнях. Найактуальнішим вдосконаленням ДСМД, на думку авторів, може стати оцифрування звітів з ОВД та ППМ за період 2018–2024 рр. та створення їх єдиної бази, яка може бути використана для ліквідації прогалин у національному моніторингу тваринного та рослинного світу, підготовці доказової бази для міжнародних судів про довоєнний стан довкілля та розробки науково обґрунтованих природоохоронних заходів. Бо наразі, через недосконалість ДСМД, втрачаються головні переваги будь-якої системи моніторингу навколишнього середовища, а саме її ефективність і корисність.

Головні висновки. Згідно проведеного аналізу державної системи моніторингу довкілля необхідно створити єдину цифрову базу результатів спостережень за станом довкілля, отриманих при ОВД, СЕО

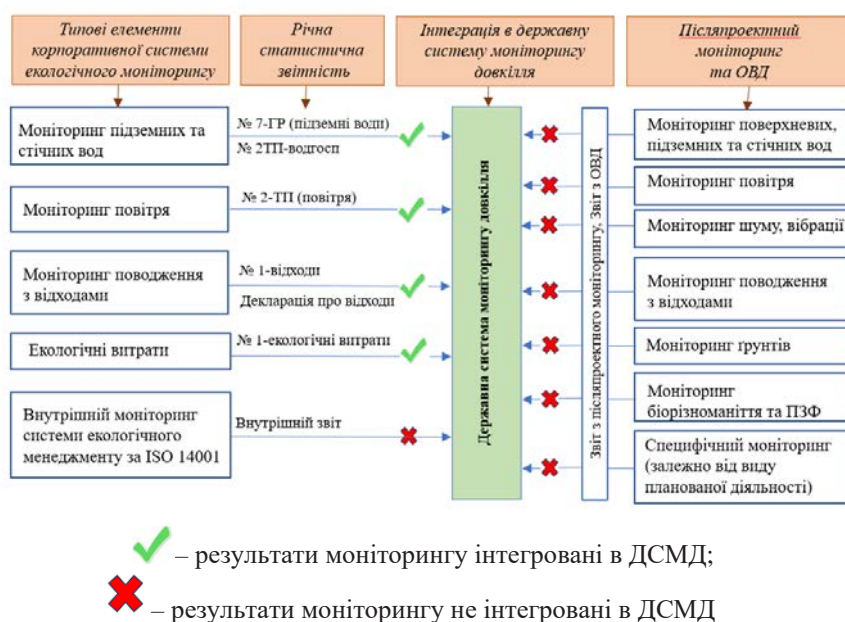


Рис. 2. Модель інтеграції приватних результатів моніторингу довкілля в ДСМД

та післяпроектному моніторингу та системно інтегрувати ці дані у ДСМД.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження доцільно використати

при вдосконаленні державної системи моніторингу довкілля, прогнозуванні стану екосистем та адаптації національної системи управління природоохоронною діяльністю до європейських екологічних стандартів.

Література

1. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо державної системи моніторингу довкілля, інформації про стан довкілля (екологічної інформації) та інформаційного забезпечення управління у сфері довкілля: Закон України від 20 березня 2023 р. № 2973-IX / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2973-20#Text> (дата звернення: 25.08.2024).
2. Васенко О.Г., Карлюк А.А., Черба О.В. Сучасний стан системи моніторингу довкілля в Україні. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 6 (51). С. 73–77. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.11> (дата звернення: 10.03.2024).
3. Михайлов С.С. Наукове обґрунтування структури комплексної системи моніторингу довкілля для регіонів України. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 5 (50). С. 88–97. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.13>. (дата звернення: 16.03.2024).
4. Моніторинг довкілля: аналітична записка щодо стану та перспектив розвитку державної системи моніторингу довкілля. К.: Міндовкілля, 2023. 119 с. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/02/Monitoring-Green-Paper_15_02_2022.pdf (дата звернення: 17.03.2024).
5. Шапапова С.В. Реформування державної системи моніторингу довкілля в Україні. Аналітично-порівняльне правознавство: електронне наукове видання. 2023. № 4 (2023). URL: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2023.04.40>. (дата звернення: 10.03.2024).
6. Полісі-бриф (аналітична записка) щодо реформування державної системи моніторингу довкілля. Екологія-Право-Людина. 2023. 4 с. URL: https://epl.org.ua/wp-content/uploads/2023/10/UKR_Polisi-brif-derzhavnyj-ekologichnyj-monitoryng.pdf (дата звернення: 18.03.2024).
7. Про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: Угода від 27 червня 2014 р. № 984_011. Ратифікація Законом України від 16 вересня 2014 р. № 1678-VII / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text (дата звернення: 25.08.2024).
8. Про оцінку впливу на довкілля: Закон України від 23 травня 2017 р. № 2059-VIII / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text> (дата звернення: 25.08.2024).
9. Про стратегічну екологічну оцінку: Закон України від 20 березня 2018 р. № 2354-VIII / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2354-19#Text> (дата звернення: 25.08.2024).

ПАТЕНТНО-ВИНАХІДНИЦЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ У МИРОНІВСЬКОМУ ІНСТИТУТІ ПШЕНИЦІ ІМЕНІ В.М. РЕМЕСЛА ЩОДО ЕКОЛОГО-ФІЗІОЛОГІЧНИХ, ГЕНЕТИКО-СЕЛЕКЦІЙНИХ ТА БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В., Харченко М.В.

Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла

Національної академії аграрних наук України

с. Центральне, 08853, Київська обл.

pykserg@ukr.net

Вирощування високих урожаїв зернових культур і підвищення їхніх валових зборів – пріоритетний напрямок у розвитку вітчизняного сільського господарства. Для підвищення інноваційного розвитку економіки країни найціннішими є наукові розробки, що охороняються як об'єкти інтелектуальної власності. Патентно-винахідницька діяльність у Миронівському інституті пшениці імені В. М. Ремесла є рушійним фактором для подальшої комерціалізації розробок та створення нових конкуренто-спроможних продуктів, зокрема сортів зернових культур. Застосовуючи запатентовані моделі, в інституті проведено скринінг сортів зернових культур, створених у різних екологічних зонах, на стійкість до водного дефіциту, засолення, іонів алюмінію, екстремальних температур та виділено цінні генетичні джерела. Запропоновано принципово нові й вдосконалено існуючі способи добору і оцінки генотипів зернових на стійкість до абіотичних стресових чинників. Модифіковано та удосконалено метод визначення фотоперіодичної чутливості сортів пшениці м'якої озимої в умовах Центрального Лісостепу України, що базується на вивченні реакції рослин на тривалість світлового дня. Розроблено спосіб, який дозволяє зручно, швидко і максимально ефективно стерилізувати незріле насіння зернових злаків для введення в культуру *in vitro*. Переваги запропонованих методів над традиційними полягають у можливості об'єктивно аналізувати селекційний матеріал, працювати з великими вибірками генотипів, більшій швидкості скринінгу зразків, контролювати умови зовнішнього середовища та проводити оцінку впродовж року. Отримано новий вихідний матеріал пшениці, ячменю та тритикале зі стійкістю до абіотичних стресових чинників, який використовується у селекційній роботі інституту при створенні нових сортів інтенсивного типу. Результати вносять певний вклад у вдосконалення біотехнологічних прийомів розширення генетико-селекційного потенціалу зернових та розробку генетичних основ клітинної селекції рослин. Представлені дослідження спрямовані на розв'язання проблеми стійкості злакових культур до несприятливих кліматичних факторів, а також орієнтовані на розвиток розуміння реакцій рослин на стрес і впровадження нових методів для вирішення прикладних завдань селекції злакових. Інноваційні розробки інституту доповнюють методологію і сприятимуть створенню нових сортів із цінними практичними властивостями. *Ключові слова:* патентно-винахідницька діяльність, інтелектуальна власність, інновації, зернові культури, абіотичні стресори.

Patent and inventive activity at the V.M. Remeslo Myronivka Institute of Wheat regarding ecological-physiological, genetic-breeding and biotechnological research. Pykalo S., Demydov O., Yurchenko T., Kharchenko M.

Growing high yields of grain crops and increasing their gross harvest is a priority area for the development of domestic agriculture. For enhancing the innovative development of the country's economy, scientific developments protected as intellectual property are most valuable. The patent and inventive activity of the V. M. Remeslo Myronivka Institute of Wheat are a driving factor for further commercialization of developments and creation of new competitive products, in particular, varieties of grain crops. Using patented models, the institute screened varieties of grain crops created in various ecological zones for resistance to water deficiency, salinity, aluminium ions, extreme temperatures, and identified valuable genetic sources. Fundamentally new methods for selection and evaluation of grain genotypes for resistance to abiotic stress factors are proposed and existing methods are improved. A method for determining the photoperiodic sensitivity of winter bread wheat varieties in the conditions of the Central Forest-Steppe of Ukraine, based on the study of plant response to daylight hours, has been modified and improved. A method has been developed that allows for convenient, fast and maximally effective sterilization of immature seeds of cereals for introduction into *in vitro* culture. The advantages of the proposed traditional methods include the ability to objectively analyze breeding material, work with large samples of genotypes, higher sample screening speed, control environmental conditions and conduct an assessment throughout the year. New source material of wheat, barley and triticale with resistance to abiotic stress factors was obtained, which is used in the breeding work of the institute to create new varieties of an intensive type. The results make a certain contribution to the improvement of biotechnological methods for expanding the genetic and breeding potential of cereals and the development of genetic bases for cellular plant breeding. The presented studies are aimed at solving the problem of resistance of cereal crops to unfavorable climatic factors, and are also focused on developing an understanding of plant reactions to stress and introducing new methods for solving applied problems of cereal breeding. Innovative developments of the institute will complement the methodology and contribute to the creation of new varieties with valuable practical properties. *Key words:* patent and inventive activity, intellectual property, innovation, grain crops, abiotic stressors

Постановка проблеми. Важливими чинниками економічного зростання країни є ефективне використання інтелектуального капіталу країни, що включає новітні технології та розробки. В умовах воєнного стану в Україні одним із дієвих методів, що дасть можливість відновити та стимулювати економіку, є розвиток виробничих та невиробничих галузей на основі інноваційних розробок. Для підвищення інноваційного розвитку економіки найціннішими є наукові розробки, що охороняються як об'єкти інтелектуальної власності [1]. Безупинне зростання інноваційного розвитку викликає необхідність патентування [2]. Патентом є охоронний документ, що засвідчує авторство і права на винахід. Він забезпечує правовий захист винахідникам, що заохочує науковців, підприємців та інших зацікавлених осіб інвестувати ресурси в новітні розробки [1]. Патенти є рушійною силою у стимулюванні інноваційної діяльності, сприяючи розвитку нових технологій, продуктів та послуг [3]. Тому дослідження патентної діяльності в контексті підвищення інноваційного розвитку є вкрай актуальним.

Виробництво сільськогосподарської продукції є стратегічною і ефективною галуззю народного господарства України. Основною складовою сільськогосподарського виробництва в Україні традиційно виступає зерновий сектор [2]. Важливу роль у харчовому забезпеченні населення відіграють зернові колосові культури – пшениця, ячмінь та тритикале.

Величина урожайності є найважливішим показником при вирощуванні сільськогосподарських культур. Проте сучасна динаміка зростання врожайності злакових недостатньо відповідає необхідним ритмам для задоволення потреб людства [4]. Генетичний потенціал вітчизняних сортів зернових злаків знаходиться в межах 11–14 т/га, проте у виробничих умовах реалізується лише 45–50% [5]. Кліматичні зміни все частіше стають основним стримуючим фактором у реалізації генетичного потенціалу високоврожайних сортів зернових культур. Періодичні нищівні кліматичні катаклізми зводять нанівець їх урожай та роблять непридатними для вирощування цілі аграрні регіони [6]. Загальне забруднення навколишнього середовища, різке загострення екологічної ситуації у світі в результаті антропогенного впливу, глобальне потепління й аридизація клімату зробили проблему стійкості однією з головних у біології та фізіології рослин. Глобальне потепління і пов'язана з ним часта повторюваність посух зумовлюють необхідність об'єднання зусиль біотехнологів, фізіологів, генетиків і селекціонерів для створення адаптивних генотипів зернових культур. Тому створення сортів з принципово новими характеристиками, здатних забезпечувати високу і стабільну продуктивність за різних умов довкілля, стійких до екстремальних умов вирощування – актуальна проблема сучасної селекції [7; 8].

Одним із пріоритетних напрямів генетики, селекції та біотехнології є створення сортів, стійких до несприятливих екологічних чинників довкілля – посухи, екстремальних температур, засолення, забруднення іонами токсичних металів тощо [6; 7]. Проведення досліджень з оцінки генотипів на стійкість до того чи іншого стресу є однією з умов підвищення ефективності селекційного процесу зернових культур [9; 10]. Тому методологічне забезпечення всебічного вивчення стрес-стійкості сільськогосподарських рослин є пріоритетним завданням багатьох селекційних установ України. Для тестування перспективних зразків злакових культур є багато методів, заснованих на різних принципах дії, і кожен із них має свої переваги і недоліки. Переважна їх більшість не є на сьогоднішній день оптимальними, внаслідок чого актуальним є завдання створення нових і вдосконалення вже наявних методів оцінки та добору селекційного матеріалу зернових колосових культур на стійкість до несприятливих чинників довкілля.

Метою роботи є аналіз та підбиття підсумків патентно-винахідницької діяльності Миронівського інституту пшениці імені В. М. Ремесла в еколого-фізіологічних, генетико-селекційних та біотехнологічних напрямках досліджень.

Виклад основного матеріалу. Основними напрямами наукової діяльності відділу біотехнології, генетики і фізіології МІП є створення нових інтрогресивних форм та удосконалення способів їх отримання і стабілізації [11]; ведення клітинної селекції на стійкість до несприятливих факторів середовища [12]; розробка елементів біотехнології селекційного процесу зернових культур (пшениці, ячменю, тритикале) [13; 14]; вивчення фізіолого-біохімічних складових формування морозо-, зимо-, посухостійкості зернових [15]; розробка та вдосконалення методів добору високоадаптивного стресостійкого вихідного матеріалу [16]; застосування молекулярних маркерів в селекції та насінництві зернових [17]; моніторинг стану посівів та погодних умов упродовж вегетації [18].

Результати досліджень неодноразово представлені співробітниками відділу на міжнародних науково-практичних конференціях та опубліковані в провідних фахових вітчизняних і закордонних виданнях, що входять до науково-метричних баз Scopus та Web of Science Core Collection. Найбільш вагомі розробки відділу захищено патентами на корисну модель, які представлені нижче.

Спосіб добору морозостійкого селекційного матеріалу пшениці м'якої озимої, що обумовлений дією стресового низькотемпературного чинника, спрямованого проти виживання нестійких форм [19]. Відрізняється від аналогів тим, що добори генотипів проводять за проморожування проростків при дії підібраних диференціюючих температур протягом підібраного часового проміжку з наступним дорощуванням у відкритому ґрунті. Корисна модель

стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції озимих злаків, і може бути використана при створенні морозостійких сортів пшениці. Технічним результатом є можливість значно прискорити відбір морозостійких генотипів, що сприяє створенню сортів з цінними практичними властивостями.

Спосіб відбору in vitro солестійких генотипів тритикале озимого, що обумовлений токсичною дією стресового чинника, спрямованого проти виживання нестійких форм [20]. Відрізняється від аналогів тим, що добори окремих генотипів проводять *in vitro* на рівні культивованих калюсів на штучному живильному середовищі з додаванням різних концентрацій хлориду натрію. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути використана при створенні солестійких сортів тритикале озимого. Технічним результатом є можливість значно прискорити відбір солестійких генотипів, що сприяє створенню сортів з цінними практичними властивостями.

Спосіб відбору in vitro посухостійких генотипів тритикале озимого, що обумовлений токсичною дією стресового чинника, спрямованого проти виживання нестійких форм [21]. Відрізняється від аналогів тим, що відбір окремих генотипів проводять на рівні культивованих калюсів на штучному живильному середовищі з додаванням різних концентрацій маніту. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути використана при створенні посухостійких сортів тритикале озимого. Технічним результатом є можливість аналізувати значну кількість селекційного матеріалу, контролювати умови зовнішнього середовища та проводити оцінку протягом року.

Спосіб оцінки стійкості генотипів пшениці м'якої озимої до дії водного дефіциту, що полягає у здатності насіння різних сортів неоднаково проростати на високоосмотичних розчинах [22]. Відрізняється від аналогів тим, що оцінку окремих генотипів проводять за часткою пророслого насіння на розчинах з додаванням різних концентрацій маніту. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути використана при створенні стійких до водного дефіциту сортів пшениці озимої. Технічним результатом є можливість аналізувати значну кількість селекційного матеріалу, контролювати умови зовнішнього середовища та проводити оцінку впродовж року.

Спосіб добору in vitro стійких до іонів алюмінію генотипів тритикале озимого, що обумовлений токсичною дією стресового чинника, спрямованого проти виживання нестійких форм [23]. Відрізняється від аналогів тим, що добори окремих генотипів проводять на рівні культивованих ембріодів на штучному живильному середовищі з додаванням різних концентрацій етилендіамінтетраацетату алюмінію. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути вико-

ристана при створенні стійких до іонів алюмінію сортів тритикале озимого. Технічним результатом є можливість значно прискорити відбір стійких до іонів алюмінію генотипів, що сприяє створенню сортів з цінними практичними властивостями.

Спосіб оцінки стійкості до засолення генотипів тритикале озимого, що обумовлений здатністю рослин різних сортів неоднаково рости на сольових субстратах [24]. Відрізняється від аналогів тим, що оцінку окремих генотипів проводять на 10-добових проростках за зміною довжин їх пагонів та головних коренів на штучних субстратах з додаванням хлориду натрію концентрацією 1,5%. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути використана при створенні солестійких сортів тритикале озимого. Технічним результатом є можливість аналізувати значну кількість селекційного матеріалу, контролювати умови зовнішнього середовища та проводити оцінку солестійкості протягом року.

Спосіб оцінки стійкості генотипів тритикале озимого до комплексу абіотичних стресових чинників, що обумовлений здатністю рослин за стресових умов проявляти неоднаковий ріст і різні врожайні властивості [25]. Відрізняється від аналогів тим, що стійкість генотипів до засолення і посухи послідовно оцінюють за довжиною пагона 10-добових проростків на субстратах з хлоридом натрію концентрацією 1,5% та елементами структури врожаю зрілих рослин в умовах модельованого водного дефіциту. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути використана при створенні солестійких сортів тритикале озимого. Технічним результатом є можливість аналізувати значну кількість селекційного матеріалу, контролювати умови зовнішнього середовища та проводити комплексну оцінку солестійкості протягом року.

Спосіб in vitro добору сортів зернових колосових культур з комплексною стійкістю до абіотичних факторів середовища, що обумовлений токсичною дією стресових чинників, спрямованих проти виживання нестійких форм [26]. Відрізняється від аналогів тим, що добори окремих сортів проводять на рівні культивованих калюсів на штучному живильному середовищі з послідовним додаванням певних концентрацій хлориду натрію та маніту. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути використана при створенні сортів тритикале озимого, стійких до комплексу абіотичних стресових чинників. Технічним результатом є можливість значно прискорити відбір стійких генотипів, що сприяє створенню сортів з цінними практичними властивостями.

Спосіб непрямой оцінки посухостійкості селекційного матеріалу пшениці, що включає здатність насіння різних сортів неоднаково проростати на розчинах із високим осмотичним тиском [27].

Відрізняється від аналогів тим, що оцінку окремих генотипів проводять за часткою пророслого насіння на розчинах з додаванням різних концентрацій сорбіту. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути використана при створенні посухостійких сортів пшениці. Технічним результатом є можливість контролювати умови зовнішнього середовища, проводити оцінку впродовж року та аналізувати значну кількість селекційного матеріалу.

*Спосіб визначення фотоперіодичної чутливості сортів пшениці м'якої озимої *Triticum aestivum* L. в умовах Центрального Лісостепу України*, що базується на визначенні реакції рослин на тривалість світлового дня [28]. Відрізняється від аналогів тим, що чутливість до фотоперіоду окремих генотипів визначають за різницею в кількості діб до колосіння між природною та штучно скороченою тривалістю світлового дня. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути використана при створенні сортів пшениці м'якої озимої з підвищеними адаптивними властивостями. Технічним результатом є можливість сприяти ефективному добору батьківських компонентів для схрещування та створенню сортів з цінними практичними властивостями.

Спосіб оцінювання та добору морозостійкого селекційного матеріалу озимих зернових культур, що обумовлений дією стресового низькотемпературного чинника, спрямованого проти виживання нестійких форм [29]. Відрізняється від аналогів тим, що оцінювання та добір генотипів проводять при почерговій дії різних температурних режимів морозильної камери ЛВН-200 Г на проросле насіння за схемою: $+1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 7 діб (перша фаза загартування); $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 1 доба, $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ – 3 доби (друга фаза загартування); зниження температури на $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ кожної години до $-12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для пшениці м'якої), $-11,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для пшениці твердої), $-9,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для ячменю); підвищення температури на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ кожної години до $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Після цього через 7 діб визначають частку життєздатних проростків, які пересаджують у відкритий ґрунт, причому в подальшому додатково підраховують кількість рослин після появи сходів та перезимівлі. Корисна модель стосується галузі сільського господарства, зокрема селекції озимих злаків, і може бути використана при створенні морозостійких сортів. Технічним результатом є можливість прискорити оцінювання та добір морозостійких генотипів зернових, що забезпечує скорочення селекційного процесу та зменшує матеріальні затрати на його виконання.

*Спосіб стерилізації незрілого насіння пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro**,

що включає послідовне знезараження зернівок стерилізуючими агентами [30]. Відрізняється від аналогів тим, що насіння почергово обробляють: 70% етанолом – 3 хв; 30% промисловим препаратом «Білизна» – 5 хв; 0,01 Н розчином соляної кислоти – 3 хв; стерильною дистильованою водою (трикратна обробка). Корисна модель належить до галузі сільського господарства, зокрема селекції злаків, і може бути використана в ембріокультурі та віддаленій гібридизації. Технічним результатом є можливість зручно, швидко і максимально ефективно стерилізувати незріле насіння пшениці та тритикале з метою подальшого введення їх в культуру *in vitro*.

Головні висновки. Підсумовуючи вище зазначене, можна зробити висновок, що патентно-винахідницька діяльність у Миронівському інституті пшениці імені В. М. Ремесла НААН України є рушійним фактором для подальшої комерціалізації розробок та створення нових конкуренто-спроможних продуктів, зокрема сортів зернових культур. Патентно-винахідницька робота МПП спрямована на охорону прав інтелектуальної власності, вдосконалення існуючих і створення принципово нових зразків і моделей, підвищення ефективності їх використання, пошук нових технологічних рішень, підвищення якості науково-дослідних та випробувальних робіт. Сформовано і постійно поповнюється патентний фонд інституту, що значною мірою полегшує роботу зі створення нових об'єктів інтелектуальної власності. Матеріали результатів інтелектуальної власності, на які отримано патенти, активно впроваджуються у виробничий та освітній процеси, що дозволяє здобувачам ступеня доктора філософії отримувати не лише теоретичні, а й практичні знання.

Перспективи використання результатів дослідження. Розроблені та запатентовані методи дадуть можливість повніше реалізувати закладений селекціонерами потенціал продуктивності досліджуваних сортів, що сприятиме їх ефективнішому використанню як у рослинництві, так і в селекційній практиці. Отримані результати є певним внеском у вивчення як теоретичних, так і практичних аспектів стійкості зернових культур до абіотичних факторів середовища та можуть застосовуватися як елементи селекційних та біотехнологічних програм. Представлені дослідження спрямовані на розв'язання проблеми стійкості злакових культур до несприятливих кліматичних чинників, а також орієнтовані на розвиток розуміння реакцій рослин на стрес і впровадження нових методів для вирішення прикладних завдань селекції злакових. Інноваційні розробки інституту доповнять методологію і сприятимуть створенню нових високопродуктивних сортів із цінними практичними властивостями.

Література

1. Тимошенко Н.Ю., Кот Т.Ю. Патентна діяльність як спосіб підвищення інноваційного розвитку країн світу. *Створення, охорона, захист і комерціалізація об'єктів права інтелектуальної власності*: матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної

- конференції з міжнародною участю, присвяченої Міжнародному дню інтелектуальної власності. (м. Київ, 26 квітня 2024 р.). Київ, 2024. С. 1–6.
2. Ткачук В.І. Інновації як фактор підвищення ефективності виробництва зерна. *Ефективна економіка*. 2014. № 2. С. 1–3.
 3. Никончук В.М. Активізація патентної діяльності як напрям підвищення інноваційного розвитку економіки. *Ефективна економіка*. 2020. № 5. С. 1–6.
 4. Гринчук Т. Підходи до аналізу сучасного стану зерновиробництва у сільськогосподарських підприємствах регіону та факторів, які впливають на його розвиток. *Науковий вісник Одеського національного економічного університету*. 2015. № 9. С. 48–60.
 5. Васильківський С.П., Гудзенко В.М., Кочмарський В.С., Кириленко В.В. Реалізація потенціалу сортів зернових культур – шлях вирішення продовольчої проблеми. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2017. Т. 21. С. 47–51.
 6. Рибалка О.І. Геноміка, транскриптоміка, протеоміка і біоінформатика на службі сучасної селекції пшениці. *Збірник наукових праць Селекційно-генетичного інституту – Національного центру насіннєзнавства та сортовивчення*. 2013. Вип. 21 (61). С. 18–38.
 7. Бацманова Л.М., Грудіна Н.С., Стороженко В.О., Таран Н.Ю., Мусієнко М.М. Адаптивні реакції рослин озимої пшениці різних екотипів на дію пероксиду водню. *Фізіологія і біохімія культурних рослин*. 2010. Т. 42. № 2. С. 163–168.
 8. Моргун В.В., Логвиненко В.Ф. Селекція сортів озимої пшениці на високу зимо– та морозостійкість. *Фізіологія рослин в Україні на межі тисячоліть*. Київ, 2001. Т. 2. С. 204–211.
 9. Пикало С., Демидов О., Юрченко Т., Хоменко С., Гуменюк О., Харченко М., Прокопів Н. Методи оцінки посухостійкості селекційного матеріалу пшениці. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2020. Вип. 82. С. 63–79.
 10. Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В., Рибка К.М., Харченко М.В., Прокопів Н.І. Методи оцінки морозостійкості селекційного матеріалу пшениці. *Екологічні науки*. 2021. № 2 (35). С. 82–89.
 11. Демидов О.А., Колуча Г.С., Бордюг А.М. Залучення генетичного пулу споріднених видів та родів злаків для розширення спадкового різноманіття селекційного матеріалу пшениці. *Миронівський вісник*. 2017. Вип. 5. С. 70–81.
 12. Rykalo S.V. In vitro selection of genotypes of winter triticale for resistance to osmotic stress. In *Advances in genetics, plant breeding and cropping to improve grain production: Collected Abstracts of Int. Sci. Conf. of Young Researchers*. (p. 46). June 18, 2014, Myronivka, Ukraine.
 13. Rykalo S.V., Zinchenko M.O., Voloshchuk S.I., Dubrovna O.V. In vitro selection of winter triticale for the resistance to water deficit. *Biotechnologia Acta*. Vol. 8. Iss. 2. P. 69–77.
 14. Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В., Прокопів Н.І., Харченко М.В., Рибка К.М. Розроблення способів добору *in vitro* генотипів зернових культур на стійкість до несприятливих чинників довкілля. *Екологічні науки*. 2021. № 4 (37). С. 90–97.
 15. Rykalo S., Demidov O., Yurchenko T., Prokopik N., Kharchenko M. Comparative assessment of methods for evaluation of drought tolerance in winter bread wheat varieties. *ScienceRise: Biological Science*. 2019. No. 4. P. 17–21.
 16. Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В., Гуменюк О.В., Харченко М.В., Рибка К.М. Розроблення способів оцінки та добору генотипів зернових культур на стійкість до абіотичних стресових чинників. *Екологічні науки*. 2020. № 5 (32). С. 175–184.
 17. Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В., Хоменко С.О., Гуменюк О.В., Харченко М.В. Молекулярні маркери для ідентифікації посухостійких генотипів пшениці в умовах змін клімату. *Екологічні науки*. № 4 (31). С. 193–202.
 18. Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В., Харченко М.В. Особливості погодних умов в центральному Лісостепу України впродовж 2019–2022 років. *Екологічні науки*. 2023. № 3 (48). С. 78–85.
 19. Спосіб добору морозостійкого селекційного матеріалу пшениці м'якої озимої: пат. 128674 Україна: МПК А01Н 1/00, А01Н 3/00. № 201711023; заявл. 13.11.2017; опубл. 10.10.2018, Бюл. № 19. 4 с.
 20. Спосіб добору *in vitro* солестійких генотипів тритикале озимого: пат. 125692 Україна: МПК А01Н 1/04. № 201711024; заявл. 13.11.2017; опубл. 25.05.2018, Бюл. № 10. 4 с.
 21. Спосіб відбору *in vitro* посухостійких генотипів тритикале озимого: пат. 132656 Україна: МПК А01Н 4/00. № 201807903; заявл. 16.07.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5. 4 с.
 22. Спосіб оцінки генотипів пшениці м'якої озимої до дії водного дефіциту: пат. 132899 Україна: МПК А01Н 1/04. № 201811089; заявл. 09.11.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5. 4 с.
 23. Спосіб добору *in vitro* стійких до іонів алюмінію генотипів тритикале озимого: пат. 136957 Україна: МПК А01Н 1/04. № 201901582; заявл. 18.02.2019; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 18. 4 с.
 24. Спосіб оцінки стійкості до засолення генотипів тритикале озимого: пат. 140534 Україна: МПК А01Н 1/04, А01Н 6/00. № 201905097; заявл. 14.05.2019; опубл. 10.03.2020, Бюл. № 5. 4 с.
 25. Спосіб оцінки стійкості генотипів тритикале озимого до комплексу абіотичних стресових чинників: пат. 145334 Україна: МПК А01Н 1/04. № 201911575; заявл. 02.12.2019. опубл. 10.12.2020 р. Бюл. № 23. 5 с.
 26. Спосіб *in vitro* добору сортів зернових колосових культур із комплексною стійкістю до абіотичних факторів середовища: пат. 147289 Україна: МПК А01Н 1/04. № 202006966; заявл. 30.10.2020; опубл. 28.04.2021, Бюл. № 17. 4 с.
 27. Спосіб непрямої оцінки посухостійкості селекційного матеріалу пшениці: пат. 150195 Україна: МПК А01Н 1/04. № 202104670; заявл. 13.08.2021; опубл. 12.01.2022 р., Бюл. № 2. 5 с.
 28. Спосіб визначення фотоперіодичної чутливості сортів пшениці м'якої озимої *Triticum aestivum* L. в умовах Центрального Лісостепу України: пат. 150420 Україна: МПК А01Н 1/04. № 202104674; заявл. 13.08.2021; опубл. 16.02.2022, Бюл. № 7. 5 с.
 29. Спосіб стерилізації незрілого насіння пшениці та тритикале для введення в культуру *in vitro*: пат. 152327 Україна: МПК А01Н 1/00. № 202202662, заявл. 25.07.2022; опубл. 11.01.2023 р., Бюл. № 2. 5 с.
 30. Спосіб оцінювання та добору морозостійкого селекційного матеріалу озимих зернових культур: пат. 153824 Україна: МПК А01Н 1/04. № 202202833; заявл. 08.08.2022; опубл. 06.09.2023, Бюл. № 36. 5 с.

ЗМІНИ ЕКОЛОГО-ПОПУЛЯЦІЙНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ УГРУПОВАНЬ ЛІТОРАЛЬНОГО ЗООПЛАНКТОНУ ВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ РІЧКИ ІРПІНЬ ТА ЇЇ ПРИТОК У ВЕСНЯНО-ЛІТНІЙ ПЕРІОД 2024 РОКУ

Берія В.Д., Гандзюра В.П.

Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
пр. Академіка Глушкова, 2, 02000, м. Київ
vitaliylionow@gmail.com, gandzyura@gmail.com

Важко переоцінити значення методів моніторингу при дослідженні змін, котрих зазнають екосистеми внаслідок діяльності людини, зокрема – воєнних дій. Використання методів моніторингу дозволяє отримати ключову інформацію про стан екосистеми та окремих її елементів після дії збурюючого чинника та роботу її компенсаторних механізмів, що значною мірою сприяє точній оцінці наслідків дії антропогенного впливу на обрану екосистему. Отримані таким чином дані також мають велике значення, якщо мова йде про визначення можливостей досліджуваної екосистеми до відновлення свого попереднього стану – до початку дії збурюючого чинника. Враховуючи той факт, що в межах України є значна кількість екосистем, функціональний стан яких було порушено внаслідок воєнних дій – необхідним є застосування оперативних та репрезентативних методів для дослідження змін їх стану та отримання даних про заподіяну довікільню шкоду. Подібні дослідження є ключовим елементом у процесі післявоєнного відновлення таких екосистем та збереження їх цінності для держави.

Важливим інструментом при виконанні моніторингу змін функціонального стану тих екосистем, що постраждали внаслідок воєнних дій є біоіндикаційний метод. Перевагами такого методу є можливість отримати дані про особливості роботи регулюючих механізмів у обраній екосистемі на прикладі організмів, що населяють її. Для даного дослідження у якості видів-індикаторів були використані гідробіонти, а саме – представники угруповань літорального зоопланктону, що населяли екосистеми річки Ірпінь та її приток. Зокрема – було відібрано проби зоопланктону з річки Горенка та річки Мошунка у Бучанському районі Київської області. Ключовим фактором для вибору саме цих екосистем було те, що на початку повномасштабних воєнних дій на території Бучанського району Київської області у 2022 році зазначені екосистеми тривалий час знаходились у зоні активних бойових дій та, відповідно, зазнали суттєвого антропогенного навантаження.

При використанні методу біоіндикації важливим є отримання даних про зміни стану обраних видів-індикаторів за різні періоди часу, оскільки при порівнянні змін між обраними періодами можливо отримати розуміння про роботу компенсаторних механізмів у обраній екосистемі. Так, в цьому дослідженні основною метою було визначити подібні зміни серед обраних видів-індикаторів при порівнянні проб, котрі були зібрані у два часові періоди – наприкінці весни та наприкінці літа 2024 року з чотирьох станцій відбору проб в межах річок Ірпінь, Мошунка та Горенка.

При оцінці результатів вдалося визначити, що у межах досліджуваних водних екосистем характерним є врівноваження у видовому різноманітті для видів літорального зоопланктону, що, у свою чергу, вказує на дію регуляторних механізмів у екосистемах річок Ірпінь, Горенка та Мошунка. *Ключові слова:* Київська область, літоральний зоопланктон, біоіндикація, видове різноманіття, сапробність, стійкість екосистем, саморегуляція екосистем.

Changes in ecological and population characteristics among the groups of littoral zooplankton of aquatic ecosystems of the Irpin river and its tributary in the spring-summer period of 2024. Beriia V., Gandzyura V.

It is difficult to overestimate the importance of monitoring methods in the study of changes that ecosystems undergo as a result of human activity, in particular – military actions. The use of monitoring methods allows obtaining key information about the state of the ecosystem and its individual elements after the action of the disturbing factor and the operation of its compensatory mechanisms – which greatly contributes to the accurate assessment of the consequences of anthropogenic influence on the selected ecosystem. The data obtained in this way are also of great importance when it comes to determining the capabilities of the studied ecosystem to restore its previous state – before the start of the disturbing factor. Considering the fact that there is a significant number of ecosystems within Ukraine, the functional state of which has been disrupted as a result of military actions, it is necessary to use operational and representative methods to study changes in their state and obtain data on the damage caused to the environment. Such research is a key element in the process of post-war restoration of such ecosystems and preservation of their value for the state.

An important tool for monitoring changes in the functional state of ecosystems affected by military actions is the bioindicator method. The advantages of this method are the possibility to obtain data on the peculiarities of the work of regulatory mechanisms in the selected ecosystem using the example of the organisms that inhabit it. For this study, hydrobionts were used as indicator species, namely, representatives of littoral zooplankton communities that inhabited the ecosystems of the Irpin River and its tributaries. In particular, zooplankton samples were taken from the Gorenka River and the Moschunka River in the Buchansky district of the Kyiv region. The key factor for the selection of these ecosystems was the fact that at the beginning of full-scale military operations on

the territory of Buchansky district of the Kyiv region in 2022, the mentioned ecosystems were in the zone of active hostilities for a long time and, accordingly, experienced a significant load.

When using the bioindication method, it is important to obtain data on changes in the status of selected indicator species for different periods of time, because when comparing changes between selected periods, it is possible to gain an understanding of the operation of compensatory mechanisms in the selected ecosystem. So, in this study, the main goal was to determine similar changes among selected indicator species when comparing samples that were collected in two time periods – at the end of spring and at the end of summer 2024 from four sampling stations within the boundaries of the Irpin, Moshkunka and Gorenka rivers.

When evaluating the results, it was possible to determine that within the studied water ecosystems, a balance in the species diversity of littoral zooplankton species is characteristic, which, in turn, indicates the effect of regulatory mechanisms in the ecosystems of the Irpin, Gorenka, and Moshkunka rivers. *Key words*: Kyiv region, littoral zooplankton, bioindication, species diversity, saprobity, sustainability of ecosystems, self-regulation of ecosystems.

Постановка проблеми. Порушення функціонального стану гідроекосистем через діяльність людини є однією з найсуттєвіших проблем у сфері екології, особливо – для України, значна площа якої наразі знаходиться під дією постійного антропогенного навантаження внаслідок бойових дій [1]. Не дивно, що ті гідроекосистеми, котрі знаходилися у межах зон активних бойових дій, подекуди зазнали колосального антропогенного навантаження, що супроводжувалось порушенням їх функціонального стану та деструктивними змінами у їх структурі. Подібні зміни нерідко призводять до втрати екосистемою не тільки власної функціональної стабільності але й до зменшення її ресурсного значення для держави. Не варто забувати, що обрані для цього дослідження гідроекосистеми окрім антропогенного впливу від, власне, бойових дій також зазнали додаткового навантаження через підлив козаровицької греблі та спричинене цим підтоплення [2, 3].

Актуальність дослідження. Використання методу біоіндикації є необхідним елементом у процесі дослідження наслідків воєнних дій на водні екосистеми та робіт з їх відновлення до попереднього стану. Подібні дослідження дозволяють отримати дані про масштаби та інтенсивність заподіяної екосистемам шкоди та можливість їх відновлення до стабільного стану ґрунтуючись на визначенні ефективності роботи їх компенсаторних механізмів у процесі саморегуляції завдяки даним про зміни у стані обраних індикаторних груп..

Зв'язок авторського доробку із важливими та практичними завданнями. Біоіндикація як метод моніторингу змін функціонального стану тих гідроекосистем, що зазнали антропогенного навантаження внаслідок воєнних дій є одним з важливих аспектів при визначенні рівня заподіяної шкоди, оскільки сприяє виявленню тих екосистем, функціональний стан яких зазнав найбільших змін і знаходиться на межі безповоротних перетворень, що можуть призвести до втрати їх екологічної та ресурсної цінності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наслідки воєнних дій для гідроекосистем Бучанського району являються однією з важливих тем обговорення серед науковців України та їх міжнародних колег. На початку весни 2023 року була опублікована стаття за авторства науковців з США, України, Німеччини та Бельгії про оцінку наслідків

воєнних дій для гідроекосистем України та пов'язаної з ними інфраструктури на початку повномасштабних воєнних дій [4]. Вартий уваги той факт, що автори цього дослідження вже займалися визначенням наслідків антропогенного навантаження спричиненого воєнними діями на функціональний стан екосистем річок Ірпін, Мочунка та Горенка у минулому [5]. Також серед українських вчених відбулося обговорення плану по відновленню зазначених гідроекосистем. [6]. Важливим також є те, що співробітникам Національної Академії Наук України вдалося створити прогноз наслідків та особливостей підтоплення, що були викликані у результаті пошкодження водної інфраструктури річки Ірпін [7].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Особливої уваги заслуговує концепція про здоров'я екосистеми, так як саме завдяки її положенням проводиться комплексна оцінка шкоди, що була заподіяна досліджуваним екосистемам. Саме завдяки розумінню принципів дії компенсаторних механізмів при регуляції екосистемою свого функціонального стану стає можливим визначити ті екосистеми, котрі зазнали настільки потужного збурюючого впливу, що їх потенціал для відновлення до свого попереднього стану є вичерпаним. Такі екосистеми, нерідко, знаходяться у критичному стані та потребують негайних заходів по їх відновленню до врівноваженого стану, оскільки внутрішні компенсаторні механізми таких екосистем вже не в змозі виконати свою функцію по стабілізації функціонального стану системи.

Новизна. Це дослідження на практиці використовує положення концепції здоров'я екосистем при визначенні закономірностей змін стану популяційно-видових характеристик індикаторних груп літорального зоопланктону у тих гідроекосистемах, котрі тривалий час знаходились поза дією стресуючого чинника.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження, що направлені на визначення наслідків воєнних дій для гідроекосистем шляхом моніторингу їх стану на прикладі окремих індикаторних елементів дозволяють як практично використати наявні теоретичні напрацювання так і вдосконалити їх на реальному прикладі. Беручи до уваги той факт, що на території України є значна площа територій,

котрі постраждали внаслідок бойових дій найбільш раціональним рішенням буде зосередитися на тих методах екологічної оцінки, котрі дозволять швидко та точно визначати стан уражених антропогенним навантаженням екосистем та знаходити серед них ті, чий стан знаходиться на критичному рівні.

Викладення основного матеріалу. Кожна з двох серій відбору проб представників літорального зоопланктону включала проведення чотирьох відборів проб з інтервалом у три години для всіх чотирьох станцій відбору проб. Причиною вибору такого інтервалу є потреба у врахуванні добової динаміки просторового розміщення серед досліджуваних угруповань літорального зоопланктону. У кожній з двох серій проб загалом було зібрано 16 проб з чотирьох станцій відбору проб зоопланктону (рис. 1).



Рис. 1. Просторове розміщення станцій відбору проб зоопланктону

Станція відбору проб № 1. Рекреаційна водойма біля села Мошун. Для даної станції прозорість води складала приблизно 25 см. Для товщини шару складеного мулисто-піщаними відкладами характерним був показник у 35–45 см. Для даної станції характерним є незарослий біотоп, так як водна рослинність мала низьку щільність просторового розміщення.

Станція відбору проб № 2. Річка Мошунка. Для даної станції прозорість води складала приблизно до 10 см. Для товщини шару складеного мулисто-піщаними відкладами характерним був показник у 55–65 см. Для даної станції характерним є зарослий біотоп, так як водна рослинність мала високу щільність просторового розміщення.

Станція відбору проб № 3. Річка Горенка. Для даної станції прозорість води складала приблизно 7 см. Для товщини шару складеного мулисто-піщаними відкладами характерним був показник у 35–50 см. Для даної станції характерним є незарослий біотоп, так як водна рослинність мала низьку щільність просторового розміщення.

Станція відбору проб № 4. Річка Ірпінь. Для даної станції прозорість води характеризувалась дуже низькими показниками – до 5 см. Для товщини шару складеного мулисто-піщаними відкладами характерним був показник у 45–60 см. Для даної

станції характерним є зарослий біотоп, так як водна рослинність мала високу щільність просторового розміщення.

Основним приладдям для відбору матеріалу проб літорального зоопланктону була конічна сітка Нансена [8]. Після консервації проби були направлені до лабораторії, де відбувалось їх дослідження з використанням камери Богорова та бінокюляру МБС-9 під час якого було визначено їх кількісні характеристики з використанням обчислювального методу Гензена. В результаті лабораторного опрацювання проб було отримано дані по кількісному розподілу представників наступних груп літорального зоопланктону: коловерток, кладоцер, копепод [9].

Сапробність дослідних гідроекосистем визначено згідно індексу Пантле-Букка.

Станція відбору проб № 1. Рекреаційна водойма біля села Мошун. У весняний період 2024 року розподіл серед груп літорального зоопланктону в умовах незарослого біотопу був таким: кладоцери представлені двома видами з п'яти загальних (40%). Копеподи та коловертки представлені по одному виду (по 20%). Сапробність (S) у весняний період для даної станції була на рівні 2, що відповідає помірно забрудненим екосистемам. В літній період 2024 року розподіл серед груп літорального зоопланктону в умовах незарослого біотопу був таким: кладоцери були представлені двома видами з семи загальних (28,5%), в той час як копепода та коловертки були представлені по одному виду (14,2%). Сапробність (S) в літній період для даної станції була на рівні 1,9 яка притаманна для відносно чистих гідроекосистем.

Станція відбору проб № 2. Річка Мошунка. У весняний період 2024 року розподіл серед груп літорального зоопланктону в умовах зарослого біотопу був таким: кладоцери та копепода представлені по одному виду з шести загальних (по 16,5%). Коловертки представлені двома видами (33%). Сапробність (S) у весняний період для даної станції була на рівні 2,3 що відповідає помірно забрудненим екосистемам. В літній період 2024 року розподіл серед груп літорального зоопланктону в умовах зарослого біотопу був таким: кладоцери були представлені двома видами з семи загальних (28,5%), в той час як копепода та коловертки були представлені по одному виду (14,2%). Сапробність (S) в літній період для даної станції була на рівні 2,2 яка притаманна для помірно забруднених екосистем.

Станція відбору проб № 3. Річка Горенка. У весняний період 2024 року розподіл серед груп літорального зоопланктону в умовах незарослого біотопу був таким: коловертки були представлені трьома видами з 13 загальних (23%). Кладоцери були представлені п'ятьма видами (38,4%). Копеподи були представлені двома видами (15,3%). Сапробність (S) у весняний період для даної станції була на рівні 1,9 що відповідає відносно чистим екосистемам. В літній період 2024 року розподіл серед груп літорального зоопланктону в умовах незарос-

лого біотопу був таким: коловертки були представлені трьома видами з 14 загальних (21,4%). Копеподи були представлені двома видами (14,2%). Кладоцери були представлені п'ятьма видами (35,7%). Сапробність (S) в літній період для даної станції була на рівні 1,8 яка притаманна для відносно чистих гідроекосистем.

Станція відбору проб № 4. Річка Ірпінь. У весняний період 2024 року розподіл серед груп літорального зоопланктону в умовах зарослого біотопу був таким: кладоцери були представлені двома видами з восьми загальних (25%). Копеподи були представлені чотирма видами (50%) Коловертки представлені одним видом (12,5%). Сапробність (S) у весняний період для даної станції була на рівні 2,6 що відповідає забрудненим екосистемам. В літній період 2024 року розподіл серед груп літорального зоопланктону в умовах зарослого біотопу був таким: кладоцери були представлені двома з дев'яти загальних (22%). Копеподи були представлені чотирма видами (44%) Коловертки представлені одним видом (11%). Сапробність (S) в літній період для даної станції була на рівні 2,5 яка притаманна для помірно забруднених екосистем.

Головні висновки. При порівнянні даних по змінам видового співвідношення серед представників літорального зоопланктону досліджуваних гідроекосистем визначено, що завдяки функціонуванню механізмів саморегуляції цих екосистем співвідношення представників індикаторних груп стає більш рівномірним з часом. Тим не менш, саморегуляція гідроекосистеми це складний та повільний процес, що вимагає продовження моніторингу для визначення всіх його закономірностей.

Перспективи використання результатів дослідження. Опрацьовані результати є одним з низки ключових елементів дослідження, коли мова йде про комплексну екологічну оцінку гідроекосистем у післявоєнний період та визначення рівня завданої їм шкоди внаслідок бойових дій. Тим не менш, для збільшення репрезентативності даних варто врахувати положення концепції здоров'я екосистеми, так як при проектуванні відновлювальних заходів на деокупованих територіях варто мати чітке розуміння принципів дії регуляторних механізмів місцевих екосистем.

Література

1. Хільчевський, В. К., Гребінь, В. В. *Деякі аспекти щодо стану територій районів річкових басейнів та моніторингу вод під час вторгнення Росії в Україну*. Київ, 2022. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 3(65), 2022. С. 6–14. URL: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.1>.
2. Гарасим, А., Кельм, Н. *Підриєв греблі річки Ірпінь. Як росіяни зупинили воду*, 2022. URL: <https://texty.org.ua/articles/106945/pidryv-hrebli-richky-irpin-yak-rosiyan-zupynyla-voda/>
3. Mundy, V. *Ukraine's 'hero river' helped save Kyiv. But what now for its newly restored wetlands?. The Guardian*. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2022/may/11/ukraine-hero-irpin-river-helped-save-kyiv-but-what-now-for-its-newly-restored-wetlands-aoe>
4. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A. *et al.* Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nat Sustain* 6, 578–586, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
5. Берія, В. Д., Гандзюра, В. П. *Стан угруповань літорального зоопланктону різномісних водойм Бучанського району*. Міжнародна наукова конференція за участю молодих науковців "Регіональні проблеми охорони довкілля та збалансованого природокористування». Одеський державний екологічний університет, 2022. С. 24–26.
6. Василюк О., Симонов Є. *План відновлення України у дзеркалі розливу річки Ірпінь*. Журнал про екологічні наслідки війни. Ukraine War Environmental Consequences Work Group, 5, 2022. С. 3–20.
7. Національна академія наук України. *Науковці Академії спрогнозували характер підтоплення території Київської області, спричиненого російським вторгненням*. Київ, 2022. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/news/Pages/View.aspx?MessageID=9011>
8. Трохимець, В. М., & Алексієнко, В. Р. *Методичні рекомендації до практикуму з курсу "Гідробіологія"*. Київ, 2010. С. 5–19. Київський університет.
9. Hensen, V. *Methodik der untersuchungen*. In *Ergebnisse der Plankton-Expedition der Humboldt-Stiftung*. Lipsius and Tischer. Kiel, 1895.

GAP-АНАЛІЗ ВОДОКОРИСТУВАННЯ У КОНТЕКСТІ ЗАПОБІГАННЯ ЕВТРОФІКАЦІЇ РІЧКИ ТЕТЕРІВ В МЕЖАХ УРБОЕКОСИСТЕМИ М. ЖИТОМИРА

Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Герасимчук О.Л., Скиба Г.В., Хоменко С.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

anna.kireyceva@gmail.com, ke_miyu@ztu.edu.ua,

kgt_gol@ztu.edu.ua, kpn_sgv@ztu.edu.ua, org_hsv@gmail.com

Дослідження спрямоване на проведення GAP-аналізу системи управління водними ресурсами м. Житомира шляхом розробки та оцінки цільових індикаторів з метою визначення прогалів та шляхів вдосконалення управлінських заходів для запобігання евтрофікації р. Тетерів. GAP-аналіз базується на порівнянні поточного стану системи управління водними ресурсами з бажаним станом, який визначається за допомогою цільових індикаторів. Запропоновано 15 індикаторів, що охоплюють ключові аспекти управління водними ресурсами та узгоджуються з вимогами Планів управління річковими басейнами (ПУРБ). Для кожного індикатора визначено методику розрахунку, цільові значення на 2030, 2040 та 2050 роки, а також фактори, що впливають на їх досягнення.

Проведений GAP-аналіз виявив значні прогалли між поточним та цільовим станом управління водними ресурсами Житомира. Зокрема, відсутність інвентаризації водних об'єктів, високі втрати води у мережах, недостатній розвиток інфраструктури водовідведення, обмежене використання інструментів економічного стимулювання. Запропоновано конкретні заходи для досягнення цільових значень індикаторів, які включають модернізацію інфраструктури, впровадження водозберігаючих технологій, розвиток моніторингу, удосконалення тарифної політики тощо.

Вперше для м. Житомира розроблено комплексну систему цільових індикаторів управління водними ресурсами, спрямовану на запобігання евтрофікації р. Тетерів. Запропоновано нові підходи до оцінки ефективності управлінських заходів на основі співставлення поточних та цільових значень індикаторів.

Результати дослідження можуть бути використані для удосконалення Програми охорони навколишнього природного середовища м. Житомира, оновлення місцевих правил приймання стічних вод, коригування інвестиційних програм у сфері водопостачання та водовідведення. Запропоновані індикатори дозволять підвищити ефективність моніторингу та контролю за станом водних ресурсів, оцінювати результативність реалізованих заходів. *Ключові слова:* управління водними ресурсами, GAP-аналіз, евтрофікація, річка Тетерів, цільові індикатори, урбоєкосистема.

GAP analysis of water usage in the context of preventing eutrophication of the Teteriv river within the urban ecosystem of Zhytomyr. Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Herasymchuk O., Skyba G., Khomenko S.

The research aims to conduct a GAP analysis of the water resource management system in Zhytomyr by developing and evaluating target indicators to identify gaps and ways to improve management measures for preventing eutrophication of the Teteriv River. The GAP analysis is based on comparing the current state of the water resource management system with the desired state, which is determined using target indicators. Fifteen indicators are proposed, covering key aspects of water resource management and aligning with the requirements of River Basin Management Plans (RBMPs). For each indicator, a calculation methodology, target values for 2030, 2040, and 2050, as well as factors influencing their achievement are defined.

The conducted GAP analysis revealed significant gaps between the current and target state of water resource management in Zhytomyr. In particular, the lack of water body inventory, high water losses in networks, insufficient development of wastewater infrastructure, and limited use of economic incentive tools were identified. Specific measures are proposed to achieve the target values of indicators, including infrastructure modernization, implementation of water-saving technologies, monitoring development, improvement of tariff policy, etc.

For the first time, a comprehensive system of target indicators for water resource management aimed at preventing eutrophication of the Teteriv River has been developed for Zhytomyr. New approaches to assessing the effectiveness of management measures based on comparing current and target values of indicators are proposed.

The research results can be used to improve the Environmental Protection Program of Zhytomyr, update local wastewater discharge regulations, and adjust investment programs in water supply and sanitation. The proposed indicators will enhance the efficiency of monitoring and control of water resources and evaluate the effectiveness of implemented measures. *Key words:* water resource management, GAP analysis, eutrophication, Teteriv River, target indicators, urban ecosystem.

Постановка проблеми. Ефективне управління водними ресурсами є ключовим фактором сталого розвитку міських територій та забезпечення екологічної безпеки. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах зростаючого антропогенного навантаження на водні об'єкти та загрози їх евтрофікації.

Річка Тетерів протікає у Житомирській та Київській областях України, є правою притокою Дніпра [1]. Річка Тетерів зазнає значного впливу урбанізації, що проявляється у погіршенні якості води, порушенні гідрологічного режиму та деградації водних екосистем. У 21 столітті екологічні проблеми річки Тетерів

пов'язані з коливаннями річкового стоку, коли в період літньо-осінньої межени через відсутність атмосферних опадів рівень падає до критично мінімального, що ставить під загрозу систему водопостачання м. Житомира. Якість води потерпає від аварійних скидів стічних вод комунальних підприємств, що забезпечують їхнє очищення [2]. Вирішення цих проблем потребує комплексного підходу до управління водними ресурсами на основі басейнових принципів та інтеграції екологічних, соціальних та економічних аспектів водокористування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Теоретичні та прикладні аспекти управління водними ресурсами в умовах урбанізації розглядаються в роботах багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. Зокрема, питання оцінки антропогенного навантаження на водні об'єкти висвітлені в працях В. К. Хільчевського, О. Г. Ободовського, В. В. Гребеня [3, 4]. Методологічні основи інтегрованого управління водними ресурсами на засадах басейнового принципу розроблені в роботах М. В. Яцюка, О. В. Чунарьова, Ю. Б. Набиванця [5, 6]. Значна увага приділяється проблемі евтрофікації водних об'єктів та пошуку шляхів її вирішення, зокрема в дослідженнях С. А. Афанасьєва, В. І. Щербака, Н. В. Ковальової [7, 8]. Екологічні основи управління водними ресурсами України вивчають Томільцева А. І., Михайленко Л. Є., Яцик А. В., Чернявська А. П., Томільцев І. М. Яковлев Є. О., Петрук В. Г. Люта Н. Г., Лютий Г. Г., Саніна І. В. та інші [9]. Методологія підтримки прийняття рішень на основі аналізу розривів, виявлення та усунення недоліків у водокористуванні та управлінні водними ресурсами, запропонована Хан С., Ку Д., Кім Й., Кім С., Пак Ч. [10]. Використання індикаторів, виділених в результаті проведення GAP-аналізу, для проведення детального аналізу водного балансу та виявлення області зменшення навантаження на водні ресурси, запобігаючи евтрофікації розкрито в працях Ренуф М., Серрао-Нойман С., Кенвей С., Морган Е., Чой Д. [11] та Прохнов А., Драстіг К., Клаус Г., Берг В. [12]. Вивченням індикаторів впливу зміни клімату на водний цикл та управління водними ресурсами на основі GAP-аналізу займалися Пітерс-Лідард С., Роуз К., Кіанг Дж., Стробел М., Андерсон М., Бьорд А., Коліан М., Бреки Л., Арндт Д. [13].

Дослідження та зазначені напрацювання надають методологічну основу та практичні інструменти для проведення GAP-аналізу водокористування, а також можуть бути використані для розробки та впровадження заходів щодо запобігання евтрофікації річки Тетерів. Вони допомагають систематично підходити до оцінки поточного стану водних ресурсів, ідентифікувати основні проблеми та розробляти ефективні стратегії для їх вирішення в умовах урбанізованої екосистеми.

Незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, присвячених управлінню водними ресурсами в містах, недостатньо вивченими залишаються

питання комплексної оцінки ефективності існуючої системи управління та визначення цільових орієнтирів її розвитку. Особливої уваги потребує розробка науково обґрунтованих індикаторів стану водних ресурсів та ефективності управлінських заходів, які б дозволили оцінювати прогрес на шляху до досягнення доброго екологічного стану водних об'єктів та запобігання їх евтрофікації. Ці питання набувають особливої актуальності в контексті реалізації Планів управління річковими басейнами (ПУРБ), які є ключовим інструментом імплементації Водної Рамкової Директиви ЄС в Україні [14].

Метою дослідження є проведення GAP-аналізу системи управління водними ресурсами м. Житомира для виявлення прогалин та визначення шляхів її вдосконалення в контексті запобігання евтрофікації р. Тетерів.

Виклад основного матеріалу. У місті Житомирі майже вся забрана для потреб вода надходить з поверхневих джерел (99%), а саме з річки Тетерів (водозабор «Відсічне»), а підземні води становлять незначну частку (1%) від загального обсягу використання води. Це свідчить про значну залежність громади від поверхневих вод для потреб водопостачання. Така тенденція зберігається протягом останніх 5 років. Для міста Житомира у 2022 році структура водокористування виглядала наступним чином (рис. 1): 94,87% (19,316 млн.м³) водних ресурсів забирається житлово-комунальним господарством, 3,39% (0,69 млн.м³) сільським господарством, 1,15% (0,234 млн.м³) переробною промисловістю, а менше 1% – 0,59% (0,12 млн.м³) забирається іншими галузями. Схожа тенденція спостерігається щодо кількості скинутої води кожним сектором відносно загальних обсягів. Аналіз діаграми свідчить про значний дисбаланс у водокористуванні, причому муніципальний сектор є переважаючим споживачем і забруднювачем.

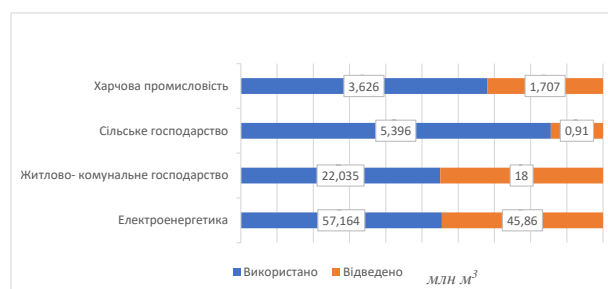


Рис. 1. Структура водокористування міста Житомира (розроблено автором за даними [15])

За даними державного водообліку за формою № 2ТП-водгосп (річна) за 2022 рік, використання води у 2022 році становить 19,739 млн.м³, а у 2021 році – 23,55 млн.м³. Основним показником раціонального використання водних ресурсів є втрати питної води при транспортуванні підприємствами житлово-комунальної галузі. Нами був проведений аналіз втрат питної води при транспортуванні на КП «Житомирводоканал» за останні 5 років (рис. 2) [15].

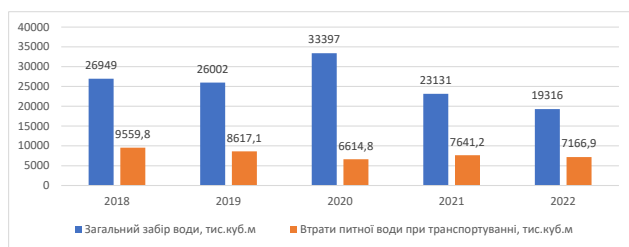


Рис. 2. Динаміка втрат питної води при транспортуванні на КП «Житомирводоканал» з 2018 по 2022 рік, тис.м³ (розроблено автором за даними [15])

Аналізуючи тенденції за цей період, можна помітити загальну тенденцію до зниження втрат питної води. Можливі причини коливань можуть включати зміни в управлінні втратами, інфраструктурні поліпшення або погіршення, а також зміни у водоспоживанні або детекції витоків.

Забруднення поверхневих вод є однією з найгостріших екологічних проблем міста Житомира. Основними джерелами забруднення є скидання недостатньо очищених або неочищених стічних вод промисловими підприємствами, комунальними службами та населенням. За даними Держекоінспекції Поліського округу [16, 17], саме КП «Житомирводоканал» є основним забруднювачем поверхневих водоемів міста Житомир (річок Тетерів та Кам'янка). Саме у 2022 році мало місце фіксація аварійних скидів стічних вод з каналізаційних насосних станцій м. Житомира КП «Житомирводоканал» в обсязі 2,8 тис.м³ у р. Тетерів та її притоку р. Кам'янка, а промивні води на станції водопідготовки II-ого підйому від промивки фільтрів та контактних освітлювачів з очисних споруд водопроводу відведені у річку Тетерів без очистки в обсязі 111,2 тис.м³. Комунальне некомерційне підприємство "Обласний медичний центр вертебрології і реабілітації" Житомирської обласної ради на території міста в результаті порушення регламенту роботи очисних споруд скинуло у р. Тетерів 0,6 тис.м³ недостатньо-очищених зворотних вод.

Загалом, у 2022 році в громаді відведено 14,526 млн.м³ стічних вод, із них 14,130 млн.м³ (97,3%) пройшли очистку на очисних спорудах каналізації міста Житомир [15]. Загальний обсяг забруднюючих речовин, скинутих зі стічними водами в місті Житомирі, становив 13789,9 тон у 2021 році та 9667,9 тон у 2022 році. Незважаючи на зменшення абсолютної кількості, рівень забруднення залишається високим. Серед забруднюючих речовин у стічних водах переважають сухий залишок (5547 т у 2022), хлориди (2079 т), сульфати (614 т) та нітрати (473 т). Ці речовини здатні порушувати природну рівновагу водних екосистем та погіршувати якість води. Позитивним моментом є зменшення обсягів скидів фосфатів з 97 т у 2021 році до 67 т

у 2022 році. Однак, це все ще значні обсяги, враховуючи здатність фосфатів спричиняти евтрофікацію водоемів [15].

Було проаналізовано результати моніторингу кількості проведених відборів та виявлених перевищень гранично допустимих концентрацій (ГДК) забруднюючих речовин у стічних водах підприємств Житомира за період 2019–2023 років. Найявністю у стічних водах понаднормативних концентрацій забруднюючих речовин, таких як солі важких металів, фосфати, завислі речовини, показники хімічного (ХСК) та біохімічного споживання кисню (БСК), чинить негативний вплив на функціонування очисних споруд каналізації (ОСК). Зокрема, надмірний вміст цих речовин погіршує доступ кисню до мікроорганізмів активного мулу, що призводить до їх загибелі та порушення процесів біологічної очистки. Крім того, якість стічних вод, що надходять на ОСК, впливає не лише на вартість і тривалість процесу очищення, а й на термін експлуатації самих очисних споруд та каналізаційних колекторів. Встановлено, що з 2514 підприємств лише 7% оснащені спорудами передочистки стічних вод [18].

Так, аналіз управління водними ресурсами м. Житомира виявив проблеми, що негативно впливають на екологічний стан р. Тетерів. Для вирішення цих проблем необхідна розробка системи моніторингу та оцінки ефективності управлінських рішень. Спираючись на міжнародні практики, зокрема концепцію інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом та Плани управління річковими басейнами (ПУРБ) [14], авторами запропоновано систему цільових індикаторів для оцінки ефективності управління водними ресурсами м. Житомира.

На основі цих індикаторів було проведено GAP-аналіз [19], який виявив значні розриви між поточним та цільовим станом для більшості показників. Результати аналізу представлені в таблиці 1.

Виходячи з виявлених прогалин, було запропоновано конкретні заходи та інструменти для досягнення цільових значень індикаторів та підвищення ефективності управління водними ресурсами м. Житомира (табл. 1). Ці заходи охоплюють широкий спектр управлінських, технологічних, інфраструктурних та інформаційно-просвітницьких інструментів, спрямованих на вирішення існуючих проблем та забезпечення сталого водокористування в громаді.

Реалізація запропонованих заходів матиме значний позитивний вплив на зменшення ризиків евтрофікації р. Тетерів та покращення екологічного стану водних ресурсів м. Житомира. Зокрема, очікується: зменшення надходження біогенних речовин (сполук азоту та фосфору) у водні об'єкти за рахунок підвищення ефективності роботи очисних споруд, впровадження технологій видалення біогенних елементів зі стічних вод, зменшення використання мінеральних добрив на водозбірній площі; покращення

**GAP-аналіз системи управління водними ресурсами м. Житомира
на основі цільових індикаторів (розроблено авторами)**

Індикатор	Поточний стан (2022/2023)	Цільове значення (2030)	Прогалини	Заходи для досягнення цільових значень
1. Інвентаризація та паспортизація малих річок і водойм	0%	100%	Відсутність повної інформації про стан водних об'єктів громади	Проведення інвентаризації та паспортизації всіх малих річок і водойм громади
2. Зменшення втрат води у мережах водопостачання	35,44%	25%	Високий рівень втрат води через застарілі та пошкоджені мережі	Реконструкція та ремонт мереж, впровадження системи моніторингу витоків, контролю тиску
3. Встановлення меж водоохоронних зон і прибережних захисних смуг	0%	100%	Відсутність затверджених меж водоохоронних зон і захисних смуг	Розробка проектів землеустрою, затвердження меж, внесення даних до кадастру
4. Облаштування інженерних систем дощового водовідведення	30%	85%	Недостатня кількість інженерних систем водовідведення на території громади	Розробка планів і проектів, будівництво систем дощового водовідведення
5. Повторне використання очищених стічних вод	1%	25%	Низький рівень повторного використання очищених стічних вод	Будівництво інфраструктури для повторного використання, укладання договорів з водокористувачами
6. Ліквідація стихійних звалищ у водоохоронних зонах	30%	100%	Наявність значної кількості стихійних звалищ у водоохоронних зонах	Виявлення та інвентаризація звалищ, організація прибирання, контроль за недопущенням нових звалищ
7. Ревіталізація та екологічне відновлення малих річок	0 км	10 км	Відсутність проектів та заходів з ревіталізації та відновлення малих річок	Розробка проектів відновлення, залучення експертів та науковців, проведення робіт з ревіталізації
8. Освітні програми для широкого кола населення щодо водних ресурсів	0%	40%	Низька обізнаність населення щодо проблем водних ресурсів та шляхів їх вирішення	Розробка навчальних програм, залучення освітніх закладів, проведення інформаційних кампаній
9. Облік забору води та прогресивні тарифи	70%	100%	Неповний облік водокористування та відсутність ефективних тарифів	Встановлення вузлів обліку для всіх водокористувачів, розробка та затвердження методики розрахунку прогресивних тарифів
10. Зменшення скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти	14,526 млн.м ³	Зменшення на 20%	Високий рівень скидів забруднюючих речовин у водні об'єкти громади	Модернізація очисних споруд, впровадження технологій чистого виробництва, контроль за дотриманням нормативів скидів
11. Відновлення та підтримання сприятливого гідрологічного режиму річок	0%	Екологічні попуски на 50% водних об'єктів	Порушення природного гідрологічного режиму річок через діяльність ГЕС та інших гідротехнічних споруд	Розробка та затвердження режимів екологічних попусків, оснащення гідротехнічних споруд спеціальним обладнанням, контроль за дотриманням встановлених режимів
Зменшення площі підтоплених територій міста	0%	Зменшення на 20%	Значні площі міста потерпають від підтоплень через недостатній розвиток дренажних систем та порушення гідрологічного режиму малих річок	Інвентаризація та картування підтоплених ділянок, реалізація проектів з відновлення дренажних систем та русел малих річок, будівництво зливової каналізації
Забезпечення оперативного моніторингу стану водних об'єктів та якості води	0%	3 автоматизовані пости	Відсутність системи оперативного моніторингу стану водних об'єктів та якості води	Встановлення автоматизованих постів контролю якості води, інтеграція даних моніторингу до міської системи управління
Підвищення водної безпеки громади	0%	2 резервні свердловини	Відсутність схеми альтернативного водопостачання на випадок надзвичайних ситуацій	Розробка схеми альтернативного водопостачання, облаштування резервних свердловин, забезпечення запасів питної води у резервуарах чистої води

гідроморфологічних характеристик русла р. Тетерів та її приток внаслідок заходів з ревіталізації та відновлення малих річок, що сприятиме відновленню природних процесів самоочищення та регулювання; зниження рівня органічного забруднення води за рахунок зменшення скидів недостатньо очищених стічних вод, ліквідації стихійних звалищ у водоохоронних зонах, екологізації діяльності підприємств; відновлення та підтримання сприятливого гідрологічного режиму річки, що запобігатиме «цвітінню» води та заростанню русла вищою водною рослинністю; підвищення стійкості водної екосистеми до евтрофікації за рахунок покращення її структурних та функціональних характеристик (збільшення біорізноманіття, відновлення нерестовищ риб тощо).

Висновки. Дослідження комплексно проаналізувало систему управління водними ресурсами м. Житомира, виявивши ключові проблеми, що негативно впливають на екологічний стан р. Тетерів. Серед них – недостатня ефективність очисних споруд, високий рівень забруднення стічних вод та недосконалість регуляторних механізмів.

Розроблено систему з 14 цільових індикаторів для оцінки ефективності управління, базовану на міжнародних практиках та вимогах Планів управ-

ління річковими басейнами (ПУРБ). Індикатори охоплюють якість води, екологічний стан водних об'єктів, ефективність водопостачання та водовідведення, інноваційні технології та участь громадськості.

GAP-аналіз виявив значні розриви між поточними та цільовими значеннями індикаторів, особливо щодо інвентаризації водних об'єктів, встановлення водоохоронних зон та ревіталізації малих річок. Запропоновано комплекс заходів для досягнення цільових показників, включаючи реконструкцію мереж, розвиток інфраструктури дощового водовідведення, модернізацію очисних споруд та впровадження освітніх програм.

Реалізація цих заходів сприятиме вирішенню проблеми евтрофікації р. Тетерів, покращенню екологічного стану водних ресурсів та забезпеченню населення якісною питною водою. Досягнення бажаного ефекту потребує консолідації зусиль усіх зацікавлених сторін та значних інвестицій.

Подальші дослідження мають зосередитись на деталізації запропонованих заходів, оцінці їх вартості та ефективності, а також розробці організаційно-економічного механізму їх реалізації в рамках місцевих та басейнових програм розвитку водного господарства.

Література

1. Електронна версія «Великої української енциклопедії». Тетерів. URL: <https://vue.gov.ua/%D0%A2%D0%B5%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B2> (дата звернення: 27.08.2024).
2. Басейнове управління водних ресурсів річки Прип'ять. Водні ресурси. URL: https://buvrzt.gov.ua/vodni_resursy.html (дата звернення: 29.08.2024).
3. Хільчевський В. К., Ободовський О. Г., Гребінь В. В., та ін. Гідролого-гідрохімічна характеристика мінімального стоку річок басейну Дніпра. Київ: Ніка-Центр, 2007. 256 с.
4. Ободовський О. Г., Лукянець О. І., Почасвець О. О. Русліві процеси річки Тетерів у контексті гідроморфологічної оцінки. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2016. № 2. С. 64-76.
5. Яцюк М. В., Чунарьов О. В., Набиванець Ю. Б., та ін. Методичні основи розроблення плану управління річковим басейном. Київ: Інтерсервіс, 2019. 148 с.
6. Сташук В. А., Яцюк М. В., Чунарьов О. В. Наукові засади раціонального використання водних ресурсів України за басейновим принципом. Київ: Наука, 2014. 120 с.
7. Афанасьєв С. А., Летицька О. М., Багнюк В. М. Оцінка екологічного стану річки Тетерів за структурно-функціональними характеристиками донних угруповань. Наукові записки Тернопільського педагогічного університету. Серія: Біологія. 2010. Вип. 2(43). С. 3-12.
8. Щербак В. І., Ковальова Н. В., Семенюк Н. Є. Функціональна характеристика фітопланктону водних об'єктів урбанізованих територій. Доповіді Національної академії наук України. 2016. № 6. С. 122-129.
9. Томільцева А. І., Яцик А. В., Мокін В. Б., та ін. Екологічні основи управління водними ресурсами. Вінниця: Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, 2017. 304 с.
10. Han S., Koo D., Kim Y., Kim S., Park J. Gap analysis based decision support methodology to improve level of service of water services. Sustainability. 2017. Vol. 9(9). P. 1578. <https://doi.org/10.3390/SU9091578>.
11. Renouf M., Serrao-Neumann S., Kenway S., Morgan E., Choy D. Urban water metabolism indicators derived from a water mass balance – Bridging the gap between visions and performance assessment of urban water resource management. Water Research. 2017. Vol. 122. P. 669-677. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.060>.
12. Prochnow A., Drastig K., Klauss H., Berg W. Water use indicators at farm scale: methodology and case study. Food and Energy Security. 2012. Vol. 1(1). P. 29-46. <https://doi.org/10.1002/FES3.6>.
13. Peters-Lidard C., Rose K., Kiang J., Strobel M., Anderson M., Byrd A., Kolian M., Brekke L., Arndt D. Indicators of climate change impacts on the water cycle and water management. Climatic Change. 2021. Vol. 165. P. 54. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03057-5>.
14. План управління річковим басейном Дніпра. Київ, 2021. URL: https://www.davr.gov.ua/fls18/upperdnipro_plan_final.pdf (дата звернення: 17.07.2024).
15. Портал електронних послуг Державного агентства водних ресурсів України. URL: <https://e-services.davr.gov.ua/> (дата звернення: 27.08.2024).

16. Екологи назвали підприємства на Житомирщині, які скидають неочищені стоки у водойми. URL: <https://1.zt.ua/news/zdorovia/ekology-nazvaly-pidpryemstva-na-zhytomyrshhyjni-yaki-skydayut-neochyshheni-stoky-u-vodojmy.html> (дата звернення: 29.08.2024).
17. Знову КП «Житомирводоканал» забруднює річки міста Житомир. URL: <https://polissyareg.dei.gov.ua/post/znovu-kp-zhitomirvodokanal-zabrudnyue-richki-mista-zhitomir> (дата звернення: 17.07.2024).
18. Якість стічних вод: хто контролює і як вона впливає на систему водовідведення міста? URL: <https://vodokanal.zt.ua/news/akist-sticnih-vod-hto-kontrolue-i-ak-vona-vplivae-na-sistemu-vodovidvedenna-mista> (дата звернення: 27.08.2024).
19. Ткаченко Т., Кузнєцова О. Впровадження індикаторів сталого розвитку туристичної галузі. Вісник соціально-економічних досліджень. 2020. Вип. 2(73). С. 113-125. <http://www.vestnik-econom.mgu.od.ua/journal/2020/42-2020/13.pdf>.
20. Kireitseva, H., Šerevičienė, V., Khrutba, V., Zamula, I. Internal and external factors of use and conservation of water resources in the Zhytomyr region. *Environmental Problems*. 2024. Lviv Polytechnic National University. <https://doi.org/10.23939/ep2024.01.043>.
21. 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. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.11>.
22. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Демчук Л.І., Скиба Г.В., Вовк В.М. Оцінка стану та фігуремедіаційного потенціалу антропогенно трансформованих гідроекосистем Малинщини. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 5 (50). С. 81-87. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.12>.
23. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Гандзюра В.П., Алпатова О.М., Демчук Л.І., Хом'як І.В., Вовк В.М. Гідрохімічний статус пост-мілітарних водних екосистем с. Мошун, Київської області. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 1 (46). С. 53-58. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.9>.
24. I. Tsyhanenko-Dziubenko, H. Kireitseva, L. Demchuk, V. Vovk. Hydrochemical Determination of the Teteriv River and the Kamianka River Eutrophication Potential. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2023. P. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520089>.
25. I. Tsyhanenko-Dziubenko, H. Kireitseva, L. Demchuk. Dynamics of Heavy Metal Compounds Allocation in Urbohydrotops of Kyiv Region in Post-Military Conditions. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2023. P. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520066>.

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНИХ ТА КЛІМАТИЧНИХ УМОВ ФОРМУВАННЯ СУЧАСНОГО ГІДРОЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ В ПОНИЗЗІ РІЧКИ СИНЮХА

Магась Н.І.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54025, м. Миколаїв
nataly.magasy@gmail.com

Річка Синюха є ключовим дренажним водотоком всієї південно-західної частини Українського кристалічного Щита, забезпечуючи повноцінне водовідведення з південного сегменту Південно-Придніпровської Височини в басейн Південного Бугу. Вона цілком формує його водність у пониззі, при цьому її стік перевищує стік магістрального водотоку. Геологічна та ландшафтна специфіка басейну річки визначає досить потужну цілорічну водонаповненість і відносно задовільний та сезонно стабільний гідрохімічний стан річки. Проте, річка Синюха на сьогодні є одним із крупних водотоків, сучасний стан яких і їх водогосподарчий потенціал лишається невивченим. Все це стало причиною детального вивчення вказаних питань, польові та лабораторні дослідження за якими виконували впродовж 2021–2024 років. Отримані результати, розглянуті в порівнянні з ретроспективними даними були покладені в основу даної роботи, безперечно актуальність якої різко стимульована кліматичними аспектами рекордно спекотливого літа 2024 року. За результатами дослідження встановлено, що на теперішній час водність р. Синюхи знаходиться в тривалій маловодній фазі, яка є більш стійкою та глибшою за попередні, що пов'язано зі змінами клімату. На фоні підвищення температури середовища і потужної агрогенної трансформації водозбору, відбулось більш ніж двократне зменшення витрат води. Динаміка водності річки формується під впливом комплексу фізико-географічних факторів і залежить від кліматичних та гідрогеологічних умов. У своєму пониззі річка зберігає цілорічну проточність, що забезпечує стабільний гідрохімічний склад води та органолептичні властивості. Основним джерелом надходження неорганічних сполук азоту і фосфору є водно-міграційне забруднення річкових вод за рахунок привнесених забруднюючих речовин із полів і населених пунктів. *Ключові слова:* гідроecologia річок, кліматичні зміни, водний стік, витрати води, рівень води, екологічний стан річки.

Characteristics of natural and climatic factors that influence the current hydroecological state of lower reaches of the Syniukha river. Magas N.

The Syniukha River is a key drainage watercourse of the entire southwestern part of the Ukrainian Crystalline Shield, providing a full-fledged drainage from the southern segment of the Southern Dnieper Upland to the Southern Bug basin. It fully forms its water content in the lower reaches, while its flow exceeds the flow of the main watercourse, which is why the ancient Greeks perceived its upper reaches in the basin of the Syniukha. Its geological and landscape specificity determines a fairly powerful year-round water content and a relatively satisfactory and seasonally stable hydrochemical state of the river. However, the Syniukha River is one of the largest watercourses, the current state of which and their water management potential remain unstudied. All this led to a detailed study of these issues, field and laboratory studies on which were carried out during 2021–2024. The results obtained, considered in comparison with retrospective data, were the basis of this work, the undoubted relevance of which is sharply stimulated by the climatic aspects of the record-breaking hot summer of 2024. The study found that the water content of the Syniukha River is currently in a prolonged low-water phase, which is more stable and deeper than the previous ones, due to climate change. Against the backdrop of rising ambient temperatures and a powerful agrogenic transformation of the catchment, there has been a more than twofold decrease in water flow. The dynamics of the river's water content is shaped by a complex of physical and geographical factors and depends on climatic and hydrogeological conditions. In its lower reaches, the river maintains year-round flow, which ensures a stable hydrochemical composition of water and organoleptic properties. The main source of inorganic nitrogen and phosphorus compounds is water-migration pollution of river waters due to pollutants introduced from fields and settlements. *Key words:* river hydroecology, climate change, water flow, water discharge, water level, ecological state of the river.

Постановка проблеми. Проблема охорони річок із метою збереження їх екосистемних функцій є однією з ключових реалій сучасної гідроecologii, що перейшла зі сфери суто вузькофахових питань в статус соціально-економічних і політичних проблем більшості країн Світу [1]. Особливу увагу стали надавати вивченню стану та охороні річок, використовуваних для покриття питних потреб населення, води яких повинні відповідати певним санітарним вимогам [2]. Зумовлено це широко-наслідковим «шлейфом» проблем, що започатковані загальним і питним водodefіцитом, який відчувають

багато густонаселених країн світу [3]. Особливо актуальним вирішення перерахованих проблем є для півдня України, який є специфічною територією з переважанням степового ландшафту і знаходиться на межі міжрегіональних кліматичних та природно-кліматичних зон, однією з характеристик якої є водodefіцит. Особливо катастрофічна ситуація склалась у нижньому Побужжі, головним джерелом водопостачання якого є річка Південний Буг та її притоки. Найпотужнішою притокою Південного Бугу є річка Синюха, яка цілком формує його водність у пониззі, при цьому її стік перевищує стік магістрального

водотоку, через що давні греки сприймали його верхів'я в басейні Синюхи.

Актуальність дослідження. Гідросистема річки Синюхи, завдяки своєму розташуванню та геологічним особливостям водозбірної території слугує потужним міграційно-магістральним коридором, який поєднує геохімічні провінції Лісостепоного Подніпров'я з геохімічно відмінними місцевостями Правобережного Степу [4]. Вказані місцевості є одними із найдавніших зон українського землеробства, які до наявного часу відрізняє наявність щільного сільського населення, сконцентрованого переважно в долинах місцевих річок [5]. Проте, довготривала антропогенна трансформація природного середовища в межах водозбірної площі Синюхи загалом не призвела до критично-глибоких деструкцій цієї річкової гідросистеми. До сьогодні річка Синюха вважається однією з найбільш чистих степових річок із питною водою, мало затронутих агрогенними і гідротехнічними перетвореннями останніх часів [6]. У значній мірі це пов'язано з її лісостеповим розташуванням, цілорічною проточністю складових водотоків та геоморфологічною специфікою басейну, сформованого під впливом морфоскульптури південного схилу Українського Кристалічного Щита [7].

При цьому, сучасний стан річки Синюхи, яка є поєднуючо-стоковим водотоком для значної за розмірами притокової гідромережі, вивчений українцями недостатньо. Особливо проблемним в інформаційному відношенні є гідроекологічний стан степового пониззя Синюхи, що результує сумарний стік чисельних притоків, цілком розташованих у масивах південно-лісостепоного агроландшафту. Водночас, поряд розташовані, майже аналогічні за природними умовами водозбори Середнього Побужжя постійно слугують об'єктом інтенсивного і всебічного вивчення [8]. Віддаленість річки Синюхи від крупних міст та відсутність у її басейні великих площ зрошувального землеробства теж є причинами явно недостатнього рівня сучасної вивченості цієї водойми.

До наявного часу річка Синюха зберігає свої екосистемні функції – слугує ландшафтним і біотопічним резерватом для місцевої біоти, виступає важливим джерелом питного водопостачання для населення і ключовим засобом поповнення та регуляції стану підземних вод [9, 10]. Проте відносно малопотужна в гідрологічному плані гідромережа чисельних водотоків різного порядку, що формують річку Синюху, піддається значному тиску природно-кліматичних і антропогенних деструкторів, сумісний вплив яких сягає критичного рівня [11]. Так, суттєвий відбір поверхневих і підземних вод у річковому басейні, майже цілком розташованого в зоні панування тріщинних вод [12], спричиняє відчутно негативний вплив на водний баланс даної гідросистеми. Його дестабілізація посилюється

і фактором скиду зворотних вод. Також і поверхневий стік із населених пунктів і полів привносить до річки значні обсяги біогенних речовин у вигляді сполук азоту та фосфору. Специфіка місцевостей на поверхні кристалічних порід скельного фундаменту та наявності родовищ залізо-нікелевих руд є причинами підвищеного природного вмісту металів у річковій воді [13, 14]. Комплекс негативних природно-антропогенних чинників впливу на водозбір і на самі річки суттєво стимулюється кліматичною нестабільністю останніх років, спричиняючи системні та дрібно-локальні деструкції водойм і їх складових [15].

Метою даної роботи є характеристика природних та кліматичних особливостей, які впливають на формування гідроекологічного стану в пониззі річки Синюхи.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота тісно пов'язана з вирішенням завдань, що наведені у Водній стратегії України на період до 2050 року [16], ст. 11 Водного кодексу України [17], Обласній програмі «Питна вода Миколаївщини» на 2021–2025 роки [18], науково-дослідній роботі «Розробка заходів та засобів раціонального водокористування, зниження антропогенного навантаження на водні екосистеми півдня України» (державний реєстраційний № 0124U001593).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Описи Північно-Західного Причорномор'я античного періоду і часів Раннього Середньовіччя свідчать, що річка Синюха та її розташування були відомі європейцям і сприймалися у якості верхньої частини Південного Бугу. Його істинні витoki, розташовані в межах Подільської Височини, вперше картографічно відображені на відомій карті Боплана (1638), орієнтованої з півночі на південь. Остання містить і досить точно відображає практично всю сучасну гідромережу степів Причорномор'я від устя Дунаю до Азовського узбережжя [19]. Проте, ще в 1651 році османський географ-мандрівник Евлія Челебі в описі місцевості від Очакова до устя Дністра дає опис річки Березані, явно сприймаючи її витoki з сучасними верхів'ями Південного Бугу. Це свідчить, що й турецькі джерела на той час також вважали Синюху верхів'ям Південного Бугу. Навіть османська і слов'янська назви цих гідронімів схожі за смыслом чистоти води – Ак-Су – Біла вода, він же античний Гіппаніс і річка Синь – Сині Води часів Середньовіччя [20].

Судячи з відомої «Історії Запорізьких козаків» Дмитра Яворницького, просторова і гідрографічна структура гідромережі Синюхи були добре освоєні вже на початку XVII сторіччя [21], що й підтверджується документами Запорізької Січі [22]. Перші гідрографічні обстеження гідромережі Синюхи було виконано у XIX сторіччі при вивченні басейну

Південного Бугу та його основних притоків. Пізніше басейн Синюхи був обстежений експедиційно з 6 по 26 липня 1953 року фахівцями гідрометеорологічної служби. Надалі основна увага дослідників була зосереджена саме на Південному Бузі, тоді як вивчення його притоків й досі не має вираженої системності.

Спеціальні фахові публікації новітнього часу, присвячені саме питанням гідроекології річки Синюха, відносно малочисельні і переважно присутні в якості складових в оглядових публікаціях і спеціалізованих довідниках. Суттєві обсяги присвяченого цій річці матеріалу є в оглядових роботах В.К. Хільчевського [23, 24] та довідниках різних часів [25, 26, 27]. Новітні гідрохімічні характеристики вод Синюхи приведені в серії статей О. О. Ухань із співавторами [28, 29]. Оперативні дані щодо поточних гідрологічних характеристик річок і гідрохімічного складу води гідромережі Синюхи за останні роки приведені на сайтах Регіональних офісів водних ресурсів Миколаївської, Кіровоградської та Черкаської областей і на сайті Басейнового управління водних ресурсів річки Південний Буг. Та все ж на фоні значного обсягу публікацій, присвячених Дністру і Південному Бугу, перелік публікацій по річці Синюсі явно обмежений, що прямо вказує на недостатній рівень досліджень цієї водойми, особливо впродовж останніх десятиріч. Цей факт став одним із чинників, які визначали вибір об'єкту і тематики виконаних досліджень.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Матеріалом, використаним для підготовки даної статті слугував значний обсяг літературних, картографічних, звітних ретроспективних і новітніх даних гідрологічних спостережень та гідрохімічного моніторингу проб води, а також фактичні дані, отримані в результаті проведення польових обстежень нижньої ділянки річки Синюхи у 2021–2024 рр. Обробку даних було виконано на основі можливостей стандартного пакету програм «Statistika» (2020) операційної системи Excel 2020. Для аналізу та розробки картографічного матеріалу були використані дані дистанційного зондування Землі та матеріали спеціальних інтерактивних картографічних засобів – «Топографічна карта України», системи MERIT Hydro, ArcMap, ArcGIS Desktop і додатків Google Earth Pro.

Викладення основного матеріалу. Згідно з кваліфікаційними положеннями Водного Кодексу (Ст. 79 ВКУ) [17], річка Синюха при довжині 111 км і розмірами власного басейну (9520 км²) належить до середніх річок. Вона є самим крупним лівим притоком Південного Бугу, привносячи йому від 41 до 63% сумарного стоку [30]. Поєднання у межах міста Первомайська річок Синюхи, Кодими і бузького русла формує нижню ділянку течії Південного Бугу, яка разом із навколишніми місцевостями в географічно-історичному плані відома як Нижнє Побужжя [31].

Басейн річки Синюха розташований на межі Байрачного (Північного) Степу і Лісостепу, практично цілком на західних відрігах Південно-Придніпровської Височини. Висоти водозбору помірні (165–105 м), поверхня його покряяна відносно короткими суходільними балками, тальвеги яких відкривають скельні породи. Вторинні форми рельєфу стерті, хоча в умовах горбистої місцевості ерозійні процеси деструкції ораних ґрунтів на лесовому підґрунті досить значні. Візуально схожі на вигляд долини, русла і панівні ландшафти водозборів Синюхи (особливо її лівобережна частина) та Чорного Ташлику вказують на геологічну та гідрокліматичну спорідненість обох водотоків, останній із яких відрізняється складною гідрохімією води. Місцеві ландшафти впродовж останніх 400–500 років демонструють низку виражених змін, зумовлених специфікою природних явищ і антропогенних чинників [7].

Особливості рельєфу, пов'язані з геоструктурною та літологічною будовою південно-західного схилу Українського Кристалічного щита та його позитивною неотектонікою [32] слугують визначальними умовами функціонування водозбору Синюхи. Проте, його розташування практично на осі Воєйкова (Луганськ-Дніпро-Балта) спричиняє значну чутливість належного їй гідрометеорологічного комплексу до циклічних кліматичних коливань [33], проектуючи останні через низку залежностей на динаміку місцевих екосистем. Так, за історичними даними, ще в XVII сторіччі в районі поєднання Південного Бугу та Синюхи були присутні ділянки природних широколистяних лісів у яких мешкали суто лісові види [34]. Їх сучасна наявність [35] вказує на сталу лісостепову мозаїчність ландшафту з помітним тяжінням його біоти щодо біокомплексів широколистяних лісів. Південні межі останніх нині майже не змінились в широтному плані, проте зміщені на захід до Саврані.

Відповідно, в басейні Синюхи впродовж останніх двох сторіч сумісний вплив природних і антропогенних чинників зумовив досить значні зміни ландшафту, що прямо позначилось на рівнях водозбірного потенціалу місцевості. Безсистемна рубка лісів та суцільна оранка родючих земель упродовж XVIII–XIX сторічч призвели до перебудови унікальних екосистем, які тривалий час еволюціювали на межі поширення широколистяних лісів та масивів височинних степів. Останні «перемогли» і вже в першій чверті минулого сторіччя практично вся територія від Кодими до Синюхи в ландшафтно-біотичному плані набули ознак Байрачного Степу. При цьому в останні роки посушливість лівобережжя Синюхи зростає, набуваючи спільних рис із ландшафтами водозбору Чорного Ташлику. Настільки всі ці довготривалі та короткотермінові явища знаходять вираження в гідрологічному та гідроекологічному відношенні щодо Синюхи поки детально не вивчено.

Безпосередньою територією польових досліджень, виконаних у 2021–2024 рр., є найнижча ділянка долини річки Синюхи довжиною 18,38 км – на відрізку течії від межі з Кіровоградською областю до злиття з Південним Бугом (рисунки 1, 2).



Авторська розробка на основі бланку мапи CNES/TerraMetrics, 2024

Рис. 1. Ділянка пониззя річки Синюхи, піддана дослідженням

Позначення: червоною лінією показана межа Миколаївської/Кіровоградської областей; блакитними стрілками напрям течії річок, які формують нижню ділянку течії Південного Бугу



Авторська розробка на основі бланку мапи OpenStreetMap

Рис. 2. Ландшафти та орографія пониззя річки Синюхи

Позначення: блакитною лінією показані межі пониззя річки Синюхи

Вибір саме цієї, досить обмеженої за площею ділянки річки (та її локального водозбору) зумовлений обмеженими можливостями щодо проведення експедиційних різносезонних обстежень водою, локалізацією діючого гідропоста в селі Синюхин Брід та наявністю блоку багаторічних результатів гідрохімічного контролю проб води в точці питного водозабору міста Первомайська. У певній мірі вибір адміністративно-територіальної частини річки, пов'язаної з Миколаївською областю спричинений і проблематичним доступом до ретроспективних даних, які належать установам і організаціям Кіровоградської та Черкаської областей.

Фізико-географічне розташування та гідрографія водоїми. Розгляд гідромережі Південного Бугу демонструє її чіткий структурно-функціональний розподіл на декілька суббасейнів (рисунки 3), один із яких належить Синюсі. Гідросистема цієї річки є досить складною гідрографічно-ландшафтною

побудовою, утвореною чисельними водотоками першого, другого і третього порядку, мережа яких охоплює західну і центральну частини Південно-Придніпровської Височини. По суті річка Синюха поєднує та слугує термінальною частиною гідрографічно-стокової системи водовідведення з височинних місцевостей між басейном Росі (з півночі) та Дніпра (з сходу). Остання прямо пов'язана із конкретними географічно-ландшафтними комплексами Центрального Подніпров'я.

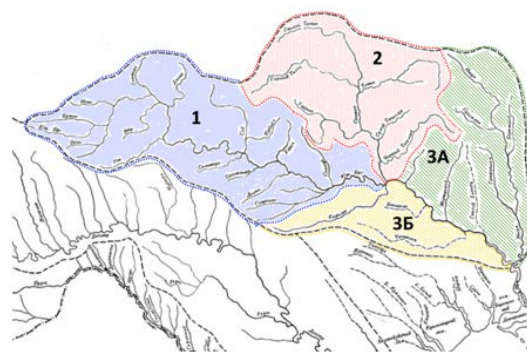


Рис. 3. Басейн Південного Бугу та його основні суббасейни

Позначення: 1 – суббасейн власне Південного Бугу, 2 – суббасейн Синюхи, 3 – суббасейн Нижнього Побужжя (А – лівобережна частина, Б – правобережна частина)

Авторська розробка на основі бланку мапи з веб-сайту «Атлас річок України» [36]

Річка Синюха, як водоток власного імені, починається біля села Скелевате бувшого Новоархангельського району Кіровоградської області у місці злиття річки Тікич (північно-західна, або права гілка) і Великої Висі (північно-східна, або ліва гілка). Вказана система формуючих водотоків чітко поділяється на північну і південну гідрографічні частини, перша з яких (праві витoki) представлена річками Ятрань, Гірський Тікич і Гнилий Тікич, друга (ліві витoki) – річкою Велика Вись та її притоками і окремо – річкою Чорний Ташлик. Долини цих річок обмежені по ширині, переважно неглибокі (до 40 м), V-подібного профілю, демонструють 2-гу і 4-ту тераси, розвиток яких сягає максимуму в гирлових ділянках [37]. Збираючи водовідведення з Центрального Подніпров'я, річка Синюха впадає до Південного Бугу, поєднуючись із ним у межах міста Первомайська, за 196 км від його устя (умовно – до створу Варварівського мосту в місті Миколаєві). За сучасною структурою водогосподарчих ділянок території України річка Синюха, включаючи і притоку Велику Вись, знаходиться в межах ділянки М5.4.0.06 [38].

В адміністративному плані басейн Синюхи охоплює частини території Черкаської, Кіровоградської та Миколаївської областей. Власне річка

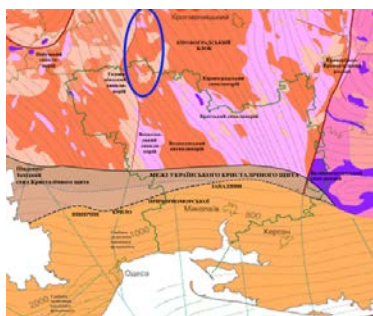
Синюха знаходиться на стику Кіровоградської та Миколаївської області. За специфікою фізико-географічного розташування ця річка слугує природною межею між Південно-Придніпровською Схилово-Височинною областю Дністровсько-Дніпровського Північно-Степового краю Степової зони та Південно-Придніпровською Височинною областю Подільсько-Придніпровського Краю Лісостепової зони (рисунок 4). Південно-східна частина басейну Синюхи (лівобережжя) поєднує місцевості Степової та Лісостепової зони, тоді як північно-західна частина (правобережжя) цілком належить Лісостепу. Проте, місцевості ліво- та правобережних частин водозбору Синюхи, за певних кліматично-ландшафтних відмінностей, належать єдиному масиву ерозійно-денудаційної горбисто-хвилястої лесової рівнини, що охоплює межиріччя Росі-Дніпра-Інгулу-Південного Бугу. Масив цей повністю розміщений у зоні Українського Кристалічного щита, з яким пов'язане панування ландшафтів кальцієвого класу (рисунок 5). Останнім притаманна горизонтальна площинно-змивна міграція геохімічних компонентів на фоні порівняно низького потенціалу екосистем до самоочищення [39].



Авторська розробка на основі бланку мапи «Фізична карта України» [40]

Рис. 4. Фізико-географічна специфіка розташування гідромережі річки Синюхи

Позначення: основні водотоки гідромережі Синюхи виділені блакитним кольором



Авторська розробка на основі бланку мапи

«Стратиграфія Українського Кристалічного щита» [41]

Рис. 5. Тектонічна структура зони Нижнього Побужжя та водозбору річки Синюха

Позначення: басейн річки Синюхи окреслений овалом блакитного кольору

Досліджувана упродовж останніх 3-х років нижня ділянка річки Синюхи знаходиться в межах Миколаївської області, її довжина 18,58 км і розташована вниз від адміністративної межі Кіровоградської/Миколаївської областей. Середній уклон від цього місця до устя в Первомайську – 0,4‰, середній виважений уклон від найдальшої точки (витік Гірського Тікичу) до устя – 0,53‰, коефіцієнт звивистості річки – 1,27. Загальна площа водозбору суто Синюхи – 9520 км², його середня висота досить велика для річкових басейнів Північного Причорномор'я і складає 190,2 м, середня довжина – 124 км, середня ширина – 134 км, коефіцієнт ширини 1,07. Загальна довжина водороздільної лінії – 742 км, коефіцієнт розвитку – 1,62. Водозбір власне Синюхи складає 58,8% від сумарної площі її басейну (16200 км²). Останній займає 25,4% басейнової території Південного Бугу, привносячи йому більше половини загального стоку.

Територія загального басейну охоплює майже всю західну і південну частини Придніпровської Височини, тож середня висота цього водозбору сягає 200 м (середня висота водозбору власне Синюхи – 103 м), довжина від найбільш віддаленої точки до устя – 171 км, висота найбільш віддаленого витіку – 260 м і відповідно середньо-зважений похил – 0,8‰ [27]. Розташований у західно-схиловій частині Південно-Придніпровської Височини великий річковий басейн закономірно асиметричний, витягнутий з північного заходу на південний схід.

Нижня частина басейну і сама річка Синюха розташовані на межі Степу/Лісостепу, з первинним переважанням лісостепових типів ландшафту, проте вже на початок ХХ сторіччя набула суто степових характеристик [42]. Її природні біотопи типологічно тяжіють до степових плакорів на повно- і середньо-профільних чорноземах, які з середини ХІХ сторіччя піддані суцільній польовій трансформації. Нині не ораними лишилися тільки балки та окремі лісові ділянки на основі залишків природних і насаджених широколистяних лісостой.

Сумарна лісовкрита площа водозбору Синюхи (в межах Миколаївської області) станом на середину 70-х років минулого сторіччя складала 6,2% (загальна лісистість всього басейну в ці роки – 5%), сягнувши до 1995 року 7,6% [43]. За звітними даними останніх років (форма 16-зем, 2021) сучасна лісистість досліджуваної, нижньої ділянки басейну складає 4,81% за відсутності природних озер і боліт. Техногенно перетворенні землі (кар'єри тощо) займають майже 4,3%. Вище (на 0,3 км) від міжобласної межі, вже в Кіровоградській області, на околиці села Синюха (за 18,37 км від устя) знаходиться гребля Червонохутірської ГЕС, яка формує руслове водосховище аналогічної назви (рисунок 6).

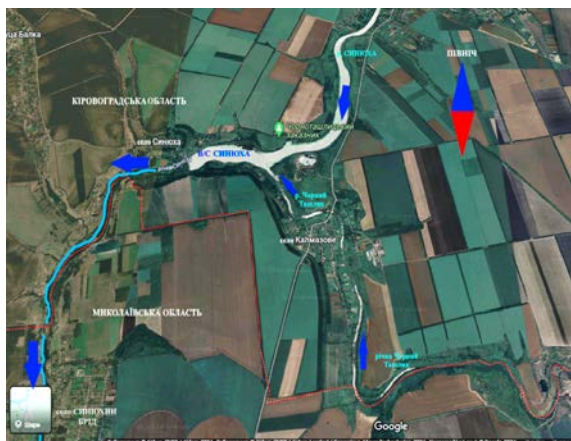


Рис. 6. Червонохутірська ГЕС і водосховище Синюха на межі Миколаївської та Кіровоградської областей
Позначення: блакитними стрілками показані напрямки течії річок Синюха та Чорний Ташлик; червоним пунктиром – межі Миколаївської/Кіровоградської областей
Авторська розробка на основі бланку мапи CNES/TerraMetrics

Водосховище це з лівого берега приймає устя Чорного Ташлику, природне поєднання якого з річкою Синюхою раніше відбувалось у ділянці скельного каньйону з високими берегами, донна частина якого нині (з 1958 року) затоплена.

Кліматичні умови в басейні Синюхи досить відмінні від умов Степової зони і мають більш виражені ознаки помірно-континентального клімату з достатнім рівнем опадів на межі 500 мм/рік. Територія водозбору за класифікацією Кепенна-Гейгера цілком ідентифікуються в межах типологічної групи Dfb [44]. Для нижньої ділянки басейну, частково розташованої у межах Степу, виражене тяжіння до Південно-Степового кліматичного комплексу при зимово-від'ємному кліматичному балансі та жарким літом. Помітний дефіцит зволоження, виражений для цієї місцевості, зумовлений не стільки нестачею опадів (480 мм), як високим рівнем випаровування (800 мм і більше). З останнім пов'язана украй незначна величина місцевого стоку, який практично не враховується при гідрологічних розрахунках водності Синюхи, існуючої за рахунок притоку води з верхніх ділянок збірного басейну.

Нестійкість кліматичних умов осінньо-зимово-весняного періоду зумовлена розташуванням території річкового басейну на осі Воєйкова, відрізняючись частим вторгненням вологих і теплих атлантичних фронтів із заходу. Влітку звичайними є суховії, сумарна тривалість яких перевищує 14 днів. Середня кількість опадів у районі гирла Синюхи складає 496 мм/рік (рисунок 7), мінімальна – 290 мм (1965), максимальна 860 мм (2021), рівень сонячної радіації в останні роки за літнього переважання безхмарного неба коливається від 1823 до 1807 МДж/м² [45].

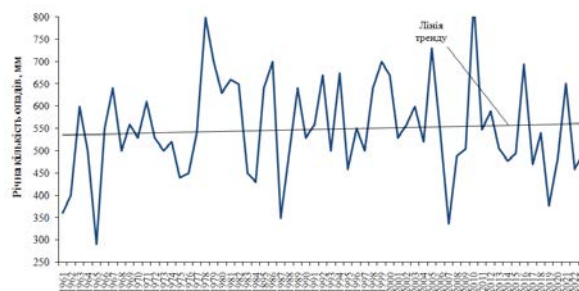


Рис. 7. Динаміка річних сум опадів в районі пониззя р. Синюха на території Миколаївської області за даними метеостанції м. Первомайськ

При відносно м'яких зимах водозбір Синюхи знаходиться в межах формування сталого снігового покриву (товщина 24–32 см), загальна тривалість якого перевищує 46 днів. Наявність снігу попереджає глибоке промерзання ґрунту та підтримує потенціал весняно-стокових паводків за рахунок снігового живлення. При частих відлигах зростають обсяги зимового танення снігів, що спричиняє підвищення зимових рівнів води в річках та загальне зростання частки зимового живлення [46].

Температурний режим місцевостей басейну Синюхи з 1992 року проявляє тенденцію до зростання, особливо за рахунок зимового періоду. Відчутним стали критично-спекотливі літні періоди в супроводі тривалого бездошів'я. Середньорічні температури упродовж 1961–2023 рр. зросли більше ніж на +1,6°C і складають 10,2°C, сягаючи в окремі роки більше +11°C (рисунок 8). Максимальна амплітуда різниці зимово-літніх температур за цей же період складає більше 64°C. Абсолютний максимум температури (+42,2°C) фіксований в середині липня 2024 року, абсолютний мінімум (-32°C) – у січні 1997 року [47].

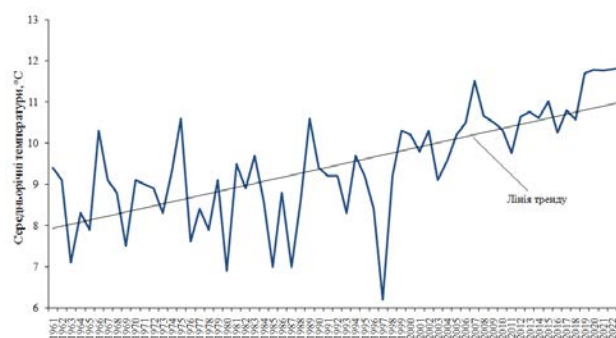


Рис. 8. Динаміка середньорічних температур в районі пониззя р. Синюха на території Миколаївської області за даними метеостанції м. Первомайськ

Геологічна будова басейнової території річки Синюха визначається особливостями геоструктури південного схилу Українського Кристалічного щита. В його основі розташовані кристалічні породи докембрію, перекриті малопотужними відкладами кватеру. Підґрунтя представлено лесовидними суглинками,

тож скельні породи повсюди відриваються ерозійними врізами річок і балок. Тектонічна структура місцевості належить формуванням Кіровоградського мегаблоку і Голованівського синклінорію. Між ним та Вознесенським антиклінорієм присутня Первомайська підкидо-надвигова зона розломів, в одному з яких і розташована долина річки Синюха.

Водозбори притоків, стік яких уніфікується річкою Синюхою, розташовані в місцевостях, що мають схожий рельєф і геоморфологічну будову. Останні сформовані поверхневою морфоскульптурою Українського кристалічного щита [48, 49]. Долинні схили і тальвеги водотоків відкривають верхні кристалічні породи, які належать скельним формаціям Східно-Європейської платформи. Території за межами річкових долин і понижень рельєфу вкриті тонким шаром четвертинних відкладів, серед яких основне значення мають лесові формування часів пізнього Вюрму. З лесами і рештками кори вивітрювання пов'язана морфологія підгрунтя, перекритого дерновими чорноземами на лесовій основі [50]. Вони типологічно тяжіють до лісостепових форм істинних чорноземів із глибоким, текстурно недиференційованим профілем та нейтральним рН.

Поверхня басейну має виражений горбисто-балковий характер із пересічними висотами на межі 187–109 м, середня густина розвитку річкової мережі складає 0,37 км/км². Через лесову природу підгрунтя, піддана оранці поверхня водозбору нині помітно еродована і щільно покряна яружно-балковими деструкціями. Їх густина в нижній частині басейну сягає 0,75–1,0 км/км², що перевищує навіть показники сучасної еродованості лесових плакорів межиріччя Великого Куяльника/Тилігулу [51, 52].

Гідрогеологічна характеристика нижньої ділянки водозбору Синюхи повністю визначена структурними закономірностями зони тріщинних вод Українського кристалічного щита. Глибина залягання підземних вод прямо залежна від висот поверхні кристалічного фундаменту, глибини розташування його розломів і пересічних висот місцевості. Основна частина підземних вод цієї місцевості зосереджена в тріщинних утвореннях скельного фундаменту нижнього протерозою і частково в корі вивітрювання та пористих відкладах кайнозою. Підземні горизонти дреноються долиною річки Синюха та її притоковими балками, інфільтрація поверхневих вод із яких забезпечує поповнення первинно обмежених запасів тріщинних вод. Через це підземні води нижньої частини водозбору проявляють підвищену чутливість до агрогенних і комунальних забруднень поверхневого стоку.

Тріщинні води практично безнапорні, дебіт свердловин досить обмежений і при інтенсивному водоспоживанні виникає загроза швидкого підтягування більш мінералізованих (4–5 тис. мг/л) глибше розташованих вод. Гідрохімічно підземні води належать гідрокарбонатному класу з підвищеним вмістом сульфатів, відрізняючись при цьому просторовою

нерівномірністю показників мінералізації – від 0,8 тис. мг/л до 5,5 тис. мг/л [53]. Явно, що гідрохімічний склад підземних вод саме кінцевої частини Правобережжя Синюхи в значній мірі знаходиться під впливом гідросистеми річки Чорний Ташлик, поверхневі та підземні води якого містять майже вдвічі більше сольових компонентів.

Обмежений дебіт свердловин (0,1–1,1 л/сек) та порівняно висока мінералізація (0,9–1,6–2,3 тис. мг/л) підземних вод суттєво обмежують потенціал питного водозабезпечення за рахунок їх видобутку, спричиняючи необхідність посиленого використання річкової води. Так, місто Первомайськ із населенням майже 70 тисяч осіб покриває питні потреби за рахунок водозаборів на річках Південний Буг і Синюха. Середні обсяги відбору води з річки Синюхи на питному водозаборі міста Первомайська в 2021–2024 дещо менші, ніж в минулі роки [54] і оцінені в 2,5 млн.м³/рік, що складає трохи більше 6% від її загального стоку у маловодні роки.

Ґрунти нижньої ділянки водозбору Синюхи, знаходячись на межі Лісостепу/Степу, досить неоднорідні, проте мають суто голоценовий вік і сформовані на суберальних формаціях лесових рівнин. Фоновими є пилувато-важко-суглинисті чорноземи, тоді як у верхній частині басейну переважають пилувато-середньо-суглинисті чорноземи на лесовій основі (рисунок 9).

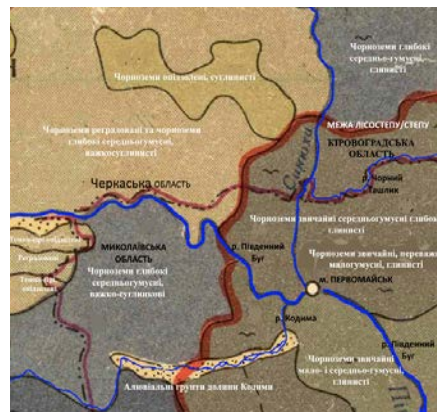


Рис. 9. Типологічна структура ґрунтів досліджуваної території
 Позначення: блакитним кольором виділені русла річок Синюхи, Чорного Ташлику, Південного Бугу та Кодими; широкою червоною лінією показана межа Степу/Лісостепу; назви типологічно різних ґрунтів позначені текстовими надписами.
 Авторська розробка на основі фрагменту Карти ґрунтів України [55]

Типологічно це потужні та звичайні середньо-гумусні (4–5%) чорноземи з первинною товщею пласту до 1,3 м (на плакорах), сформовані на лесових породах у межах поширення різотравно-злакових комплексів на основі різотравно-ковилово-костричевої рослинності [55, 56]. Ґрунти річкової долини ще більш локально-мозаїчні, відрізняючись підґрунтовими алювіально-де-

лювіальними фракціями та високою частотою пере-відкладень. Їх нинішній стан відрізняє значний рівень розмитості, яка зростає вгору по схилам. Проте, досить інтенсивний процес підняття (2–3 мм/рік) Південно-Придніпровської Височини випереджає процеси акумуляції змитих ґрунтів у річкових долинах місцевої гідромережі, тальвеги яких загалом вільні від суттєвих накопичень. Відповідно, спроби побудови крупних руслових водосховищ призведуть до глибокого порушення процесів винесення твердого та колоїдного стоку і призведуть до швидкого замулення штучних водойм і руйнації природного стану річкової гідроекосистеми.

За останні 150 років польової експлуатації більшість орних ґрунтів у басейні Синюхи піддавались інтенсивній ерозійній деструкції, що призвело до суттєвого зменшення поверхневого стоку та ґрунтових запасів вологи [57, 58, 59]. На схилових полях лесових терас, значно покращених ярами, внаслідок змивних втрат гумусного шару стали переважати суглинкові, помітно розмиті чорноземні мало-профільні ґрунти, місцями візуально більш схожі на каштанові мало-гумусні ґрунти прибережних районів. У заплаві Синюхи переважають супіщані, суглинкові та намулові ділянки, які містять прориви скельних порід, окремі кам'яні брили і щебеністі фракції алювіально-делювіального походження.

Долина Синюхи в нижній ділянці морфологічно досить одноманітна, V-подібного профілю, без розвинутої заплави, чітко спрямована на південь, не формує меандрів, вузьких каньйонів і плавневих ділянок, не містить гребель. Уздовж схилів простежуються дві тераси – невисока і вузька нижня (заплавна) та верхня, добре розвинена, широка (60–90 м) і відносно висока (4–5 м). Загальна ширина долини на рівні 4-ї тераси складає 1,5–1,7 км, найбільша ширина в передгірловій частині 2,6 км, ширина долини за вищими пересіченими висотами поперечного перерізу коливається від 2,3 до 3,4 км (рисунки 10).

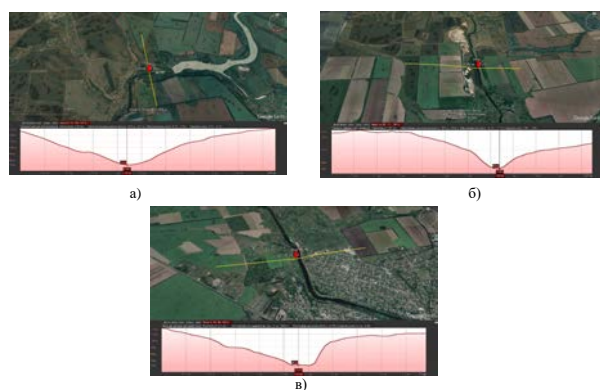


Рис. 10. Поперечний профіль долини Синюхи та заглиблення тальвегу: а – нижче греблі Червонохутірської ГЕС; б – в районі села Синюхин Брід; в – на північній околиці міста Первомайська Авторська розробка на основі операційної системи Cooogle Erth Pro

Відповідне рівням найвищої тераси, заглиблення тальвегу коливається від 32 до 41 м, сягаючи 87 м лише в районі гирла Чорного Ташлику (розташованого вже в ділянці річки, належної Кіровоградській області). Уздовж схилів і в зоні тальвегу постійно присутні обривисті відслонення скельних порід, хоча місцями є й похилі ділянки. За останніми поля підходять майже до урізу води. Правий берег між Первомайськом і селом Болеславчик підданий техногенній трансформації внаслідок відкритої розробки залізо-рудних родовищ.

Заплава річки вузька (76–90 м), за межами обривистих берегів частіше двостороння, переважно суха і за типом покриття укр. мозаїчна при обмеженій присутності суто лучних ділянок, які заміщаються широколистяними чагарниками і деревами. Судячи за ретроспективними даними [27], заплава практично щорічно піддавалась затопленню весняним половоддям. Весняні розливи в 2015–2024 рр. загалом незначні і за межі заплави не виходили, останній крупний розлив фіксований у березні 2012 року. Літньо-дощові паводки зазвичай лише частково охоплювали краї заплави. Впродовж останніх років лише влітку 2021 року мали місце суттєві літньо-паводкові розливи.

Русло Синюхи в нижній ділянці течії порівняно прямолінійне, хоча й містить окремі вигини з радіусом кривизни до 0,6–0,7 км і довжиною до 1 км, формуючи окремі ділянки прибережного накопичення алювію, іноді у вигляді витягнутих за течією дрібних островів. За наявності перекатів, піщаних і скелястих островів русло побіля них утворює декілька рукавів, які відрізняє наявність пришвидшеної до 0,6–2,0 м/сек течії. Вниз по руслу пришвидшена течія швидко спадає до рівня 0,2–0,3 м/сек (0,5 м/сек при паводках).

За шириною в нижній ділянці річки русло досить рівномірне, утримуючи її в межах 35–40 м, лише тричі звужуючись до 20 м та іноді розширюючись до 50 м. Кам'янистий характер тальвегу утримується на всій ділянці нижньої течії, проте місцями дно вкрите піщаним та намуловим відкладенням. Глибина річки утримується від 1,8 до 2,3 м, зменшуючись на перекатах до 0,3–0,5 м. Описані в довідниках 60-х років ділянки річки з глибиною в 4 м і більше (на плесах) давно замулені. Через зарегульованість стоку і втрату природної швидкості течії русло в пониззі Синюхи поступово піддається заростанню, особливо вираженому уздовж мілководних ділянок берегів.

Термінальний відрізок русла від села Синюхин Брід і до устя (4,5 км) більшу частину року знаходиться під впливом підпору вод Південного Бугу, долаючи його лише при паводках. Влітку посушливого 2020 року, коли через загрозу втрати запасів питної води був перекритий стік Південного Бугу, його зневоднене русло вниз від греблі Первомайської ГЕС через втрату підпору спричинило й посиленний стік і спад рівня Синюхи. В свою чергу це

зумовило вимушену призупинку течії через греблю Червонохутірської ГЕС, розташованої на межі Миколаївської/Кіровоградської областей.

Порівняльний аналіз даних про рівні води річки Синюха в пониззі за останні роки (2013–2023) свідчить про відсутність прояву трендових змін, однак, повільне їх зменшення з 2018 року. В середньорічних показниках усередненого рівня води за роками простежуються коливання в межах ± 20 см (від 107 до 122 см) та повільний спад у 2018–2023 рр. на -14 см, вказуючи на тенденцію зменшення водності.

Основним джерелом живлення річки є талі снігові води; ґрунтове живлення річки незначне, у зв'язку з чим спостерігається сильне падіння стоку в літньо-осінній період. Рівневий режим р. Синюха характеризується ясно вираженою весняною повінню, яка часто проходить двома або кількома піками, та низькою, стійкою і тривалою меженню, яка в окремі роки порушується короткочасними і нетривалими дощовими паводками.

Через зменшення, а іноді й відсутність потужних літньо-дощових паводків зимові рівні води зрівнялись із літніми рівнями (усередненими) і навіть перевищують їх. Безперечно, що на сезонні рівні води саме в пониззі суттєвий вплив також спричиняє зарегульованість стоку річки греблями декількох руслових водосховищ.

Таким чином, по мірі розвитку кліматичних коливань останнього десятиріччя та зростання середньорічних температур, сезонна динаміка рівнів води в пониззі Синюхи втрачає типовий характер.

Простежена динаміка середньорічних показників витрат води річки Синюха у створі гідропосту Синюхин Брід свідчить про наявність акцентованої тенденції до зменшення стоку впродовж останніх років.

Головними їх причинами стало зменшення весняного стоку за рахунок обмеження снігового живлення та часткова елімінація потенціалу поверхневого стоку в умовах майже суцільної оранки водозбірних площ.

Закономірних змін набув і сезонний характер витрат води, що демонструє збереження пікових витрат води під час весняного водопілля та різкого спаду межених витрат, негативний пік яких припадає на серпень-початок вересня. Виявлені виражені коливання стоку прямо пов'язані з метеокліматич-

ною ситуацією в басейні гідромережі, поєднаної річкою Синюхою.

На фоні дії потужних природно-кліматичних факторів антропогенний вплив на стан річки та її гідрологічний режим має другорядне значення, що є рідкісним явищем для сучасних степових річок взагалі.

Висновки. Узагальнюючи результати трирічних досліджень та їх аналіз, закономірно сформулювати наступні висновки:

1. Динаміка водності річки Синюха формується під впливом комплексу фізико-географічних факторів і в першу чергу залежить від кліматичних та гідрологічних умов.

2. На теперішній час водність знаходиться в тривалій маловодній фазі, яка розпочалася з 2007 року та триває вже 17-й рік. Сучасна маловодна фаза є більш стійкою та глибшою за попередні, що може бути пов'язано зі змінами клімату.

3. В умовах кліматичної нестабільності останніх років, на фоні підвищення температури середовища і потужної агрогенної трансформації водозбору, відбулось значне, більш ніж двократне зменшення витрат води ($Q_{\text{ср}}$), середньорічний показник якого в 2013–2023 рр. демонструє спад із 18 до 8 м³/сек, що спричинило низку негативних реакцій річкової гідросистеми та пов'язаних із нею природних об'єктів.

4. Річка Синюха в своєму пониззі зберігає ціло річну проточність, що суттєво впливає на сезонно сталий гідрохімічний склад води та органічнопластичні властивості.

5. Головними причинами, які можуть привести до погіршення якості води, є водно-міграційне забруднення річкових вод неорганічними сполуками азоту і фосфору, привнесених із полів і населених пунктів.

6. Безперечний факт зменшення стоку річки Синюхи на фоні зростаючої загрози водного забруднення неорганічними сполуками азоту і фосфору, привнесеними із полів і населених пунктів, вказує на критичний стан басейнової гідромережі, яка піддається сумісно-потужному впливу природних і антропогенних деструкцій.

Подяки. Автор щиро дякує працівникам Регіонального офісу водних ресурсів у Миколаївській області за консультації, допомогу в проведенні польових і лабораторних досліджень та поради в редакції статті.

Література

1. World water assessment programme. UN World Water Development Report 2022. URL: <https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2022/>
2. National systems to support drinking-water, sanitation and hygiene: global status report 2019. UN-water global analysis and assessment of sanitation and drinking-water (GLAAS) 2019 report. Geneva: World Health Organization; 2019. URL: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/326444/9789241516297-eng.pdf?ua=1>, accessed 24 June 2020.
3. Glantz M. H.. Water security in the changing world. Bulletin WHO. Vol. 67 (1). 2018. URL: <https://public.wmo.int/ru/resources/bulletin>
4. Сгорова Т.М. Екологічна геохімія агроландшафтів України: монографія / за ред. О.І. Фурдичка. Київ: ТОВ «ДІА», 2018. 264 с.
5. Доценко А. І. Сільське розселення в Україні: динаміка та структура. К.: РВПС України НАН України, вид-во «Фенікс», 2010. 288 с.

6. Екологічна ситуація та стан питних вод України: Тематична карта. Укл. Хамула О. *Всеукраїнської екологічної ліги*: веб-сайт. URL: <https://www.calameo.com/books/0007330361c5d3ff2b1d9>
7. Адаменко О., Ковальчук І., Рудько Г. Екологічна геоморфологія. ІФ: Факел, 2000. 411 с.
8. Совгіра С. В., Гончаренко Г. Є., Душечкіна Н. Ю. Технології оздоровлення та оптимізації стану ландшафтних комплексів малих річок Центрального Побужжя : монографія. Умань : Сочінський М. М., 2016. 248 с.
9. Магась Н. І., Жадан Н.М., Туз Р.В. Визначення екологічно стійких та прийнятних рішень для забезпечення якісного водопостачання м. Миколаїв. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2024. Вип. 2 (53). С. 254-265.
10. Магась Н. І., Трохименко Г.Г. Оцінка сучасного антропогенного навантаження на басейн річки Південний Буг. *Науковий журнал «Екологічна безпека»*: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. Кременчук: КрНУ, 2013. – Випуск 2/2013 (16). – С. 48-52.
11. Щербак В. І. Гідроекологічні аспекти вирішення проблеми оцінки та зменшення загроз біорізноманіттю континентальних водойм України. Київ: Хімджест, 2003. 273 с.
12. Люта Н.Г. Сучасний стан і перспективи використання підземних вод водоносного горизонту тріщинуватої зони кристалічних порід (гідрологічна область Українського Щита). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія Геологія*. 2023. Том 2. № 101. С. 111-116.
13. Екологічний паспорт Миколаївської області. *Управління екології та природних ресурсів Миколаївської облдержадміністрації*: веб-сайт. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/store/files/2021%20%D1%80%D1%96%D0%BA.pdf>
14. Екологічні паспорти регіонів за 2019 рік. Кіровоградська область. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*: веб-сайт. URL: https://mepr.gov.ua/files/docs/eeco_passport/2019.pdf
15. Сніжко С., Шевченко О., Дідовець Ю. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України (повний звіт за результатами проекту). Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2021, 68 с. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz-vplyvu-vodni-resursy-full.pdf>
16. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text>
17. Водний кодекс України від 06.06.1995 р. № 213/95-ВР. Чинна редакція від 20.03.2023. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/z950213?an=1>
18. Про затвердження обласної Програми «Питна вода Миколаївщини» на 2021-2025 роки: Рішення Миколаївської обласної ради від 29.09.2021 № 4. URL: <https://www.mk-oblrada.gov.ua/UserFiles/decreec/1633434255615c3a8f16115.pdf>
19. Боплан Г.Л. Опис України, кількох провінцій Королівства Польського, разом з їхніми звичаями, способом життя і ведення воєн. Київ. Наукова думка, 1990. 256 с.
20. Лучик В. Тюркізми в гідронімії Середнього Дніпро-Бузького Межиріччя. *Мовознавство*. 1996. № 2. С. 6-8.
21. Яворницький Д. Історія запорозьких козаків. К.: Наукова думка, 1990. – Т. 1. – 577 с.
22. Архів Коша Нової Запорозької Січі: корпус документів 1734–1775 : у 8 т. / гол. ред.: Сохань П. С. К.: Держкомархів України, 2000. Т.2. 750 с.
23. Хільчевський В.К. Сучасна характеристика поверхневих водних об'єктів України: водотоки та водойми. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. №1(59). С. 17-27.
24. Хільчевський В.К., Чунар'єв О.В., Ромась М.І. Водогосподарська обстановка в басейні р. Південний Буг та вплив на неї Південно-Українського енергокомплексу. *Меліорація і водне господарство*. 2006. № 93-94. С. 63-69
25. Малі річки України: Довідник / А.В. Яцик, Л.Б. Бишовець, Є.О. Богатов та ін.; за ред. А. В. Яцика. К.: Урожай, 1991. 296 с.
26. Вишневський В. І. Річки і водойми України. Стан і використання. Київ, 2000. 376 с.
27. Вишневський В.І., Куций А.В. Багаторічні зміни водного режиму річок України. Київ.: Наукова думка, 2022. 252 с.
28. Ухань О.О. Особливості просторово-часового розподілу головних іонів, органічних речовин та біогенних елементів за течією р. Південний Буг. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2016. №.1-2 (25). С.20-30.
29. Ухань О.О., Осадчий В.І., Набиванець Ю.Б., Осадча Н.М., Глотка Д.В. Типізація поверхневих вод басейну Південного Бугу за вмістом головних іонів, біогенних елементів, органічних речовин та розчиненого кисню. *Наукові праці УкрНДДГМІ*. 2015. Вип. 267. С. 46–56.
30. Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу / Хільчевський В.К., Чунар'єв О.В. та ін.; за ред. В.К. Хільчевського. К.: Ніка-Центр, 2009. 184 с
31. Байцар А. Л. Географія та картографія українських історико-географічних земель (XII ст. – поч. XX ст.). Львів-Винники, 2023. 295 с.
32. Рельєф України. / Вахрушев Б.О. та ін.; за ред. В.В. Стецюка. Київ, 2010. 688 с.
33. Агрокліматичний довідник по Миколаївській області (1986-2005 рр.) / Миколаїв. обл. центр з гідрометеорології ; за ред. Дуранік Л.М. та Адаменко Т. І. Одеса : Астропринт, 2011. 190 с.
34. Гродзинський Д.М. Біогеографічні аспекти рослинного і тваринного світу України. *Київський географічний щорічник*. Випуск 1. 2002. С.7-31.
35. Марисова І. В. Біогеографія. Регіональний аспект. Вид. 2-е, переробл. і допов. Суми: Університетська книга, 2018. 128 с.
36. Грачев А. Атлас річок України. *Природа України* : веб-сайт. URL: <https://river.land.kiev.ua/southern-bug.html>
37. Маринич О.М., Шищенко П.Г. Фізична географія України : підручник. Вид. 2-ге, переробл. і допов. К.: Знання, 2005. 510 с.
38. Про виділення суббасейнів та водогосподарських ділянок у межах встановлених районів річкових басейнів : Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України № 25 від 26.01.2017 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0208-17#Text>
39. Кузьміна В.А. Ландшафтна екологія : конспект лекцій. Одеса: ОДЕКУ, 2017. 105 с.
40. Фізична карта України. *Всі карти України*: веб-сайт. URL: http://www.ua-maps.com/images/ukraine/maps/ukraine_physical_map_full.jpg

41. Щербак Д. В., Огар В. В. Стратиграфія Українського щита та його схилів. К.: ВПЦ Київського університету, 2005. 85 с.
42. Голобородько С.П., Димов О.М. Глобальна зміна клімату: причини виникнення та наслідки для сільськогосподарського виробництва Південного Степу. *Меліорація і водне господарство*. 2019. № 1. С. 88-98.
43. Статистична звітність з кількісного обліку земель. *Головне управління статистики у Миколаївській області* : веб-сайт. URL: <https://www.mk.ukrstat.gov.ua/>
44. Kottek M. et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*. 2006. № 15. P.259-263. URL: 10.1127/0941-2948/2006/0130
45. Ромащенко М. та ін. Вплив сучасних кліматичних змін на водні ресурси та сільськогосподарське виробництво. *Меліорація і водне господарство*. 2020. № 1. С. 5–22.
46. Ель Хадрі Ю., Берлінський М.А., Сліже М.О. Сучасні кліматичні зміни в Чорноморському регіоні. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна*. 2021. № 25. с. 8-19. URL: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-01>
47. Доніч О.А. Кліматичні особливості 2020 року. *Праці Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського*. Під ред. А.В. Куцого. 2021. Вип.17 (31). С.4-10.
48. Огар В.В. Регіональна геологія. Київ: Інститут геології, 2017. 73 с.
49. Палієнко В.П., Барщевський М.Є, Бортник С.Ю. Загальне геоморфологічне районування території України. *Український географічний журнал*. 2004. Випуск 1. С. 3-11.
50. Рудько Г.І., Шнюков Е.Ф., Шестопапов В.Л., Яковлев Е.А. Екологічна геологія України. Київ: Наукова думка, 1993. 407 с.
51. Регіональна доповідь про стан навколишнього середовища у Миколаївській області. *Управління екології та природних ресурсів Миколаївської облдержадміністрації*: веб-сайт. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/ecoreports/regionalreport/>
52. Маринич О.М., Шищенко П.Г. Фізична географія України : підручник. Вид. 2-ге, переробл. і допов. К.: Знання, 2005. 510 с.
53. Стан підземних вод України, щорічник. Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2019. 131 с. URL: http://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2019/07/schorichnykstanpv2018_1.pdf
54. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Кіровоградської області у 2021 році. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*: веб-сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Regionalnadopovid-Kirovogradska-ODA-2021.pdf>
55. Карта ґрунтів Української РСР. Укр. НДІ ґрунтознавства ім. О. Н. Соколовського / голов. ред. М. К. Крупський. Київ : Ін-т «Укрземпроект», 1968. 156 к.
56. Кравченко К. М., Кравченко О. В. Сучасний стан ґрунтів Миколаївської області. *Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили*. 2012. Т. 179, Вип. 167. С. 20-23.
57. Чорний С.Г. Оцінка якості ґрунтів: навчальний посібник. Миколаїв: МНАУ, 2018. 233 с
58. Картограми якісного стану ґрунтів України. *Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України»* : веб-сайт. URL:<http://www.iogu.gov.ua/pasportizaciya/karty-po-vmistu-pozhyvnyh-rechovyn-rn-humus-fosfor-kalij/>
59. Наукові дослідження з моніторингу та обстеження сільськогосподарських угідь України. Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України», Київ. 2023. 74 с.

ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ

УДК 57.044

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.11>

МЕТОДИЧНІ ЗАСАДИ ОЧИЩЕННЯ ЗАБРУДНЕНИХ ДІЛЯНОК ВІД СТІЙКИХ ОРГАНІЧНИХ ЗАБРУДНИКІВ

Бондар О.І.¹, Риженко Н.О.¹, Четвериков В.В.²

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

²Інститут газу Національної академії наук України
вул. Дегтярівська, 39, 03113, м. Київ
alsko2011@ukr.net, chvvingas@gmail.com

Розглянуті особливості очищення територій, забруднених стійкими органічними забруднювачами (СОЗ). СОЗ – це група небезпечних для здоров'я та довкілля речовин, які мають властивість накопичуватися у живих організмах і переноситися на значні відстані повітрям, водою та живими істотами. Відновлення забруднених СОЗ територій є важливим завданням для забезпечення екологічної безпеки та здоров'я населення. розглядаються різні методи очищення та рекультивациі ґрунтів і ґрунтових вод від СОЗ, зокрема фізико-хімічні, термічні, біологічні методи та фітореMediaція. Оцінюються переваги та недоліки кожного методу з огляду на екологічні, технічні та економічні аспекти, а також вказуються критерії вибору найефективнішого методу очищення для конкретного об'єкта.

Окреслені різні методи очищення та рекультивациі ґрунтів та ґрунтових вод від СОЗ, зокрема фізико-хімічні, термічні, біологічні методи та фітореMediaція. Оцінюються переваги та недоліки кожного методу з огляду на екологічні, технічні та економічні аспекти, а також вказуються критерії вибору найкращого методу очищення для конкретного об'єкта.

Зазначено, що кожен об'єкт, забруднений СОЗ, має свої специфічні характеристики і тому потребує управління з урахуванням походження забруднення. Об'єкт, забруднений СОЗ, може мати одну або кілька специфічних ознак: місця накопичення СОЗ-вмісних пестицидів; споруди, забруднені СОЗ, зокрема ті, де вироблялись СОЗ-вмісні пестициди; захоронення СОЗ-вмісних відходів, зокрема, тари від пестицидів; місця аварійного витоку рідких СОЗ, наприклад, олив на базі ПХД; ґрунтові води та донні відкладення, забруднені СОЗ, в результаті міграції забруднювачів в навколишньому середовищі.

Наголошено на систематичному підході до моніторингу стану забруднених об'єктів та контролю ефективності застосовуваних заходів. Наведені рекомендації щодо забезпечення довгострокового спостереження та підтримки ефективності відновлення забруднених ділянок, а також розглядає процеси попередньої оцінки ризиків, детального обстеження та вибору відповідних технологій відновлення. *Ключові слова:* технології відновлення, оцінка ризиків, фітореMediaція, відходи.

Methodical principles for cleaning contaminated sites from persistent organic pollutants. Bondar O., Ryhenko N., Chetverykov V.

The article is dedicated to the issues of cleaning territories contaminated with persistent organic pollutants (POPs). POPs are a group of substances hazardous to health and the environment, which have the property of accumulating in living organisms and being transported over long distances by air, water, and living creatures. The restoration of territories contaminated with POPs is a crucial task for ensuring environmental safety and public health.

The article examines various methods of cleaning and reclaiming soils and groundwater contaminated with POPs, including physico-chemical, thermal, biological methods, and phytoremediation. The advantages and disadvantages of each method are assessed in terms of environmental, technical, and economic aspects, and the criteria for selecting the best cleaning method for a particular site are outlined.

It is noted that each object contaminated with POPs has its own specific characteristics and therefore requires management taking into account the origin of the contamination. An object contaminated with POPs may have one or more specific characteristics: POPs-containing pesticide stockpiles; POPs-contaminated buildings, including those where POPs-containing pesticides were produced; POPs-containing waste disposal, including pesticide containers; accidental release of liquid POPs, such as PCB-based oils; groundwater and sediments contaminated with POPs as a result of pollutant migration in the environment.

Translated with DeepL.com (free version) Special attention is given to a systematic approach to monitoring the state of contaminated sites and controlling the effectiveness of applied measures. The article also provides recommendations for ensuring long-term observation and maintaining the efficiency of the restoration of contaminated areas, as well as considering the processes of preliminary risk assessment, detailed survey, and selection of appropriate remediation technologies. *Key words:* recovery technologies, risk assessment, phytoremediation, waste.

Постановка проблеми. Проблема забруднення ґрунтів небезпечними речовинами в Україні стоїть надзвичайно гостро вже декілька десятиріч. За відсутності промислових потужностей для екологічно ефективного знешкодження небезпечних відходів

вони складувались на полігонах підприємств. Умови зберігання відходів на цих полігонах не виключають розповсюдження токсичних компонентів в навколишньому середовищі. Після ліквідації накопичених на складах та полігонах відходів прилеглі до них

території залишаються неочищеними. Невирішеною проблемою на сьогодні залишається полігон відходів гексахлорбензолу біля міста Калущ, який так і не був рекультивованим після вивезення відходів. Аналогічна ситуація з місцями накопичення непридатних до використання хімічних засобів захисту рослин. Після вивезення їх на знешкодження прилегла до складів територія не очищувалася. Промислові об'єкти, зруйновані в результаті бойових дій, можуть бути суттєвим джерелом забруднення ґрунтів поліхлорованими дифенілами (ПХД).

Стійкі органічні забруднювачі (СОЗ, англ. *Persistent organic pollutants*) є ліпофільними за своєю природою і можуть легко проникати через біологічні мембрани та накопичуватися в жирових тканинах¹. Вони можуть транспортуватися повітрям, водою або мігруючими видами через національні кордони, досягаючи регіонів, де вони ніколи не вироблялися та не використовувалися². Одним із ключових практичних завдань управління СОЗ є забезпечення безпечного поводження із запасами таких речовин та очищення забруднених територій.

Узагальнення досвіду відновлення ділянок забруднених СОЗ, висвітлено у Настановах з найефективніших наявних методів та передових екологічних практик управління територіями, забрудненими стійкими органічними забруднювачами³.

Пріоритети в очищенні забруднених ділянок мають визначатися з урахуванням ступеню ризиків їх впливу на людину, для екосистеми та ризиків міграції. Для оцінки ризиків, планування та здійснення відновлення ділянок Настанови пропонують наступну черговість дій: етап 1. Попереднє обстеження об'єкта; етап 2. Детальне обстеження об'єкта; етап 3. Розробка концепції та плану відновлення об'єкта; етап 4. Реалізація заходів з відновлення об'єкта; етап 5. Моніторинг стану об'єкта та подальший догляд.

Етап 1 Попереднє обстеження об'єкта. Заходи, які необхідно здійснити на попередньо визначених потенційно забруднених СОЗ ділянках, включають:

– Узагальнення даних з інвентаризації СОЗ, виконаних у відповідності до Національного плану дії до Стокгольмської конвенції; аналіз статистичних даних та регіональних звітів про стан навколишнього середовища;

– Відвідування об'єкта з опитуванням поінформованих осіб;

– Виявлення потенційних джерел забруднення, можливих шляхів міграції забруднювачів «джерело-рецептор»;

– Розроблення початкової концептуальної моделі об'єкта ICSM (Initial Conceptual Site Model) із зазначенням потенційних джерел забруднення, можливих шляхів міграції та потенційних рецепторів. ICSM є вихідною інформацією для оцінки ризиків першого рівня;

– Проведення попередньої оцінки ризиків та вирішення питання щодо застосування детальних досліджень.

Етап 2 Детальне обстеження об'єкта. Для вибраних об'єктів високого ризику, визначених на першому етапі, проводяться наступні заходи:

– Проведення аналізу моделі з метою виявлення прогалин, зокрема, визначення необхідності дослідження супутніх забруднювачів;

– Розроблення плану обстеження об'єкта;

– Проведення польових робіт відповідно до плану обстеження об'єкту;

– Оновлення ICSM до CSM;

– Проведення оцінки ризиків другого або третього рівня.

У разі підтвердження наявності джерел забруднювачів та шляхів їх розповсюдження вони наносяться на карту у вертикальному та горизонтальному напрямках. На основі результатів картографії створюється покращена концептуальна модель об'єкта.

Етап 3 Розроблення концепції та плану відновлення об'єкта. Для створення концепції та плану відновлення об'єкта виконуються наступні дії:

– Вибір методів та технологій відновлення по кожному компоненту забруднення об'єкту;

– Розроблення концепції відновлення об'єкту, що описує можливі заходи з відновлення для всіх компонентів об'єкта;

– Співставлення та вибір найкращого варіанта відновлювальних заходів;

– Розроблення попереднього плану управління об'єктом або плану відновлення об'єкта за допомогою найкращого варіанта відновлення.

Етап 4 Реалізація заходів з відновлення об'єкта. Заходи щодо відновлення об'єктів поділяються на заходи:

– Усунення прямих екологічних ризиків у короткостроковій перспективі;

– Зниження та усунення потенційних екологічних ризиків у середньостроковій перспективі;

– Стимування та моніторингу прихованих екологічних ризиків у довгостроковій перспективі.

Базові заходи наведені на рисунку 1.

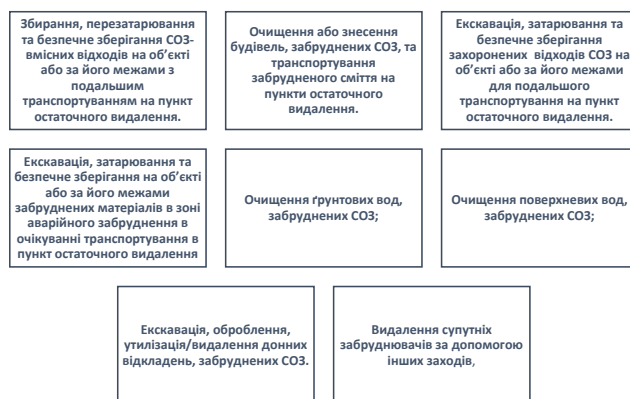


Рис. 1. Базові заходи для очищення забруднених ділянок від СОЗ

Етап 5 Моніторинг об'єкта та подальший догляд. Повністю усунути всі екологічні ризики від забрудненої ділянки часто унеможлиблюється зважаючи на технічні та фінансові обмеження. Також можуть бути невиявлені всі джерела забруднення, що може з часом призвести до погіршення стану об'єкта. Допоки ризики не будуть остаточно усунені необхідно стежити за станом об'єктів. Для цього має здійснюватися моніторинг ґрунтових вод та оновлюватися концептуальну модель об'єкта за результатами моніторингу. Терміни моніторингу та подальшого догляду за ділянкою залежать від кількох характеристик об'єкта, зокрема – властивості забруднююча, гідрогеологічні умови, методів відновлення.

Коли результати моніторингу підтвердять, що ризики усунуті, останній етап можна вважати закритим. Кінцевим результатом всього процесу є звіт про моніторинг та оновлена концептуальна модель об'єкта.

Мета наукової праці – визначення та розробка рекомендацій щодо оптимальної методології очищення територій, забруднених СОЗ.

Методологія визначення найефективнішого варіанту відновлення забрудненого місця передбачає такі критерії:

- Технічні: продуктивність очищення; можливість обробки фракцій ґрунту широкого спектру; можливість встановлення цієї технології в технологічну лінію для обробки широкого спектру забруднювачів, наприклад, інших хлорованих компонентів та важких металів; необхідне обслуговування; аспекти гігієни праці; експлуатаційні ризики та мобільність установки.

- Екологічні: Ефективність деструкції/імобілізації; утворення побічних продуктів; викиди; безпека працівників та населення.

- Економічні: Вартість обробки; капітальні витрати/амортизація установки; непрямі витрати, зокрема, на перезатарювання, попередню обробку, транспортні затрати, а також на безпечне поводження із залишками.

Короткострокові заходи. Якщо населення знаходиться під безпосереднім впливом забруднюючих речовин, то перші короткострокові заходи мають мінімізувати цей вплив, а потім зосередитися на видаленні джерела.

Екстреними заходами щодо мінімізації ризиків впливу є запобігання фізичному контакту рецепторів із забруднювальними речовинами шляхом:

- Закриття сховищ із небезпечними речовинами;
- Закриття забруднених будівель та об'єктів інфраструктури;
- Огородження зони джерела /забрудненої території та встановлення попереджувальних знаків;
- Тимчасова ізоляція забруднених поверхонь;
- Обмеження або заборона використання ґрунтових вод.

Іншими короткостроковими заходами щодо видалення відомих джерел забруднення та/або запобі-

гання подальшої (за межі -майданчика) міграції забруднювачів є:

- Видалення, перезатарювання, транспортування та знищення СОЗ/небезпечних відходів;
- Очищення, знесення забруднених будівель, транспортування та обробка /захоронення відходів;
- Екскавація та обробка сильно забрудненого ґрунту;
- Тимчасове зберігання забрудненого ґрунту та/або ґрунтових вод.

Середньострокові заходи. Середньострокові заходи спрямовані на подальше зниження ризиків для людей та довкілля, а також запобігання міграції забруднюючих речовин. Цілі можуть бути досягнуті шляхом видалення та/або локалізації забруднювачів у ґрунті та ґрунтових водах. Ґрунт викопується, а ґрунтові води відкачуються та транспортуються для очищення. Якщо концентрації нижче рівня ризику для здоров'я людини, але вище рівня екологічного ризику забруднення, то ефективними заходами для зниження ризику є фіторе mediaція.

Середньостроковими заходами щодо запобігання подальшої міграції забруднювачів за межі об'єкту є: Видалення ґрунтів та ґрунтових вод в джерелах забруднення та їх очищення за межами зони забруднення джерела шляхом рекультивации ґрунтів та ґрунтових вод; Ізоляція забрудненого ґрунту і ґрунтових вод в зоні забруднення.

Довгострокові заходи. Довгострокові заходи спрямовані на подальше зниження екологічних ризиків. В довгострокових заходах застосовуються такі методи відновлення, як фіторе mediaція та/або імобілізація забруднювачів у ґрунті та ґрунтових водах.

Визначення прийнятних технологій. Визначення прийнятних технологій є першим кроком у визначенні оптимального варіанту відновлення об'єкту. Вибрані технології відновлення є першим кроком у розробленні варіантів відновлення. Потім ці варіанти піддаються багатокритеріальному аналізу рішень (MCDA) для вибору оптимального варіанта відновлення.

Як правило, жодна технологія не може відновити весь об'єкт, оскільки об'єкти часто забруднені кількома забруднюючими речовинами. На таких об'єктах зазвичай використовуються комбіновано кілька технологій очищення чи відновлення, утворюючи так званий цикл обробки. Критеріями, що використовуються на перших етапах вибору, є склад ґрунту, концентрація забруднюючих речовин, спосіб використання ділянки та прилеглих територій.

На цьому етапі розглядаються десять груп технологій з реабілітації забрудненого ґрунту:

- термічна обробка *in-situ* (процес обробки здійснюється безпосередньо в ґрунті або ґрунтових водах);
- термічна обробка *ex-situ* (процес обробки здійснюється після екскавації ґрунту або відкачування води);

- біодеградація *in-situ*;
- біодеградація *ex-situ*;
- фізико-хімічна деградація *in-situ*;
- фізико-хімічна деградація *ex-situ*;
- фіторемедіація *in-situ*;
- фіторемедіація *ex-situ*;
- ізоляція *in-situ*;
- ізоляція *ex-situ*.

Також розглядаються наступні чотири групи технологій з очищення грунтових вод: обробка на місці; відкачування за допомогою вакуумного або зануреного насоса та обробка *ex-situ*; створення реактивного бар'єру; ізоляція.

Кожна технологія відновлення ґрунту розглядається на відповідність наступним критеріям:

- водопроникність ґрунту;
- концентрація забруднювача у ґрунті;
- призначення ділянки;
- витрати на реалізацію технології.

Кожна технологія відновлення ґрунтових вод розглядається на відповідність таким критеріям:

- проникність водоносного горизонту ґрунтових вод;
- глибина ґрунтових вод;
- концентрації забруднювачів;
- шляхи використання ґрунтових вод;
- витрати на реалізацію технології.

Результати аналізу відповідності першим трьом критеріям для ґрунту та першим чотирьом критеріям для ґрунтових вод дозволяє віднести застосування до однієї з чотирьох **категорій**:

– Безумовна застосовність: Метод може бути негайно впроваджений без необхідності додаткових лабораторних або пілотних випробувань.

– Застосовність із попереднім тестуванням: Метод можна впроваджувати, проте перед повномасштабним застосуванням необхідно провести попередні випробування.

– Застосовність із обмеженнями: Метод, швидше за все, не підлягає для негайного впровадження, але потребує лабораторного тестування та пілотного проєкту для підтвердження можливості його застосування.

– Непридатний до застосування: Метод не може бути використаний у поточних умовах.

На останньому етапі аналізуються економічні показники технологій. Коли певна технологія класифікується як «Безумовна застосовність», на всіх перших трьох кроках для ґрунту та на всіх перших чотирьох кроках для ґрунтових вод, останній крок спрямовує до методів, які вже впроваджені в країні.

Коли певна технологія має найнижчий бал «Застосовність із попереднім тестуванням» на одному з перших трьох етапів для ґрунту та на одному з перших чотирьох кроків для ґрунтових вод, останній крок спрямовує до методів, які слід спочатку протестувати. За результатами випробувань можна ухвалити рішення про повномасштабне застосування цього методу.

Якщо певна технологія класифікується як «Застосовність із обмеженнями» на одному з перших трьох етапів для ґрунту та на одному з перших чотирьох етапів для ґрунтових вод, обрана технологія буде застосовуватись у повному масштабі лише після лабораторних випробувань, які вказують на те, що цей метод може спрацювати, а пілотне випробування це підтвердить.

Безпосередній відбір методів та технологій, які можуть бути розглянуті при оптимізації сукупності технологій відновлення ділянки забрудненої СОЗ, має спиратися на:

– Загальні технічні керівні принципи екологічно обґрунтованого регулювання відходів, що складаються із стійких органічних забруднювачів, які містять або забруднені ними⁴;

– Технічні настанови щодо екологічно безпечного поводження з відходами, що складаються, містять або забруднені поліхлорованими біфенілами, поліхлорованими терфенілами, поліхлорованими нафталінами або полібромованими біфенілами, включаючи гексабромобіфеніл (ПХД, ПКТ, ПЦН або ПББ, включаючи ГВБ)⁴;

– Технічні керівні принципи екологічно обґрунтованого регулювання відходів, що містять або забруднені ненавмисно виробленими поліхлордибензо-п-діоксинами, поліхлордибензофуранами, гекса-хлорбензолом, поліхлордифенілами, пентахлорбензолом або поліхлорованими нафталінами⁴.

Огляд технологій відновлення ґрунту та ґрунтових вод, забрудненого СОЗ.

У технологіях очищення ґрунту та ґрунтових вод зазвичай використовується один або кілька з таких методів:

– Термічні методи: термодесорбції та термодеструкції;

– Методи сепарації, такі як випарювання, промивання, промивання та ополіскування;

– Методи фізичного видалення, такі як відсмоктування забруднювачів у газоподібному стані та відкачування ґрунтових вод;

– Біологічні методи, такі як інтенсивне біорозкладання та рекультивация ґрунтів;

– Хімічного методи, такі як окиснення, відновлення, розчинення та сорбція;

– Технології іммобілізації/стримування, такі як хімічне зв'язування або капсулювання в нерозчинній матриці.

У Таблиці 1 представлені методи обробки ґрунту, забрудненого СОЗ, безпосередньо на забрудненій ділянці або за її межами.

Коли вибрано метод очищення ґрунту за межами майданчика, викопаний ґрунт необхідно транспортувати на підприємство з переробки в межах країни або за кордон. При транскордонному перевезенні повинні виконуватися зобов'язання за Базельською, Стокгольмською та Роттердамською конвенціями.

Таблиця 1
Методи відновлення ґрунту, забрудненого СОЗ

Метод	In-situ	Ex-situ	Off -site*
Біоремедіація	X	X	X
Фіторемедіація	X	X	X
Механіко-хімічне дегалогенування		X	X
Термічна десорбція	X	X	X
Лужно-каталітична деструкція		X	X
Газофазне хімічне розкладання		X	X
Термічна деструкція			X
Вітрифікація	X		
Природне очищення	X		

* Off-sites – процес обробки здійснюється межами забрудненої ділянки

В таблиці 2 представлені методи очищення ґрунтових вод, забруднених СОЗ.

Таблиця 2
Методи очищення ґрунтових вод, забруднених СОЗ

Метод	In-situ	Ex-situ
Фіторемедіація	X	
Відкачування та очищення		X
Проникний бар'єр	X	
Термічна десорбція	X	
Природне очищення	X	

Біоремедіація. Біоремедіація – це процес використання живих організмів (рослини, мікроорганізми, гриби) для очищення забрудненого середовища. Цей підхід базується на здатності організмів розкласти або перетворювати шкідливі речовини в менш токсичні або навіть нешкідливі продукти, сприяючи таким чином природному очищенню навколишнього середовища. Для посилення біоремедіації та десорбції забруднюючих речовин застосовують аддитиви, що підсилюють процеси окиснення або створюють безкисневе середовища. Для створення безкисневого середовища також може бути застосоване покриття забрудненого ґрунту плівкою. Методи біоремедіації успішно використовуються для рекультивации ґрунтів, забруднених СОЗ-пестицидами. Біоремедіація особливо ефективна для ліквідації залишкового забруднення низького рівня. Біоремедіація може бути виконана двома способами: рекультивацією ґрунту *in situ* та з екскавацією ґрунту та обробкою *ex-situ* та *off-sites*. Разом з тим біоремедіація має такі недоліки:

– Час, необхідний для досягнення бажаних рівнів рекультивации, невизначений, оскільки ефективність залежить від характеристик ґрунту та специфічних умов ділянки.

– Біодеградація відбувається повільно або потенційно неможлива у важких текстурованих ґрунтах, таких як глина.

– Високі концентрації стійких органічних забруднювачів (СОЗ) можуть бути токсичними для мікроорганізмів.

– Біоремедіація значно сповільнюється за низьких температур.

– Процеси біодеградації *ex-situ* (поза місцем забруднення) часто є трудомісткими та складними в реалізації.

Фіторемедіація^{5,6} – процес, у якому використовуються рослини різних життєвих форм для видалення, перенесення, стабілізації забруднюючих речовин (зокрема, СОЗ) у середовищі. Фітоекстракція (*Phytoextraction*) – процес, під час якого рослини поглинають забруднювачі з ґрунту чи води через кореневу систему, після чого накопичують їх у своїх тканинах. Фітодеградація (*Phytodegradation*) – використання рослин для поглинання, розкладання або перетворення органічних забруднювачів у нетоксичні форми. Фітостабілізація (*Phytostabilization*) – процес, за допомогою якого рослини обмежують рухомість забруднювачів у ґрунті, фіксуючи їх у своїх коренях або в кореневій зоні. Фітофільтрація (*Phytofiltration*) – очищення водних середовищ (наприклад, ґрунтових або стічних вод) від забруднювачів за допомогою рослин. Фітоволатилізація (*Phytovolatilization*) – процес, під час якого рослини поглинають забруднювачі з ґрунту чи води, перетворюють їх у летку форму та виводять в атмосферу через листя.

Важливі аспекти вибору рослини для фіторемедіації забрудненого СОЗ ґрунту: рослина біоаккумулятор бажано має бути місцевим видом; не потребує значного догляду; не повинна використовуватися як будівельний матеріал, або як дрова. Перевагами фіторемедіації є: може застосовуватися як *in-situ* (на місці), так і *ex-situ* (поза межами ділянки); низька вартість обробки; не споживає багато енергії; проста у впровадженні та обслуговуванні. Водночас очевидними недоліками фіторемедіації є: час, необхідний для досягнення бажаних рівнів рекультивации, є невизначеним, оскільки ефективність залежить від характеристик ґрунту та факторів, специфічних для певної ділянки; використання ділянки для інших цілей під час фіторемедіації може бути обмеженим; глибина зони обробки визначається корінням рослин, що може обмежувати глибину очищення; ефективність фіторемедіації може залежати від сезону, зокрема кліматичних умов і місця розташування; існує ймовірність переносу забруднення в інші середовища, наприклад, із ґрунту в повітря; токсичність продуктів біодеградації не завжди відома, що може становити потенційну небезпеку; забруднювачі можуть надходити в ґрунтові води або акумулюватися в організмах тварин.

Механіко-хімічне дегалогенування (МХД) руйнує хлоровані органічні сполуки, зокрема, СОЗ, в закритій системі без нагріву. Викопаний забруднений ґрунт подається в реактор, що обертається разом з реагентом, наприклад СаО. В реакторі знаходяться

сталеві кульки, які подрібнюють і перемішують реагент та забруднений ґрунт.

Хімічні зв'язки молекули забруднювача розриваються механічною енергією, а радикали, що утворились з хлорованих сполук реагують з CaO в реакторі і утворюють неорганічні хлоровані сполуки, такі як CaCl_2 і $\text{Ca}(\text{OH})\text{Cl}$, які є стабільними сполуками.

Термічна десорбція *in-situ* та *ex-situ* заснована на газифікації або екстракції теплоносієм забруднюючих речовин для наступного збору в конденсаційних пристроях або подальшої термічної деструкції в печах та реакторах. Термічну десорбцію ґрунтів можна здійснювати шляхом електричного резистивного нагріву або нагнітання теплоносія, зокрема пари, через вертикальні екстракційні колодязі. Збір та транспортування на очисні споруди забруднених парів та рідин здійснюється за допомогою горизонтальних дренажних систем.

Під час впорскування пари може статися хімічна конверсія (піроліз) частини забруднюючих речовин. Застосовність методу залежить, передусім, від гідралічних властивостей ґрунту. Пілотний проект перед повномасштабним застосуванням має виявити ефективність, швидкість вилучення та можливі побічні ефекти.

Лужно-каталітична деструкція (ЛКД). Процес ЛКД полягає у змішуванні концентрованих CO_2 у реакторі із сумішшю гідроксиду лужного металу, каталізатору та оливи, що є донором водню. Після нагрівання суміші до 326°C протягом 3–6 годин утворюється атомарний водень із високою реакційною здатністю, і в екзотермічних умовах водень відщеплюється від донорної олії та гідрогенізує зв'язаний в CO_2 хлор. В каталітичній реакції утворюється водяна пара та хлориду натрію. Після завершення процесу залишки оливи та шлам вивантажують з реактора. Оливу можна повторно використовувати для наступного періодичного процесу, а осад можна нейтралізувати для захоронення або використовувати для очищення кислих стічних вод⁷.

Для отримання висококонцентрованих CO_2 може знадобитися етап попередньої обробки шляхом непрямой термічної десорбції. Забруднений ґрунт і луг (наприклад, бікарбонат натрію) змішують і нагрівають до 315°C – 500°C , щоб забезпечити випаровування галогенованих сполук. Випарені забруднювачі направляються в конденсатор після чого концентрат піддають в реактор процесу ЛКД.

Існують модульні, транспортабельні та стаціонарні установки ЛКД. Продуктивність установок коливається від 100 кг/год до 20 тон/год⁸. Реактори ЛКД зазвичай обробляють 1–3 тони з одне завантаження та 2–4 партії на добу. Висока ефективність деструкції (99,9999%) була продемонстрована для ДДТ, ПХД, ПХФ, ГХБ, ГХГ, а також діоксинів і фуранів (ПХДД/Ф) Відносно низька вартість добавок (гідроксид натрію є основною вхідною вартістю) робить цю технологію придатною для застосування за економічними показниками.

Газофазне хімічне розкладання (ГФХР). Процес ГФХР передбачає термохімічне розкладання органічних сполук. При температурах вище 850°C і низькому тиску водень реагує з хлорованими органічними сполуками, утворюючи головним чином метан, водень, хлористий водень (якщо відходить хлоровані) і незначну кількість низькомолекулярних вуглеводнів (бензол і етилен). Соляна кислота нейтралізується додаванням каустичної соди під час початкового охолодження технологічного газу або може бути вилучена у формі кислоти для повторного використання. Технологію ГФХР можна розділити на три фази: попередня обробка для переведення забруднювачів у придатну для знищення в реакторі форму; газофазне розкладання забруднюючих речовин в реакторі з використанням водню та пари; очищення та стиснення газів⁹.

Технологія ГФХР може використовуватися для обробки всіх CO_2 , витягнутих із забруднених ґрунтів, осадів та сміття за допомогою непрямой термічної десорбції. Процес ГФХР також можна використовувати до сипучих речовин, а також, до тари, електричного обладнання, відходів та інших забруднених твердих речовин. Це дозволяє провести комплексну знезараження ділянок із застосуванням єдиної технології для знешкодження декількох забруднювачів. Після очищення отримана суміш газів багата метаном, пропаном і воднем, може повністю або частково рециркулювати, а частина газу може використовуватися як паливо в котлі. Система ГФХР також може бути налаштована так, щоб уловлювати надлишок водню для постачання зовнішнім клієнтам, зменшуючи витрати на розкладання. На рисунку 2 представлено загальний вигляд комплексу для ГФХР обробки забрудненого ґрунту.



Рис. 2. Загальний вигляд комплексу для ГФХР обробки забрудненого ґрунту

Термічна деструкція. Технології термічної деструкції забруднювачів здійснюються в спеціальних установках або інсінераторах іншого призначення після попередньої десорбції. Спеціальні установки розміщуються головним чином *ex-situ*, а інсінератори знаходяться *off-sites*. Термічна деструкція *in situ* може здійснюватися, коли є необхідність у вітрифікації інших забруднювачів, зокрема, важких металів.

Широке застосування для термічного очищення ґрунтів отримали обертові печі (рис. 3), в яких є умови для ефективної термодесорбції та термдеструкції забруднювачів.



Рис. 3. Обертова піч для знешкодження відходів та ґрунтів з невисоким вмістом CO₂

Ключовим фактором використання термічної деструкції є відносно низька вартість переробки, проте Стокгольмська конвенція визначає ці технології як потенціальне джерело емісії CO₂ і закликає жорстко дотримуватися рекомендацій НДТМ/П. Узагальнені висновки щодо НДТМ при спалюванні відходів закріплені в Рішенні Європейської Комісії 2019/2010 від 12 листопада 2019 року¹⁰ відповідно до Директиви 2010/75/ЄС.

При виборі технології термічної деструкції CO₂ необхідно проаналізувати наявність умов для максимальної деструкції забруднювачів, мінімального синтезу діоксинів та фуранів та ефективного видалення остатків CO₂ з продуктів деструкції. Має бути оцінена не тільки ефективність видалення CO₂ з ґрунту або ґрунтових вод, а й остаточна їх кількість в викидах та залишках термічної переробки.

Особливої уваги потребують невеликі транспортельні установки, які зазвичай не мають складної і відповідно вискоелективної системи очищення газів. Для таких установок ризику викидів CO₂ є більшими.

Умовам одночасного ефективного проведення термодесорбції та термодеструкції в єдиному робочому просторі найкраще відповідають обертові печі. Забруднені ґрунти можуть оброблятися в спеціальних інсінераторах разом з іншими небезпечними відходами за умов, що в зоні десорбції підтримується температура вище 850°C, а в зоні остаточної деструкції вище 1100°C і газифіковані забруднювачі перебувають в зоні деструкції більше двох секунд.

Якщо забруднювачі попередньо відокремлені від ґрунту або ґрунтових вод, то їх термодеструкція може бути здійснена в інших термічних установках, призначених для знешкодження хлороганічних небезпечних відходів, наприклад, реакторах для знешкодження сипких та рідких відходів. Для надійної деструкції забруднювачі мають впорскуватися безпосередньо в факел пальника або плазмотрону, які забезпечують підведення енергії до реактору. Термічна деструкція також може здійсню-

ватися в цементній печі, але в цьому випадку важко забезпечити проходження забруднювачів через зону високих температур та контроль за ступенем розкладання забруднювачів.

Вітрифікація. Вітрифікація це процес утворення розплаву між парами електродів, вставлених у ґрунт. Електричний струм пропускають через відносно високо провідний ґрунт. Під дією тепла, що розсіюється, утворюється розплав. В розплаві хлороганічні сполуки розкладаються, метали та радіонукліди осковуються у нерозчинну матрицю. Відхідні газы, що утворюються в процесі, збираються всередині ковпака з нержавіючої сталі, що закриває зону обробки, і відводяться для переробки в систему очищення газів.

Очищення ґрунтових вод in situ. Очищення ґрунтових вод in situ з використанням фітореMediaції та термодесорбції може ефективно застосовуватися тільки в разі забруднень малої локалізації на невеликій глибині. Винятком є використання проникного реактивного бар'єру.

Проникний реактивний бар'єр (ПРБ) створюється наступним чином. У певному місці шлейфу ґрунтових вод викопується траншея і заповнюється реагентом та/або абсорбентом. ПРБ дозволяє воді проходити через зону очищення, яка видаляє забруднення та випускаючи незабруднену воду далі за потоком. Методи видалення включають сорбцію та осадження, хімічні реакції та біологічні процеси. Реагентом може бути так зване «нуль-валентне залізо» (звичайне або nano-Fe). В якості сорбенту може використовуватися торф або інший органічний матеріал, на якому проходять біологічні процеси, які зрештою руйнують CO₂. Проникний реактивний бар'єр може бути побудований у глибоких траншеях навколо ділянки, а також може бути побудований на поверхні ділянки, де забруднений стік є основною проблемою.

Очищення ґрунтових вод ex situ. Відкачування та очищення з використанням фільтрів з адсорбуючим матеріалом ex situ є найпоширенішими способом вирішення проблеми забруднення ґрунтових вод CO₂. Більшість CO₂ мають відносно низьку розчинність і можуть бути видалені фільтрами з гранульованим або порошкоподібним активованим вугіллям. Фільтрація через вугільні фільтри є технологією, що не руйнує забруднювачі і концентрат, який накопичується у фільтрах, необхідно видаляти та знищувати окремо. Це можна зробити за допомогою наведених вище технологій деструкції CO₂. Щоб уникнути небажаного скидання забруднених стоків, два вугільні фільтри з'єднуються послідовно. Останній фільтр називається поліцейським фільтром.

Моніторинг ділянки та подальший догляд.

Усунути всі екологічні ризики на забрудненій території часто унеможлиблюються за технічних та фінансових обмежень. Тому на багатьох відновлених об'єктах зберігаються ризики розповсюдження

забруднення. На таких об'єктах має продовжуватися моніторинг та здійснюватися подальші заходи, що підтримують результати робіт із знешкодження/блокування забруднювачів доти, доки не буде продемонстровано, що джерело забруднення видалено та/або шляхи впливу назавжди перекриті. Час, необхідний для моніторингу та подальшого догляду, залежить від кількох характеристик об'єкта, зокрема; властивості забруднювача; гідрогеологічні умови; спосіб відновлення ділянки.

Етап моніторингу та підтримуючих заходів потребує довгострокового планування, до того часу поки ризики, що залишилися, також не будуть усунуті. Заходи, які необхідно здійснювати на цьому етапі:

- моніторинг безпосередньо забрудненої ділянки та шлейфу ґрунтових вод;
- підтримка ефективності реактивного бар'єру для вловлювання забруднювачів в ґрунтових водах;
- оновлення концептуальної моделі об'єкту за результатами моніторингу.

Моніторинг.

Моніторинг ґрунту. Якщо остаточний характер забруднення вказує на необхідність застосування довгострокових заходів відновлення ґрунту, швидких істотних змін в концентрації забруднювачів не слід очікувати. У такому випадку відбір проб ґрунту варто проводити не дуже часто, наприклад, щорічно.

Моніторинг ґрунтових вод. Моніторинг ґрунтових вод здійснюється для отримання інформації про:

- Якість ґрунтових вод;
- Міграцію остаточного забруднення ґрунтових вод до будь-яких чутливих рецепторів або об'єктів.

Розповсюдження забруднювачів з ґрунтовими водами залежить від низки чинників:

- Характеристики забруднювача (розчинність у воді);
- Гідрогеологічні характеристики (напрямок, швидкість, рівень і коливання потоку ґрунтових вод);
- Хімічні характеристики ґрунтових вод (рН, окислювально-відновлюваний потенціал);
- Геологія території (підземне середовище, горизонтальна і вертикальна проникність водоносного горизонту і пористість водоносного горизонту);
- Характеристики розміщення ділянки (топографія, можливість поверхневого стоку, використання ділянки, шляхи використання ґрунтових вод, забори ґрунтових вод і чутливі об'єкти);
- Характеристики прилеглих територій (топографія, поверхневий сток, землекористування на прилеглих територіях, використання ґрунтових вод, захист ґрунтових вод, чутливі об'єкти).

До чутливих об'єктів відносяться, приміром, колодязі, що використовуються для громадського водопостачання, поверхневі водойми, які використовуються в побутових цілях, для поїння скоту та/або поливу городів або сільськогосподарських полів. Як правило, ці об'єкти є чутливими, якщо:

- об'єкт знаходиться нижче за потоком ґрунтових вод на відстані у 10 разів більшої довжини шлейфа;
- об'єкт знаходиться вище за потоком ґрунтових вод на відстані у 2 рази більшої довжини шлейфа забруднення;
- об'єкт знаходиться на відстані в 3 рази більше ширини шлейфу в латеральному напрямку.

На рисунку 4 показана схема визначення чутливих об'єктів, які мають бути у планах моніторингу, а також системи контролю за горизонтальним поширенням остаточного забруднення¹¹.

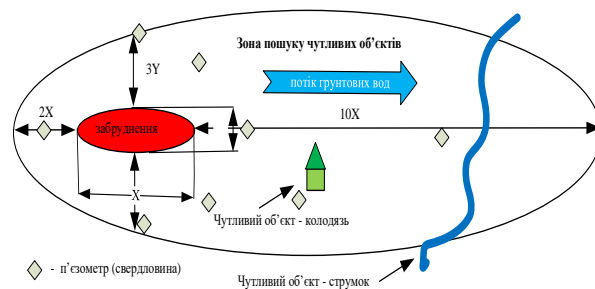


Рис. 4. Схема визначення чутливих об'єктів в зоні забруднення ґрунтових вод та розміщення моніторингових свердловин

Типовий набір моніторингу складається з наступних п'єзометрів:

- П'єзометр, розташований вище за потоком ґрунтових вод, призначений для визначення базової якості ґрунтових вод, що стікають до зони забрудненого шлейфу.
- Центральний п'єзометр використовується для моніторингу зони з найбільшою концентрацією забруднень.
- П'єзометр, розташований нижче за потоком ґрунтових вод, забезпечує моніторинг міграції забруднювачів.
- Резервний п'єзометр встановлюється на відстані приблизно подвійної довжини шлейфу забруднення ґрунтових вод для спостереження за несподіваною міграцією.
- Додаткові п'єзометри розташовуються між п'єзометром на краю залишкового забруднення та чутливими об'єктами.
- П'єзометри для перевірки розтікання ґрунтових вод перпендикулярно до напрямку потоку (бічні п'єзометри).

Для контролю вертикального забруднення ґрунтових вод необхідно встановити додаткові п'єзометри. Частота моніторингу є важливим аспектом моніторингу ґрунтових вод. Частота моніторингу повинна бути різною для різних п'єзометрів. Як правило, п'єзометри в найбільш забрудненій зоні шлейфових ґрунтових вод і на краю шлейфу слід контролювати частіше всього, тоді як інші п'єзометри можна контролювати з меншою частотою. Інтенсивність моніторингу повинна одночасно знижуватися, якщо

Приклад програми технічної підтримки довгострокових заходів

Об'єкт догляду	Заходи підтримки	Періодичність	Відповідальний
Забруднений шар ґрунту	Перевірка наявності екскавації та/або великомасштабного переміщення ґрунту на ділянці	Щомісяця	Доглядач ділянки
Насоси на ділянці	Технічний огляд всіх насосів, трубопроводів, кранів	Щомісяця	Підрядна організація
Установки відновлення	Технічний огляд всіх компонентів установок	Щомісяця	Підрядна організація
Границі ділянки	Уздовж паркану, що огорожує ділянку має бути зона шириною 1 метр вільна від чагарників	Щомісяця під час вегетації. Один раз зимою	Доглядач ділянки

немає істотних відмінностей у останніх замірах. Однак, якщо є підвищення рівня забруднення, інтенсивність повинна збільшитися.

Крім моніторингу ґрунту і ґрунтових вод може бути проведений моніторинг інших параметрів, таких як якість навколишнього повітря, залишки СО₂ в продуктах рослинництва і тваринництва та ін. Моніторинг цих компонентів є корисним тільки в тому випадку, якщо остаточне забруднення протягом певного часу зберігається близьким до початково встановлених значень.

Заходи з підтримки результатів відновлення ділянки. Для підтримки результатів відновлення ділянки складається відповідна програма. Спрощений приклад такої програми наведено в таблиці 3. Програма перевірки та технічного обслуговування має складатися з завдань щодо технічної підтримки довгострокових заходів; розподілу обов'язків з виконання цих завдань; джерел фінансової підтримки заходів.

Якщо дані моніторингу забруднення достатньо інформують щодо зменшення остаточного забруднення, підтримка довгострокових заходів полягає лише в забезпеченні функціонування проникних бар'єрів та моніторингової системи.

Протягом певного часу право власності на ділянку може змінитися, а причини обмеження використання ділянки можуть бути забуті. З метою запобігання цьому важливо, щоб орган, відповідальний за дотримання обмежень на використання ділянки, повідомив користувачів про причини обмежень. Користувачі ділянки також мають бути поінформовані про можливі наслідки обмежень на використання ділянки. Якщо

в спільноті зацікавлених сторін виникли якісь зміни, інші зацікавлені сторони також мають бути поінформовані щодо обмеження використання ділянки.

Висновки. На основі комплексного аналізу різних методологій відновлення ґрунтів та ґрунтових вод, забруднених СО₂, виявлено декілька ефективних підходів, у тому числі фіторе mediaцію, термічну деструкцію, механіко-хімічне дегалогенування тощо. Оцінка придатності методів базується на технічних, екологічних та економічних критеріях. Застосування методів очищення має базуватися на ретельному попередньому дослідженні території, оцінці ризиків та детальному моніторингу стану забрудненої ділянки. Практичне впровадження зазначених методів очищення забруднених ділянок дозволить мінімізувати ризики для здоров'я людини та навколишнього середовища. Окрім того, важливим є довгостроковий моніторинг територій, де здійснюються відновлювальні роботи з метою контролю рівня забруднення та подальшого забезпечення незагрозового стану екосистем.

Алгоритм вибору та впровадження оптимальної методології відновлення забруднених СО₂ територій передбачає: попереднє обстеження та оцінка ризиків, вибір методів дослідження та моніторингу; розробку критеріїв вибору методології відновлення; оцінку потенційних технологій відновлення; вибір оптимальної методології відновлення; розробка плану впровадження; виконання робіт із відновлення; моніторинг ефективності відновлення; довгостроковий контроль та моніторинг.

Література

1. Persistent Organic Pollutant – an overview | ScienceDirect Topics. Accessed September 29, 2024. <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/persistent-organic-pollutant>
2. Comprendre les POP – ECHA. Accessed September 29, 2024. <https://echa.europa.eu/fr/understanding-pops>
3. POPs contaminated sites Guidance. Accessed September 29, 2024. <https://chm.pops.int/Implementation/BATandBEP/POPcontaminatedsites/Guidance/tabid/9649/Default.aspx>
4. Technical Guidelines. Accessed September 30, 2024. <https://www.basel.int/Implementation/TechnicalMatters/DevelopmentofTechnicalGuidelines/TechnicalGuidelines/tabid/8025/Default.aspx>
5. Phytoremediation – PubMed. Accessed September 30, 2024. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15862088/>
6. Cunningham SD, Berti WR, Huang JW. Phytoremediation of contaminated soils. *Trends Biotechnol.* 1995;13(9):393-397. doi:10.1016/S0167-7799(00)88987-8
7. ipen-brief-noncombustion-v1_1-en.pdf. Accessed September 30, 2024. https://ipen.org/sites/default/files/documents/ipen-brief-noncombustion-v1_1-en.pdf
8. UNEP-CHW-SUBM-REL-GUID-AddRes-MacDowall-ReviewPOPsDestructionTechnologies.English (1).pdf.
9. General technical guidelines on the environmentally sound management of wastes consisting of, containing or contaminated with persistent organic pollutants. UNEP/CHW.16/6/Add.1/Rev.1 UNEP (2023)
10. eur192051.pdf. Accessed September 30, 2024. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/eur192051.pdf>
11. UNEP-POPS-BATBEP-GUID-POPs-08-202405.En (3).pdf.

ВИКОРИСТАННЯ ПЛАТФОРМИ GOOGLE EARTH ENGINE ДЛЯ СИСТЕМАТИЗАЦІЇ ДАНИХ ГЕОЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ПРИКЛАДІ ТЕРИТОРІЇ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

Давибіда Л.І.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
lidia.davybida@nung.edu.ua

Карпатський регіон України відзначається значною географічною різноманітністю і складною структурою ландшафтів, які піддаються зростаючому антропогенному тиску. Ці виклики включають деградацію земель, водні кризи та вплив змін клімату, які стають загальними проблемами для країн Карпатського Євросоюзу. В умовах таких викликів систематизація даних про природні ресурси, навколишнє середовище та екологічні ризики є критично важливою. Для цього дослідження була створена комплексна база даних на основі супутникового моніторингу, реалізованого за допомогою можливостей хмарної геоінформаційної платформи Google Earth Engine (GEE). Ця база даних забезпечує основу для аналізу та моделювання просторово-часових змін компонентів довкілля, оцінки ризиків виникнення повеней, посух та небезпечних геологічних процесів у межах Карпатського регіону. Створена база даних відіграє ключову роль у розробці політики та програм, спрямованих на вирішення екологічних проблем регіону, включаючи ініціативи щодо трансграничного співробітництва та управління природними ресурсами. Вона включає базові векторні шари топографічної основи та тематичні набори даних, такі як мультиспектральні та радарні супутникові знімки (Sentinel, Landsat, MODIS), кліматичні та метеорологічні дані (ERA5), інформацію про водні ресурси (GRACE), стан атмосферного повітря (Sentinel-5P), картографічні шари класифікації земного покриву (LULC) та цифрові моделі рельєфу (SRTM). Формування цієї бази передбачає ретельну систематизацію та впорядкування даних супутникового моніторингу й інформації з інших джерел. Це включає первинну обробку даних, яка охоплює нормалізацію, корекцію, обрізку, фільтрацію та інтерполяцію. Застосування хмарного сховища для зберігання великих обсягів геоданих забезпечує ефективне управління інформацією та полегшує доступ до неї для подальшого аналізу і прийняття управлінських рішень.

Ключові слова: геоecологічний моніторинг, геоінформаційні системи, бази геоданих, оцінка екологічного ризику.

Using the Google Earth Engine for the systematization of geoeological research data: the case of the Carpathian region.
Davybida L.

The Carpathian region of Ukraine is characterized by significant geographical diversity and complex landscapes, which are increasingly impacted by human activities. These challenges include land degradation, water crises, and the effects of climate change, which have become common issues for the countries within the Carpathian Euroregion. In response to these challenges, the systematization of data on natural resources, the environment, and environmental risks is crucial. For this study, a comprehensive database was developed based on satellite monitoring, utilizing the capabilities of the Google Earth Engine (GEE) cloud-based geoinformation platform. This database serves as the foundation for analyzing and modeling spatial and temporal changes in environmental components, as well as assessing the risks of floods, droughts, and geological hazards within the Carpathian region. The created database plays a key role in the development of policies and programs aimed at addressing environmental issues in the region, including initiatives for transboundary cooperation and natural resource management. The database includes essential vector topographic layers and thematic datasets, such as multispectral and radar satellite images (Sentinel, Landsat, MODIS), climate and meteorological data (ERA5), water resources information (GRACE), air quality data (Sentinel-5P), land cover classification map layers (LULC), and digital elevation models (SRTM). The creation of this database involves the meticulous systematization and organization of satellite monitoring data, along with information from other sources. This process includes primary data processing steps, such as normalization, correction, cropping, filtering, and interpolation. The use of cloud storage for managing large volumes of geospatial data ensures efficient information management and facilitates access to it for further analysis and decision-making.

Key words: geoeological monitoring, geoinformation systems, geodatabases, environmental risk assessment.

Постановка проблеми. Традиційні методи збору та аналізу геопросторових екологічних даних часто є обмеженими через високу трудомісткість, фінансові витрати та обмежену доступність даних. Використання сучасних геоінформаційних технологій і даних дистанційного зондування Землі відкриває нові можливості для систематизації та автома-

тизації обробки великих обсягів даних, включаючи супутникові знімки, кліматичні показники, дані про рослинний покрив та інші важливі екологічні параметри. Це дозволяє значно підвищити точність і ефективність регіонального екологічного моніторингу, а також сприяє більш глибокому розумінню довгострокових змін у екосистемах. Геоінформаційна

платформа хмарних обчислень Google Earth Engine (GEE) надає інструменти для збору, обробки, аналізу та обміну даними дистанційного зондування. Вона об'єднує різноманітні набори даних дистанційного зондування і дозволяє оновлення даних майже в реальному часі, а обсяг пам'яті досягає петабайтного рівня [1]. Користувачі можуть розробляти та тестувати власні алгоритми, а також швидко обробляти та обмінюватися результатами, значно підвищуючи ефективність обробки та аналізу великих обсягів геоданих. Для аналізу і моделювання геоecологічних явищ і процесів GEE є ефективним інструментом для дослідження просторової неоднорідності та взаємодії досліджуваних параметрів. Першим важливим етапом проведення подібних досліджень є формування бази геоданих для території інтересу. На сьогодні в GEE доступно понад 80 відкритих наборів даних NASA та інших провайдерів, включаючи зокрема супутникові зображення та набори даних щодо опадів, щільності населення, топографії, земного покриву та клімату, тощо. Колекції даних GEE включають як растрові, так і векторні дані [2].

У якості тестового полігону обрано територію транскордонного Карпатського регіону України, який включає території Львівської, Івано-Франківської, Чернівецької і Закарпатської областей та є частиною Карпатського єврорегіону (рис. 1). Для території дослідження характерними є активізація екологічно несприятливих явищ – паводків, зсувів, ґрунтової ерозії, забруднення атмосферного повітря, забруднення поверхневих і підземних вод, ураження лісів шкідниками та хворобами. Також слід відзначити, що не є оптимальною через значне зменшення покритої лісом площі і процеси урбанізації, структура земельного фонду [3].



Рис. 1. Територія дослідження

Актуальність дослідження. Карпати є одним із найбільш екологічно цінних і вразливих регіонів

України та Європи, що зазнають значного впливу антропогенних факторів, таких як вирубка лісів, незаконна забудова, та сільськогосподарська діяльність. Невпинні зміни клімату та часті природні катаклізми, такі як повені та зсуви, також суттєво впливають на екосистеми регіону. Систематизація та аналіз цих змін є необхідними для розробки ефективних заходів щодо збереження екосистем і сталого управління природними ресурсами. Для забезпечення сталого розвитку Карпатського регіону важливо мати інструменти для довгострокового моніторингу екологічних змін. Платформа GEE дозволяє не лише аналізувати історичні дані, але й проводити постійний моніторинг в режимі реального часу, що є критично важливим для швидкого реагування на нові загрози та зміни в екосистемах. Систематизація даних у GEE сприяє підвищенню ефективності моніторингу й звітності щодо екологічного стану регіону, що є важливим для виконання міжнародних зобов'язань України.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження сприяє розширенню знань про екологічні процеси в Карпатському регіоні, надаючи нові інструменти для аналізу і моніторингу на основі сучасних геоінформаційних технологій. Це відповідає актуальним завданням геоecології, спрямованим на більш точне розуміння природних і антропогенних процесів, та глобальним цілям охорони навколишнього середовища, визначеним у міжнародних угодах, зокрема таких як Конвенція про біологічне різноманіття, Водна рамкова директива ЄС та Паризька кліматична угода.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування геоінформаційних систем і технологій, зокрема й хмарної геоінформаційної платформи GEE, дозволяє ефективно проводити комплексний аналіз екосистемних змін різного масштабу – від локального до глобального [4–5]. Ці інструменти на даний час є незамінними для моніторингу навколишнього середовища, вивчення зміни лісового покриву, зменшення площ водних об'єктів та аналізу динаміки вуглецевих викидів, моделювання та прогнозування гідрометеорологічних явищ і процесів [6–9]. Значну увагу дослідники приділяють і аналізу основних стандартів геопросторових даних і методичних підходів до оцінки придатності первинних джерел даних для побудови єдиної геоінформаційної бази даних [10–11]. Подібні інтегровані бази геоданих у поєднанні з можливостями сучасних хмарних технологій дозволяють легко об'єднувати та аналізувати великі обсяги даних, зібраних з різних джерел, включаючи супутникові зображення, кліматичні моделі, і наземні спостереження. Це сприяє створенню надійних моделей, які можуть використовуватися для довгострокового моніторингу і прийняття обґрунтованих рішень у сфері управління природними ресурсами, прогнозування екологічних змін

і моделювання майбутніх сценаріїв, а також розробки адаптаційних стратегій для різних регіонів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Слід зазначити, що більшість досліджень геоecологічного спрямування, проведених для Карпатського регіону, обмежуються вивченням окремих аспектів змін компонентів довкілля і не використовують повною мірою потенціал сучасних технологій обробки великих масивів геопросторових даних. Також важливим завданням залишається забезпечення відкритого доступу до геоecологічних даних та їх інтеграції для розробки і реалізації ефективних програм екологічного моніторингу.

Новизна. Уперше для території Карпатського регіону був застосований інтегрований геоінформаційний підхід до формування бази геоecологічних даних засобами геоінформаційної платформи Google Earth Engine. Це дозволило об'єднати різноманітні дані дистанційного зондування, топографічні карти, кліматичні дані та інформацію з інших відкритих ресурсів в єдину інформаційну систему, забезпечивши комплексну оцінку геоecологічного стану регіону.

Методологічне або загальнонаукове значення. Використання Google Earth Engine (GEE) для систематизації даних геоecологічних досліджень забезпечує інтеграцію різноманітних джерел даних, таких як супутникові знімки, кліматичні показники та інформація про рослинний покрив, на одній платформі. Це сприяє комплексному аналізу екологічних процесів. Автоматизація обробки великих обсягів даних завдяки потужним обчислювальним ресурсам GEE значно скорочує час аналізу та підвищує точність результатів. Крім того, платформа надає інструменти для динамічного аналізу даних у часовому розрізі, що дозволяє виявляти довгострокові зміни в екологічних системах. Інтерактивні інструменти візуалізації сприяють легкому представленню результатів досліджень, що полегшує їх сприйняття та використання в освітніх і наукових цілях.

GEE забезпечує базовий інформаційний супровід для систематичного моніторингу стану екосистем, що особливо важливо для регіонів з багатим біорізноманіттям, таких як Карпати. Це дозволяє виявляти тенденції і загрози для біорізноманіття та вчасно вживати заходів для його збереження. Аналіз супутникових даних за допомогою GEE допомагає виявляти вплив кліматичних змін на екологічні системи Карпатського регіону, що є критично важливим для розробки стратегій адаптації та пом'якшення наслідків кліматичних змін. Дослідження сприяють кращому розумінню процесів, що впливають на природні ресурси, такі як ліси, водні ресурси та ґрунти, допомагаючи розробляти ефективні заходи для їхнього збереження та сталого використання. Відкритий доступ до даних і інструментів GEE сприяє міжнародному науковому обміну та співпраці, що важливо для вирішення глобальних екологічних проблем.

Виклад основного матеріалу. Формування бази геоданих для подальшого аналізу і моделювання геоecологічних процесів і явищ засобами хмарної платформи передбачає збір та інтеграцію даних супутникового моніторингу й інших джерел, попередню обробку даних (нормалізація та корекція, обрізка, фільтрація, інтерполяція), організацію та збереження великих обсягів геопросторових даних з використанням ГІС та хмарних сховищ. У якості базових векторних шарів топографічної основи і адміністративних меж території дослідження використано цифрову топографічну карту України масштабу 1:100 000 [12]. На основі доступних каталогів GEE сформовано інтегровану базу геоecологічних даних для території Карпатського регіону (рис. 2).

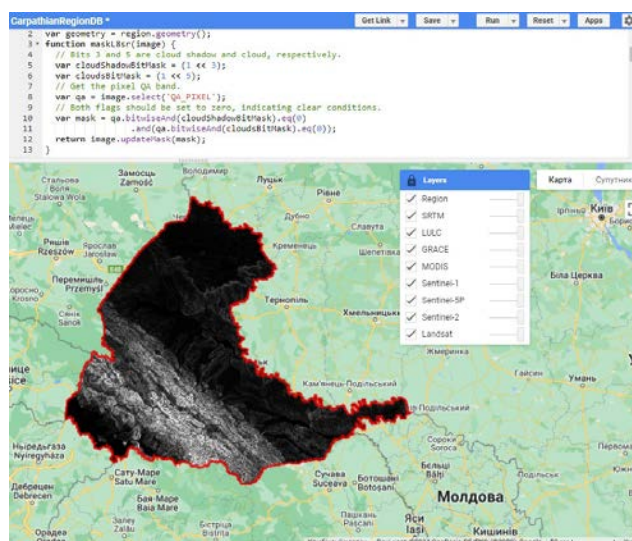


Рис. 2. Перелік шарів бази геоданих та візуалізація одного із них (цифрової моделі рельєфу території Карпатського регіону) у середовищі GEE

Створена база зберігається з використанням ресурсу Google Cloud та систематизує дані за весь доступний період спостережень, включаючи такі набори:

- 1) Sentinel-2, Landsat, MODIS – дані спостережень супутникових системи оптичного діапазону, які надають мультиспектральні зображення високої роздільної здатності для моніторингу рослинності, ґрунтів, водних об'єктів та змін землекористування;
- 2) ERA5 – атмосферні дані для аналізу кліматичних умов;
- 3) GRACE – дані про водні ресурси та зміни в масі земної поверхні;
- 4) Sentinel-5P – дані про якість повітря та концентрацію атмосферних газів;
- 5) Sentinel-1 – дані спостережень радарної системи, яка здійснює збір інформації незалежно від погодних умов і використовується для моніторингу деформацій земної поверхні, оцінки біомаси та виявлення зсувів;

6) LULC – картографічні моделі, які показують розподіл різних типів землекористування;

7) SRTM – цифрова модель рельєфу.

Для отримання більш повного уявлення про процеси, що відбуваються в Карпатському регіоні, GEE дозволяє комбінувати різні набори даних. Наприклад, для моніторингу лісів можна поєднувати оптичні зображення (Sentinel-2, Landsat) з радарними даними (Sentinel-1) для оцінки біомаси, виявлення деградації лісів та моніторингу лісових пожеж. Оцінка впливу зміни клімату можлива завдяки спільному використанню даних ERA5 з даними про температуру поверхні, отриманими із супутникових зображень Landsat, що дозволяє аналізувати тренди зміни температури та опадів. Для моніторингу зсувів може бути ефективним поєднання радарних даних (Sentinel-1) з цифровою моделлю рельєфу (SRTM) для виявлення зон підвищеної нестабільності.

Крім того, GEE надає можливість швидко та ефективно розраховувати різноманітні спектральні індекси на основі даних супутникових спостережень. Так, наприклад, використання індексів NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для оцінки стану рослинності і LST (Land Surface Temperature) для аналізу температури земної поверхні, дозволяє створювати комплексні моделі, які доцільно застосовувати для моніторингу екосистем та сільськогосподарських угідь, визначення зон теплових островів у містах, тощо (рис. 3).

Головні висновки. Використання платформи Google Earth Engine (GEE) дозволяє систематизувати великі обсяги супутникових даних і поєднувати різні типи екологічної інформації, що сприяє більш детальному та точному аналізу екологічних змін у Карпатському регіоні. Це, у свою чергу, поглиблює розуміння довгострокових процесів, таких як зміни лісового покриву, урбанізація та вплив кліматичних факторів. GEE забезпечує можливість оперативного і довгострокового моніторингу екологічних процесів, що дозволяє швидко реагувати на негативні зміни в екосистемах Карпат. Систематизація даних та їх інтеграція в моделі управління природними

ресурсами сприяє підвищенню ефективності управління лісами, водними ресурсами та біорізноманіттям, а також допомагає запобігти розвитку негативних екологічних явищ і процесів. Використання GEE значно спрощує обробку та аналіз великих масивів геопросторових даних, що знижує витрати часу і ресурсів на проведення наукових досліджень та дозволяє зосередитися на глибокому аналізі даних та інтерпретації результатів, що, в свою чергу, сприяє появі нових знань та підходів до дослідження екологічних проблем.

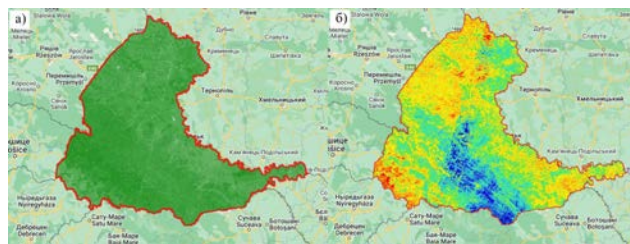


Рис. 3. Просторовий розподіл середніх значень індексів NDVI (а) і LST (б) для Карпатського регіону станом на 2022 рік

Перспективи використання результатів дослідження. Використання платформи Google Earth Engine для систематизації даних геоecологічних досліджень Карпатського регіону відкриває широкі можливості для наукового аналізу. Однак, існують певні невирішені питання, які потребують подальшого дослідження. Зокрема, це стосується недостатньої точності даних для локальних масштабів, обмеженої доступності даних про землекористування, біорізноманіття та інші важливі екологічні параметри, складності інтеграції місцевих та глобальних даних, а також недостатнього аналізу довгострокових змін, впливу антропогенних факторів і кліматичних змін на екосистеми. Крім того, необхідні подальші дослідження взаємодії між різними екосистемами регіону та розробка моделей для прогнозування майбутніх змін. Застосування нових алгоритмів і моделей, а також розробка сценаріїв майбутнього розвитку є перспективними напрямками для подальших досліджень.

Література

1. Tamiminia H., Salehi B., Mahdianpari M., Quackenbush L., Adeli S., Brisco, B. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. № 164. P. 152-170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>.
2. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Pyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing Environment*. 2017. № 202. P. 18-27.
3. Химинець В. В., Мікловда В.П., Пітюлич М.І., Гапак Н.М. Карпатський регіон у контексті сталого розвитку України. *Науковий вісник Ужгородського університету: Серія: Економіка*. 2012. № 3 (37). С. 40-45.
4. Pham-Duc B., Nguyen H., Phan H., Tran-Anh Q. Trends and applications of Google Earth Engine in remote sensing and Earth science research: a bibliometric analysis using Scopus database. *Earth Sci Inform*. 2023. № 16. P. 2355-2371. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01035-2>.
5. Zhao Q., Yu L., Li X., Peng D., Zhang Y., Gong, P. Progress and Trends in the Application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 2021. № 13. P. 3778 p. <https://doi.org/10.3390/rs13183778>.
6. Давибіда, Л. І. Аналіз можливостей і досвіду використання платформи Google Earth Engine для вирішення задач моніторингу довкілля. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2021. № 2 (24). С. 75-86. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2\(24\)-75-86](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86).

7. Lei G., Li A., Bian J., Zhang Z. The roles of criteria, data and classification methods in designing land cover classification systems: evidence from existing land cover data sets. *International Journal of Remote Sensing*. 2020. № 41 (14). P. 5062-5082. <https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1548053>.
8. Бунь Р. А., Густі М. І., Ліщенко В. І. Спеціалізована ГІС для оцінки вуглецевого балансу Карпатського регіону на базі даних дистанційного зондування Землі. *Космічна наука і технологія*. 1998. № 4 (4). С. 145-150.
9. Hazaymeh, K. M. A., Zeitoun, M. Google Earth Engine (GEE) for Modeling and Monitoring Hydrometeorological Events Using Remote Sensing Data. 2024. P. 114–134. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8771-6.CH006>.
10. Ачасов А. Б., Селіверстов О. Ю., Кот А. Г., Клещ А. А., Мельник Д. О. До питання створення відкритої екологічної геоінформаційної системи. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2022. № 38. С. 97-106. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-09>.
11. Kroumova Y., Trenkova T., Nedkov S., Ravnachka A. Operational suitability assessment of information resources for a geospatial environmental database unity. *GeoStudies*. 2024. № 1. P. 59-74. <https://doi.org/10.3897/geostudies.1.e120103>.
12. Цифрова топографічна карта України масштабу 1:100 000. *Державне підприємство «Науково-дослідний інститут геодезії і картографії» (ДП «НДІГК»)*. 2019.

УДК 504.064.2

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.13>

ПРО ДЕЯКІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ЩОДО МІНІМІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ У ДЖЕРЕЛІ ЇХ ВИНИКНЕННЯ – ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ

Волошин В.С.

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»
вул. Дм. Яворницького, 19, 49057, м. Дніпро
vsvlshn52@gmail.com

В роботі представлені деякі аргументи щодо відповідності принципу термодинамічної двоєдності в технологічних процесах другому закону термодинаміки. Такий принцип дозволяє знаходити механізми мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, в технологічному процесі. Підлеглисть цього принципу до другого закону термодинаміки в тій його частині, що стосується переносу ентропії від відкритої відходоутворюючої системи в надсистему з послідовним зустрічним переносом енергії певної якості з надсистеми для утворення умов для переробки тієї частини сировини, яка раніше отримувала статус відходів. Зручно посилатися на аргументацію І. Р. Пригожина про те, що у відкритих термодинамічних системах ентропія може мати спроможність не збільшуватися у результаті енергетичних змін в цієї системі, шляхом свого переносу в надсистему, і таким чином, звільняючи поле для тієї частини енергії, що йде на здійснення корисної роботи в цій системі. Другий закон об'єктивно охоплює не тільки дисипативні, але і зворотні репаративні процеси концентрації енергії і речовини, задля виникнення і розвитку складних відкритих систем у живій і неживій природі шляхом запозичення енергії у надсистеми. Таке розуміння формули другого закону термодинаміки дозволяє зробити висновки, які раніше не використовувалися для опису механізмів утворення відходів у виробничих системах. Надані тези про те, що існує поступова взаємна залежність між термодинамічними процесами, пов'язаними з технологіями виробництва готової продукції, та їх відходами, з одного боку, і дисипативно-репаративними взаємодіями як всередині системи, так і поза неї, з другого. Умовою для мінімізації відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі, є необхідність забезпечення перерозподілу ентропії між компонентами сировинної бази таким чином, щоб закладена в готовий продукт негентропія була спроможна до збільшення за рахунок зростання ентропії іншої матеріальної частини системи, і розповсюджувалась, в першу чергу, на ту частину сировини, якій приписуються властивості відходів. Наведено приклади та перелік процесів, для яких притаманні перерозподіли ентропії і протилежні їм процеси транзиту якісної енергії з надсистеми в систему, що дозволяє забезпечити синергізм цієї системи відносно її відходів. Показані можливості різних засобів введення додаткових та модифікованих джерел енергії в такі системи. *Ключові слова:* промислові відходи, технологічний процес, термодинамічна двоєдність, емісія ентропії, негентропія.

On some regularities of waste minimization in the source of their origin – the technological process. Voloshyn V.

The paper presents some arguments regarding the correspondence of the principle of thermodynamic duality in technological processes to the second law of thermodynamics. This principle makes it possible to find mechanisms for minimizing waste at the source of their origin, in the technological process. The subordination of this principle to the second law of thermodynamics in that part of it concerns the transfer of entropy from an open waste-generating system to a supersystem with a sequential counter transfer of energy of a certain quality from supersystems to create conditions for the processing of that part of raw materials that previously received the status of waste. It is convenient to refer to I. R. Prigogine's argument that in open thermodynamic systems entropy may not be able to increase as a result of energy changes in this system, by transferring it to the supersystem, and thus freeing up the field for that part of the energy that is used to carry out useful work in this system. The second law objectively embraces not only dissipative, but also inverse reparative processes of concentration of energy and matter, for the emergence and development of complex open systems in animate and inanimate nature by borrowing energy from supersystems. This understanding of the formula of the second law of thermodynamics allows us to draw conclusions that have not been previously used to describe the mechanisms of waste generation in production systems. The thesis that there is a gradual mutual dependence between the thermodynamic processes associated with the technologies of production of finished products and their waste, on the one hand, and dissipative-reparative interactions both inside and outside the system, on the other, are presented. The condition for minimizing waste in the source of their origin – the technological process, is the need to ensure the redistribution of entropy between the components of the raw material base in such a way that the negentropy embedded in the finished product is capable of increasing due to the increase in the entropy of the other material part of the system, and spreads, first of all, to that part of the raw material to which the properties of waste are attributed. Examples and a list of processes characterized by redistributions of entropy and opposite processes of transit of qualitative energy from the supersystem to the system are provided, which allows to ensure the synergy of this system with respect to its waste. The possibilities of various means of introducing additional and modified energy sources into such systems are shown. *Key words:* industrial waste, technological process, thermodynamic duality, entropy emission, negentropy.

Постановка проблеми. В останній час з'явилися роботи, в яких доводиться взаємозалежність між термодинамічними процесами, що супроводять технології виробництва товарної продукції та виникнення відходів. Ці дані можуть бути об'єктивними,

якщо вони можуть відповідати другому закону термодинаміки. А саме, знаходиться у відповідності до дисипативно-репаративних взаємодій що стосується відношень в ієрархічно структурованих системах. Виникає потреба в доказах про цю залежність як зна-

чушу в додатку до технологічного процесу, що може означати отримання чергового підтвердження принципу термодинамічної двоєдності як основи механізму утворення відходів у виробничих системах.

Актуальність дослідження. Проблеми мінімізації відходів на протязі останніх десятиріч змінюють свої напрямки, знаходять, на перший погляд, радикальні рішення, які мали б вирішити проблеми з накопиченням відходів на планеті, але кількість та міцність світових виробництв така, що на кожен тону старих промислових відходів від нових виробничих систем. Автори запропонували спосіб мінімізації відходів у джерелах їх походження, в технологічному процесі, що, може стати одним з актуальних методів мінімізації нових відходів, може стати орієнтиром для створення технологій, що наближені до безвідходних. І не зважаючи на додаткові витрати, пов'язані з розробкою таких технологій, цей напрямок має суттєві перспективи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні положення принципу термодинамічної двоєдності, як частковий випадок термодинамічного дуалізму, який відповідає за механізми утворення відходів в будь-яких виробничих системах, стосуються розуміння того, що один і той же технологічний процес по відношенню до певної частини компонентів сировини проявляє себе як сильно нерівноважна система і функціонує за законами нелінійної термодинаміки і, в той же час, по відношенню до іншої частини сировини проявляє себе як слабо нерівноважна, або така, що знаходиться в стані термодинамічної рівноваги, і підкоряється законам лінійної термодинаміки [1]. Як результат, в системі з'являється готова продукція та відходи, відповідно. Такий принцип повинен повністю відповідати умовам другого закону термодинаміки, що має робити його легітимним в галузях будь-яких технологічних процесів. Доречно буде звернутися на давні роботи групи І. Р. Пригожина [2, 3] та сучасні роботи [4, 5] про важливу, але не завжди враховану інтерпретацію другого закону термодинаміки. Вона полягає в тому, що, як закон природи, другий закон об'єктивно охоплює не тільки дисипативні, але і зворотні до них репаративні процеси концентрації енергії і речовини, виникнення і розвиток складних відкритих систем у живій і неживій природі, які здійснюються шляхом запозичення енергії у надсистемі. Підкреслюється дисипативно-репаративне сполучення енергетичних перетворень, що

приводить до конструктивного результату, спрямованого на зниження ентропії системи таким чином, що $ds_U = ds_f^{\pm} + ds_i^{\pm} + ds_p^{\pm} \geq 0$. Індеси «f», «i», «p» позначають складові ентропії відкритої системи, а саме визначають її форму, інтенсивність і щільність, а знак (\pm) позначає вектор зміни ентропії, що стосується відповідної енергії дисипативного і репаративного напрямків відповідно [2].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Правила перерозподілу енергії та ентропії в будь-якій системі може відбуватися тільки у відповідності до другого закону термодинаміки. Принцип термодинамічної двоєдності, як такий, що відповідає за створення умов для отримання готової продукції та відходів у будь-якому технологічному процесі, також не може відходити поза рамки другого закону термодинаміки у тій його частині, що стосується сильно нерівноважних систем. Тому аргументи щодо такої відповідності мають стати підставою для об'єктивізації цього актуального технологічного принципу і стати його додатковим підтвердженням

Новизна. Аргументовано, як відповідне другому закону термодинаміки, існування принципу термодинамічної двоєдності у технологічному процесі, як основи для механізму виникнення відходів, а саме, за рахунок переносу ентропії до надсистеми та забезпечення зустрічного транзиту енергії, спроможною по іншому впливати на ті компоненти сировини, які є потенційними відходами.

Методологічна значимість. Умовою для використання принципу термодинамічної двоєдності заради створення механізмів мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, технологічному процесі, є можливість створення зустрічних процесів переносу ентропії та транзиту енергії потрібної якості між ієрархічними структурами системи, заради перетворення частини компонентів сировини у товарну продукцію.

Виклад основного матеріалу. Енергія, що використовується в будь-якому технологічному процесі, як правило, задіяна на отримання певних запрограмованих змін у стані тієї частини сировини, з якої потім отримується корисна продукція (рис. 1). Як правило ж ми не звертаємо уваги на те, що в традиційному технологічному процесі та ж сама енергія впливає і на інші компоненти сировини, до яких вона геть не запрограмована. Такий вплив цієї енергії призводить до зростання частки ентропії ΔS_0 , що осідає в спонтанно переробленій, але «непотрібній» матеріальній частині виробництва – відходах.

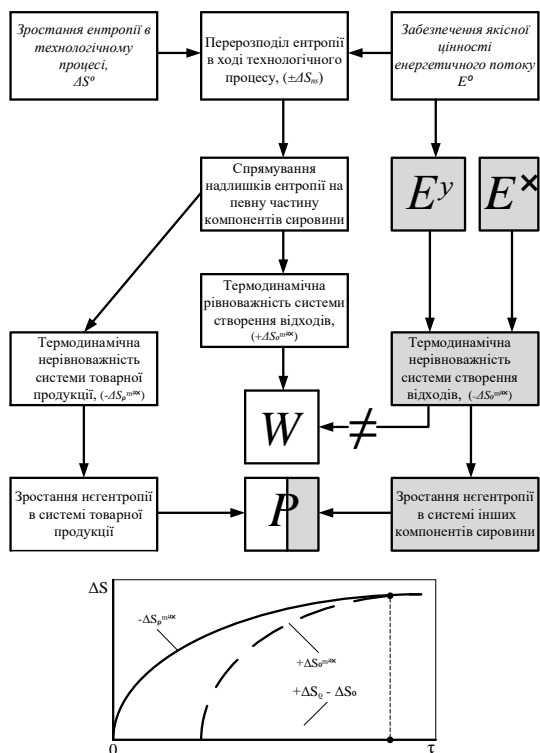


Рис. 1. Умови перерозподілу ентропії і негентропії в процесі виробництва корисних продуктів та їх графічна інтерпретація

Механізм такого перерозподілу ентропії між основними компонентами матеріальної бази складає наступне: закладена нами в готовий продукт негентропія збільшується за рахунок зростання ентропії решти матеріальної частини системи, і в першу чергу тієї, якій приписуються властивості відходів. Це й складає суть принципу термодинамічної двоєдності у будь-якій виробничій системі відносно її сировинної компонентності.

В цій його частині, якщо це стосується об'єкту аналізу ентропії – неізолюваної нерівноважної системи з певними як дисипативними, так і репаративними процесами перетворення енергії та речовин, вказаний принцип відповідає другому закону термодинаміки, який в інтегральному вигляді має бути як

$$\Delta S_k = \sum_k \Delta S_k^{\pm} \geq 0, \quad (1)$$

де ΔS_k^{\pm} відноситься до тієї з k -их властивостей, які в даній системі змінюються в дисипативному ($\Delta S_k^{\pm} > 0$) або репаративному ($\Delta S_k^{\pm} \leq 0$) напрямках.

У цьому сенсі, розуміння формули другого закону термодинаміки дозволяє зробити висновки, які раніше не використовувалися для опису механізмів утворення відходів у виробничих системах. А саме. Будь-який технологічний процес це термодинамічно незамкнута та нерівноважна система, що відносно сировини поводить себе як механізм спонтанного перерозподілу ентропії між різними компонентами сировини

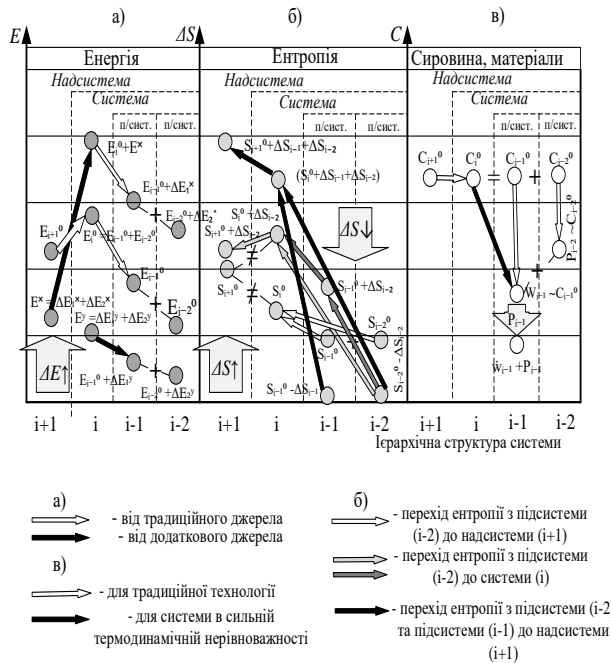


Рис. 2. Актуалізація принципу термодинамічної двоєдності та управління перерозподілами ентропії між компонентами сировини в нерівноважних системах

В результаті реалізації будь якого технологічного процесу, що має ознаки термодинамічно нерівноважної не ізолюваної системи, відбувається наступна, вже знайома нам узагальнююча реструктуризація до якої належить ця система (назвемо її i – тою системою) та яка сама має дві підсистеми ($i - 1$) – виробництво відходів та ($i - 2$) – виробництво корисної продукції, ентропії (рис. 2). Означимо, як ($i + 1$) назву надсистеми для нашого технологічного процесу. Для такої надсистеми загальна кількість ентропії ($S_{i+1}^0 + \Delta S_{i-2}$), згідно з другим законом, збільшується. Водночас відбувається перерозподіл ентропії між складовими компонентами виробничої системи, а саме: між тією, яка споживала енергію ($E_{i-2}^0 + \Delta E_2^x$) на перетворення «корисної» частини сировини у продукцію, з одного боку, і тією, для якої притаманна енергія ($E_{i-2}^0 + \Delta E_2^x$) як для «непотрібної» частини матеріального потоку сировинної бази з другого. Тут E^0 базова енергія відповідних індексам підсистем; ΔE_1^x та ΔE_2^x – часткові долі зовнішньої енергії в двох підсистемах основної системи. Як правило, перерозподіл ентропії між компонентами матеріальної бази типової виробничої системи відбувається таким чином, що закладена нами в готовий продукт негентропія збільшується за рахунок зростання ентропії решти матеріальної частини системи, і в першу чергу, тієї, якій приписуються властивості відходів (див. рис. 1). Це ще раз підтверджує існування термодинамічної двоєдності для будь-якої виробничої системи.

Якщо систему забезпечити певною внутрішньою енергією (E^y) або вона подається ззовні (E^y) з над-

системи, яка здатна перевести залишкову частину сировини по відношенню до себе в термодинамічно сильно нерівноважний стан (див. табл. 1), то можна говорити про умовну емісію частки ентропії ΔS_{i-2} з цієї системи в надсистему, з якої ця енергія вийшла. В цьому випадку в системі з'являється робота, здатна перевести розглянуту частину сировини зі складу відходів до складу товарного продукту.

Ентропія надсистеми збільшується принаймні на перерозподілену величину ентропії відходів самої системи. За певних умов така емісія ентропії з системи до надсистеми перевищує межу ентропії самої системи, і тоді в цій системі можуть спостерігатися синергетичні ефекти. Це саме той випадок, який належить принципу термодинамічної двоєдності, і який не існує супротив другого закону термодинаміки, коли в системі з'являється додаткова (E^y) або існуюча, але модифікована (E^y) енергія, яка може змінити стан тих компонентів, які при традиційних умовах перетворюються в відходи. У нашому випадку умовна робота, що виконується цією енергією, буде більше, ніж в традиційному технологічному процесі, на величину не збільшення ентропії в підсистемі ($i-1$), пов'язаної з утворенням відходів і її емісії в надсистему.

Додаткова або модифікована зовнішня енергія $E^x = \Delta E_1^x + \Delta E_2^x$ у вигляді своїх частин ΔE_1^x та ΔE_2^x в певній пропорції витрачається на дві підсистеми – ($i-1$) та ($i-2$) (див. табл. 1). Можливий варіант, коли модифікація джерела енергії здійснюється за рахунок внутрішньої енергії такої системи $E^y = \Delta E_1^y + \Delta E_2^y$ також у певній пропорції для вказаних двох підсистем.

Додаткова енергія $E^x + E^y$ отримується за умовою емісії ентропії з кожної з двох підсистем шляхом «транзиту» в надсистему ($i+1$) зі збільшенням її сумарної ентропії на величину ($\Delta S_{i-1} + \Delta S_{i-2}$). Ентропія двох наших підсистем ($i-1$) та ($i-2$) при цьому сумарно зменшується, відповідно, на ΔS_{i-1} та ΔS_{i-2} . Та й ентропія самої i -ї системи, принаймні, не збільшується. Хоча б, в кінцевому результаті, може й зменшитися на величину ($\Delta S_{i-1} + \Delta S_{i-2}$). Різниця між підведеною енергією та функціями ($f(\Delta S_{i-1})$ и $\varphi(\Delta S_{i-2})$), що нас цікавлять, її втрати у вигляді ентропії ($E^x + E^y$) – [$f(\Delta S_{i-1}) + \varphi(\Delta S_{i-2})$], це й є додаткова робота, що здійснюється в підсистемах, що отримали сильну нерівноважність. У нашому випадку це робота щодо перетворення компонентів однієї з підсистем (наприклад, відходи – підсистема ($i-1$)) в корисні продукти.

Будь-який технологічний процес спрямований на якісну зміну його матеріальної та енергетичної складової через свідоме перетворення компонентів сировинної бази. Чим нижча якість використовуваної енергії в співвідношенні опосередкованих теоретичних (e^0) і фактичних (e^ϕ) її витрат, тим вища відносна інтенсивність утворення відходів (рис. 3). І навпаки, зі зростанням якості фактично використо-

ваної енергії інтенсивність утворення відходів спадає за рахунок того, що ця енергія витрачається на переробку тієї частини сировини, яка в нормальних умовах перетворювалася би у відходи.

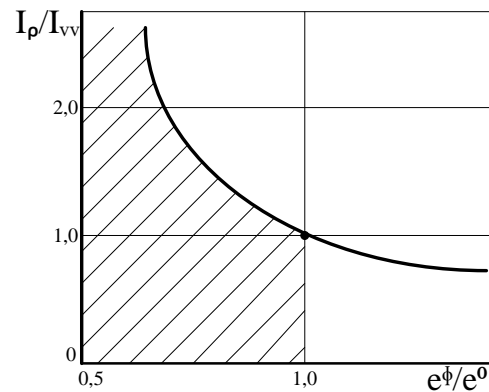


Рис. 3. Вплив структури енергоспоживання на відносну інтенсивність утворення відходів e^0 і e^ϕ – теоретично обумовлений та фактичний рівень енергоспоживання приведені до об'єму ресурсу;

I_p і I_w – інтенсивність утворення продукції та відходів, відповідно, приведена до їх маси

Раніше в наших міркуваннях ми могли бачити, що зростання негентропії виробничої системи повинно бути пов'язане з процесами перерозподілу ентропії між мінливими матеріальними компонентами системи, а також процесом загального зростання ентропії тієї ж системи, що відбувається в процесі виробничої діяльності. Причинами зростання негентропії у виробничій системі можуть бути: вдосконалення існуючих і розробка нових технологій і способів обробки сировини, нових для цього технічних засобів, інших принципів перетворення енергії в системі і т. д. Ці новітні процеси мають природні обмеження, особисті властиві кожній матеріальній системі, зокрема, що накладає другий закон термодинаміки, а також у залежності від якості використовуваної в системі енергії (див. рис. 3).

Якісне поліпшення енергії в цій частині має бути пов'язане в першу чергу з її впорядкуванням у структурі вироблених корисних продуктів за рахунок цілеспрямованої технології перетворення тільки частки сировини. Продукцію, що випускається, можна розглядати як підсистему, в структуру якої закладена якісна енергія даної виробничої системи.

На перший погляд, такі висновки слід застосувати і до перетворення іншої частини сировини, яка потім перетворюється у відходи. Однак це не так. Порядок переробки сировини, особливості фізичних, хімічних, механічних та інших процесів, що лежать в основі тієї чи іншої технології, найчастіше не сприяють використанню енергії певного типу, запозиченої ззовні, для впорядкування елементів тієї частини сировинної бази, яка стає відходами.

Якість енергії, використовуваної в процесі виробництва для перетворення цієї другої частини сировини, практично ніколи не відповідає її структурі та якості, мало впливає на якість її перетворення. Таким чином, у цю матеріальну частину системи закладається максимально можлива ентропія всього виробничого процесу (пов'язана з втратами як теплової енергії, так і неструктурованої речовини). Тому відмінною рисою системи, що відповідає за отримання відходів, може бути її термодинамічна рівноважність із максимальною ентропією (див. рис. 1).

Таким чином, основною властивістю відходів різного типу є не тільки їх низька споживча привабливість, але і те, що, потрапляючи в навколишнє середовище, вони є продуктами-носіями збільшення ентропійних процесів у цьому середовищі. У той же час будь-яка виробнича система є яскравою ілюстрацією сполучених дисипативно-репаративних процесів перетворення енергії і речовини [3]. Ми глибоко переконані, що саме вони є основою механізмів утворення відходів.

Резюмуючи вищесказане, можна зупинитися на деяких ознаках, які можна прийняти стосовно принципу термодинамічної двоєдності як відповідні до другого закону термодинаміки і впливають з нього (табл. 1).

З такого співвідношення можна зробити висновок про те, що тільки сумісна взаємодія на структуру сировини та на якість джерел енергії в технологічному процесі дозволяє досягати можливого результату, а саме, змінити особливості та якість тих компонентів сировини, що раніше потрапляли до стану відходів.

В якості нового джерела енергії, крім основного, що бере участь в даному технологічному процесі, може виступати накладене поле різної якості: *синхронізуючий енергетичний сигнал, вторинний енергетичний вплив, енергетична модуляція сильного сигналу більш слабким, резонансний ефект і т.д.*, зокрема, представлені на рис. 4. З метою підвищення ефективності енергетичного впливу в технологічному процесі існують способи його послідовної модифікації, а саме забезпечення полем протилежного знаку, змінним у часі полем, високочастотним

полем тієї ж якості, імпульсним енергетичним полем такої ж якості, як і основне. і, нарешті, поле резонансного стану по відношенню до початкового, якщо ми маємо справу зі змінними полями. Кожна з цих модифікацій дає технологам нові можливості впливати на склад вихідної сировинної бази технологічного процесу в напрямку переробки всіх її компонентів.

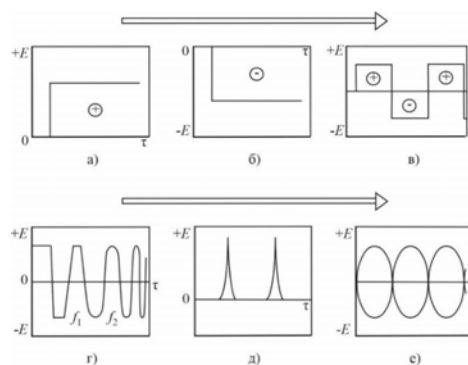


Рис. 4. Лінія розвитку характеристик енергетичної складової, що бере участь у технологічному процесі
 а) енергетичне поле постійного знаку;
 б) поле протилежного знаку;
 в) змінне енергетичне поле;
 г) високочастотне змінне поле;
 д) імпульсне енергетичне поле; е) резонансне поле

Далеко не кожна нова енергія, задіяна в технологічному процесі, дозволяє мінімізувати одержувані відходи. Наприклад, відома в металургії практика модернізації мартенівських печей в 70-х роках минулого століття продувкою пічної ванни киснем і поява нового джерела теплової енергії – теплоти екзотермічних реакцій в зоні продувки, ніяк не вплинули на необхідну якісну зміну складу і структури відходу – мартенівського шлаку, хоча і сприяли зниженню кількості чавуну, що подавалася у піч. Шлаки, як і раніше, остаються лише інструментарієм для підвищення якості одержуваної сталі нових марок і, як і раніше, відходами. Причому більшість компонентів, що вхо-

Таблиця 1

Відповідність деяких ознак принципу термодинамічної двоєдності виробничої системи другому закону термодинаміки для відкритих систем.

№ № п/п	Признак	Другий закон Термодинаміки	Відповідність у принципі двоєдності
1	Поводження енергії	Транзит енергії відкритої системи в підсистему	Потрібність у додатковій енергії для переробки відходів
2	Поводження ентропії	Не збільшення ентропії відкритої системи та її емісія в надсистему	Видалення ентропії з системи з метою мінімізації відходів
3	Дисипативні процеси	Процеси втрати якості енергії при її витрачанні	Процеси переносу ентропії з продукції на відхід
4	Репаративні процеси	Процеси запозичення енергії та мінімізація ентропії в відкритій системі	Додаткова синергія відносно стану компонентів сировини, що відносяться до відходів
5	Дисипативно-репаративні взаємодії	Проява синергізму та максимальне використання якісної енергії в системі	Використання якісної енергії як для продукції, так і для дій щодо мінімізації відходів

дили до складу чавуну (Si, Mn, P, S, V, Cr і ін.), підлягали більш інтенсивному окисненню і додатково збільшували кількість шлаку. Однак, при цьому, за рахунок зменшення потреб у чавуні, відходи в паралельній системі можна зменшити, якщо розглядати як таке доменне виробництво (доменний шлак). Але це непрямий результат. Те ж саме, як і зменшення втрат металу при продуванні і пиловидаленні, а також у вигляді корольків у зливному шлаку.

З таких позицій більш раціональним є приклад використання в доменному агрегаті нового покоління такого джерела енергії, як електричний струм і умови електролітичної дисоціації в зоні створення доменного шлаку, при спроможності для просторого розділу шлаків в нижній частині цього агрегату [1]. Безумовно, це потребує додаткових досліджень, але таке джерело здатне, принаймні, цілеспрямовано впливати на структуру доменного шлаку в напрямку мінімізації оксидів.

Ще одним прикладом є технологія розкרוлю листового металу [1], що здатна відійти від відхідної обрізі за рахунок нових джерел енергії, що використовуються в технології. Таких прикладів ще дуже обмаль, зокрема [6, 7], але вони тим більш важливі в якості

аргументації відносно мінімізації відходів у сучасних технологіях. Всі вони виглядають, як проява відомих дисипативно-репаративних процесів, в основі яких лежить емісія ентропії та скриті можливості для мінімізації відходів у будь-якому технологічному процесі.

Висновки.

1. Для досягнення можливостей щодо мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, технологічному процесі, мають бути створені умови для зміни якісної складової використовуваної енергії, мінімізувавши ентропію самого технологічного процесу, за рахунок викиду її в надсистему.

2. Встановлено, що такий механізм існує, як перерозподіл якісної енергії між надсистемою та системою з одночасним перерозподілом ентропії з підсистеми, відповідальною за появу відходів, до цієї надсистеми, яка стає енергетичним донором для нової енергії. Ця енергія повинна мати можливість особливого впливу на ту частину сировини в технологічному процесі, з якої раніше були отримані відходи.

3. При цьому більша частина сировини може бути перероблена в корисну продукцію, а найменша – у промислові відходи.

Література

1. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Видання друге, доповнене. Київ-Маріуполь. 2024. 630 с.
2. Prigogine I. Etude Thermodynamique des Phenomenes Irreversibles. These d'agregation presentee a la faculte des sciences de l'Unoversite Libre de Bruxelles (1945). Paris: Dunon 1947.
3. Prigogine I., George C. The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipativ Processes in Quantum Systems. Proceeding of the National Academy of Science. 1983. Vol. 80. P.4590-45945.
4. Чаленко О. Ю. Самоорганізація, ентропія в природі та економіці. Наука та інновації. 2013. Т. 9, № 4. – С. 13-24. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/scinn_2013_9_4_3
5. Волошин В. С. Щодо питання про методологію мінімізації відходів у джерелі їх виникнення -технологічному процесі. Екологічні науки. № 2 (53). 2024. С. 114-122.
6. Бутенко Э. О., Волошин В. С. Сучасні технології очищення стічних вод промислових підприємств. V Міжнародна науково-технічна конференція «Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг» (11-13 жовтня 2023, Україна, Львів): Збірник матеріалів – Київ, 2023. – С. 86-87.
7. Волошин В. С., Бутенко Е. Ю. Відносно питання про деякі нормативні вимоги щодо питної води. V Міжнародна науково-практична конференція «Водопостачання та водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг» 2023, Україна, Львів. С. 88-90.

УДК 502.3

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.14>

ШЛЯХ ВПРОВАДЖЕННЯ ВИМОГ ДИРЕКТИВИ 2015/2193/EU ПРО ОБМЕЖЕННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ДО СЕРЕДНІХ СПАЛЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК НАФТОГАЗОВОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

Вольчин І.А., Кривошеєв С.І.Інститут теплоенергетичних технологій
Національної академії наук України
вул. Андріївська 19, 04070, м. Київ
volchyn@gmail.com, lksi@ukr.net

Україна та країни ЄС у 2014 році підписали Угоду про асоціацію, яка передбачає гармонізацію українського екологічного законодавства з пріоритетним європейським щодо захисту навколишнього природного середовища. В 2015 р. в ЄС було прийнято екологічну Директиву 2015/2193/EU про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин в атмосферу від середніх спалювальних установок (ССУ), номінальна теплова потужність яких становить від 1 до 50 МВт. Ця директива встановлює значно жорсткіші значення граничнодопустимих викидів забруднюючих речовини (зокрема, оксидів азоту) від ССУ, ніж нині діючі в Україні нормативи граничнодопустимих викидів відповідно до наказу Мінприроди від 27.06.2006 № 309. Для нових ССУ вимоги Директиви вже діють (після 20.12.2018 р.). Для існуючих ССУ в країнах ЄС термін введення в дію вимог Директиви триватиме від 01.01.2025 до 01.01.2030 в залежності від потужності установки. Наразі в нафтогазовій галузі України експлуатуються газотурбінні та газомоторні установки, які за наявною тепловою потужністю підпадають під дію цієї Директиви. Аналіз їх фактичних викидів (зокрема, оксидів азоту) показав, що вони не завжди відповідають навіть загальним вимогам наказу № 309. Тож для ССУ в нафтогазовій галузі доцільно розробити поточні та перспективні технологічні нормативи допустимих викидів. Поточні нормативи врахують технічний стан існуючих ССУ та забезпечать правове регулювання їх діяльності до 01.01.2030, а перспективні нормативи законодавчо встановлять терміни впровадження в Україні вимог Директиви 2015/2193/EU. Виконано оцінку можливих значень поточних нормативів викидів оксидів азоту для газотурбінних установок та загалом для ССУ в нафтогазовій галузі. Перспективні нормативи відповідають вимогам Директиви 2015/2193/EU. Розглянуто можливе правове регулювання викидів монооксиду вуглецю з урахуванням діючого законодавства України. *Ключові слова:* середні спалювальні установки, газові турбіни, оксиди азоту, монооксид вуглецю, викиди, технологічні нормативи.

The way of the implementation of the requirements of the directive 2015/2193/EU on the limitation of emissions of pollutants to medium combustion plants of the oil and gas industry of Ukraine. Volchyn I., Kryvosheiev S.

In 2014, Ukraine and the EU countries signed the Association Agreement, which provides for the harmonization of Ukrainian environmental legislation with priority European legislation on environmental protection. In 2015, the EU adopted a new environmental Directive 2015/2193/EU on the limitation of emissions of certain pollutants into atmosphere from medium combustion plants (MCP), the rated thermal input of which ranges from 1 to 50 MW. This directive establishes significantly lower values of the maximum allowed emissions (in particular, nitrogen oxides) from MCP compared to the standards currently in force in Ukraine stated in the Order of the Ministry of Natural Resources dated 06.27.2006 No. 309. For new MCP the requirements of the Directive are already put in effect (after 12.20.2018). For existing MCP in the EU countries, the deadline term for implementation of the requirements of the Directive shall vary within period from 01.01.2025 to 01.01.2030, depending on the plant rated thermal input. Currently, in the petroleum and gas industry of Ukraine, gas turbine and gas engine plants are operated, which are subject to the Directive based on their nominal thermal power. The analysis of actual emissions (in particular, nitrogen oxides) from these plants showed that they do not always meet even the requirements of Order No. 309. Therefore, it is advisable for MCP in the oil and gas industry to develop current and perspective technological standards of allowed emissions. The current regulations will take into account the technical condition of the existing MCP and will ensure legal regulation of their activities until 01.01.2030, and the prospective regulations will legally establish the terms of implementation of the requirements of Directive 2015/2193/EU in Ukraine. An assessment of the possible values of the current standards of nitrogen oxide emissions for gas turbine installations and in general for SPU in the petroleum and gas industry was carried out. Prospective regulations meet the requirements of Directive 2015/2193/EU. The possible legal regulation of carbon oxide emissions is considered, taking into account the current legislation of Ukraine. *Key words:* medium combustion plants, gas turbines, nitrogen oxides, carbon monoxide, emissions, technological standards.

В Україні викиди забруднюючих речовин в атмосферу регулюються нормативними актами до Закону України «Про охорону атмосферного повітря» [1]. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України № 309 (Наказ 309) «Про затвердження

нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел» [2] було затверджено 27 червня 2006 р. Він визначає нормативи граничнодопустимих викидів норматив забруднюючих речовин для стаціонарних установок (таблиця 1).

Наказ 309 встановлює узагальнені значення нормативів граничнодопустимих викидів для всіх існуючих установок без врахування технічних та економічних можливостей операторів щодо їх досягнення. Постанова Кабінету Міністрів України № 1780 від 28.12.2001 (Постанова 1780) «Про затвердження Порядку розроблення та затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел» дозволяє, враховуючи реальний технічний стан установок, встановлення «поточних технологічних нормативів для діючих окремих типів обладнання, споруд на рівні підприємств з найкращою існуючою технологією виробництва аналогічних за потужністю технологічних процесів» [3]. При цьому має бути забезпечено «дотримання нормативів екологічної безпеки атмосферного повітря з урахуванням економічної доцільності, рівня технологічних процесів, технічного стану обладнання та газоочисних установок, вимог національного законодавства і законодавства Європейського Союзу».

Таблиця 1

Нормативи граничнодопустимого викиду

Забруднююча речовина	Норматив граничнодопустимого викиду
Ангідрид сірчистий	500 мг/нм ³ ;
Оксиди азоту (тут і далі – оксид та діоксид азоту у перерахунку на діоксид азоту)	500 мг/нм ³
Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок, недиференційованих за складом (пил)	50 мг/нм ³ ;
монооксид вуглецю	250 мг/нм ³

У нафтогазовій промисловості України експлуатується значна кількість середніх спалювальних установок (ССУ) номінальною тепловою потужністю (НТП) від 1 до 50 МВт, у тому числі 421 газотурбіна установка (ГТУ) та 214 газомотокомпресорів (ГМК). Аналіз їх фактичних викидів (зокрема, викидів оксидів азоту) показав, що вони не завжди відповідають навіть вимогам Наказу 309. Тому для такого обладнання доцільно розробити поточні та перспективні технологічні нормативи (ТН) викидів відповідно до вимог Постанови 1780. Чинні нормативні документи мають враховувати технічний стан існуючих установок та забезпечити правове регулювання їх поточної діяльності, а перспективні нормативні акти визначають терміни впровадження вимог законодавства ЄС.

Нормативи граничнодопустимого викиду забруднюючої речовини нормуються для ГТУ та ГМК на вміст кисню в сухому газі 15%.

Варіант можливих поточних та перспективних ТН викидів для ГМК запропоновано у статті [4]. Наразі цю методику розширено для газотурбінних установок та узагальнено для всіх ССУ у нафтогазовій промисловості.

Газові турбіни та двигуни нафтогазової галузі України входять до п. 1 «Переліку типів устаткування, для яких розробляються нормативи граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел» відповідно до Наказу Міністерства охорони навколишнього природного середовища України № 317 від 16.08.2004 [5]. Тому для них можлива розробка ТН допустимих викидів при виконанні умов пп. 5 і 6 Постанови 1780 [3] та визначена їй процедура:

«5. Для нових стаціонарних джерел і таких, що проектується, будуються або модернізуються, окремих типів обладнання, споруд нормативи граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин розробляються з урахуванням передових вітчизняних і світових технологій та досягнень у розробленні технологій зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря.

У разі коли законодавством Європейського Союзу для нових стаціонарних джерел і таких, що проектується, будуються або модернізуються, встановлено нормативи граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин, в Україні застосовуються норми цього законодавства.

6. Нормативи граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин для діючих стаціонарних джерел встановлюються за середніми показниками викидів, визначених для типів устаткування, де обсяги таких викидів є найменшими:

– для 12 відсотків типів устаткування – за наявності 30 чи більше типів;

– для 5 типів устаткування – за наявності менш як 30 типів».

Україна та країни ЄС у 2014 році уклали Угоду про асоціацію [6], яка передбачає узгодження українського екологічного законодавства із пріоритетним європейським правом стосовно захисту довкілля (зокрема, атмосферного повітря).

В 2015 році в Європейському Союзі була прийнята екологічна Директива 2015/2193/EU (Директива) про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин від середніх спалювальних установок (ССУ), номінальна теплова потужність (НТП) яких становить від 1 до 50 МВт [7]. Ця Директива встановлює правила контролю викидів діоксиду сірки SO₂, оксидів азоту NO_x і пилу в атмосферне повітря від ССУ, що знижує потенційні ризики для здоров'я людини і шкоди навколишньому середовищу від таких викидів. Вона встановлює також правила моніторингу викидів вище вказаних газів та оксиду вуглецю або чадного газу (СО). Директивою визначено граничні значення викиду забруднюючих речовин для нових та існуючих ССУ (для газових турбін та двигунів, значення приведені на 15% кисню в сухих димових газах).

Відповідно до Директиви після 20.12.2018 викиди в атмосферу NO_x від нової ССУ (газової турбіни або двигуна) не повинні перевищувати граничних значень викидів (мг/нм^3), які визначені у таблиці 2.

Таблиця 2

Граничні значення викидів для нових газових турбін та двигунів [7], (паливо-природний газ або інше газоподібне паливо)

Забруднююча речовина	Тип установки	Паливо	
		Природний газ	Інше газоподібне паливо
Оксиди азоту	Двигуни	95	190
	Газові турбіни	50	75

В таблиці 3 наведено граничні значення викидів (мг/нм^3) забруднюючих речовин для існуючих газових двигунів та турбін, які є чинними для ССУ із НТП не більше 5 МВт після 01.01.2030, а для спалювальних установок із НТП більше 5 МВт – після 01.01.2025. (Проте ССУ із НТП більше 5 МВт, які використовуються для приводу газових компресорних станцій і необхідні для забезпечення безпеки національної газотранспортної системи, можуть бути звільнені від дотримання вимог таблиці 3 до 01.01.2030).

Таблиця 3

Граничні значення викиду для існуючих газових турбін та двигунів [7], (паливо-природний газ або інше газоподібне паливо)

Забруднююча речовина	Тип установки	Паливо	
		Природний газ	Інше газоподібне паливо
Оксиди азоту	Двигуни	190	190
	Газові турбіни	150	200

Дані таблиці 3 є перспективними ТН викидів NO_x , які набудуть чинності і будуть обов'язковими для всіх ССУ після 01.01.2030.

Відповідно до положень Постанови 1780 визначимо значення поточних ТН викидів оксидів азоту від існуючих ГТУ нафтогазової галузі. Для цього всі установки були розділені на групи, які відрізняються типом палива (2 види) та типом паливної та розташуванням пальників (5 видів). Два види палива для ГТУ – це або промислово підготовлений для транспортування за ДСТУ природний газ, або природний газ власного видобутку підприємства невідомого складу.

Для кожного класу ГТУ і кожного палива було підраховано середнє значення та значення середнього квадратичного відхилення (СКВ) даних про величини викидів (мг/нм^3) забруднюючих речовин, які наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Викиди від газотурбінних ССУ

Тип установок	Кількість	Діапазон значень	Середнє значення	СКВ
1	2	3	4	5
Паливо-природний газ (ДСТУ)				
Забруднююча речовина – оксиди азоту				
ГПА Ц 6,3А	23	296–332	307	9,3
ГТК 10-2	138	587–784	633	43,7
ГТК 10І	83	397–468	420	15,2
ГТН 6	47	290–360	317	16,2
ГПУ 10	64	312–382	334	18,0
Забруднююча речовина – монооксид вуглецю				
ГПА Ц 6,3А	23	390–524	425	26,8
ГТК 10-2	138	485–621	528	29,8
ГТК 10І	83	241–360	247	24,8
ГТН 6	47	848–1092	944	94,1
ГПУ 10	64	373–606	435	55,0
Паливо-природний газ власного видобутку.				
Забруднююча речовина – оксиди азоту				
ГПА Ц 6,3А	34	30–450	112,4	
Забруднююча речовина – монооксид вуглецю				
ГПА Ц 6,3А	34	40–400	229,8	

Поточні ТН викидів оксидів азоту.

З урахуванням даних таблиці 4 за методикою, яка викладена у Постанові 1780, були розраховані значення поточних ТН викидів оксидів азоту для ГТУ (таблиця 5). Методика розрахунку вказана у колонці «Спосіб визначення». Оскільки значення ТН для ГПА Ц 6,3А на природному газі власного виробництва виявилось навіть кращим, ніж вимоги Директиви для існуючих установок, то значення ТН було взято з Директиви.

Таблиця 5

Значення поточних ТН викидів оксидів азоту для існуючих ГТУ

Тип ГТУ	Тип палива	Спосіб визначення	ТН, мг/нм^3
ГТН 6	Природний газ	Середнє з 6 кращих	300
ГТК 10-2	Природний газ	Середнє з 17 кращих	600
ГТК 10І	Природний газ	Середнє з 10 кращих	400
ГПА Ц 6,3А	Природний газ власного виробництва	Директива, дані Таблиці 2	200
	Природний газ	Середнє з 5 кращих	300
ГПУ 10	Природний газ	Середнє з 8 кращих	315

Об'єднання даних таблиці 5 із значеннями поточних ТН викидів оксидів азоту для існуючих ГМК з роботи [4] дозволяє створити єдину таблицю 6 поточних ТН для викидів NO_x

Таблиця 6

Значення поточних ТН викидів оксидів азоту для існуючих ССУ нафтогазової галузі України

Тип і назва ССУ	Тип палива	ТН, мг/нм ³
Газовий двигун	Природний газ власного виробництва	190
	Суміш нафтового та природного газів	2305
МК 8, 8М	Природний газ	330
10 ГК, ГKM	Суміш нафтового та природного газів	1225
10 ГKH	Природний газ	520
	Технічний пропан	1760
	Суміш нафтового та природного газів	2235
ГТН 6	Природний газ	300
ГТК 10-2	Природний газ	600
ГТК 10I	Природний газ	400
ГПА Ц 6,3А	Природний газ власного виробництва	200
	Природний газ	300
ГПУ 10	Природний газ	315

Викиди монооксиду вуглецю.

Директива не встановлює для країн ЄС поточних та перспективних ТН викидів оксиду вуглецю, запроваджуючи тільки періодичний моніторинг таких викидів (щонайменше 1 раз на рік для ССУ з номінальною тепловою потужністю понад 20 МВт та 1 раз на три роки для ССУ з номінальною тепловою потужністю від 1 до 20 МВт) [7].

Мета моніторингу – «для забезпечення того, щоб робота ССУ не призводила до погіршення якості повітря, заходи, вжиті для обмеження викидів у повітря діоксиду сірки, оксидів азоту та пилу, не повинні спричинити збільшення викидів інших забруднюючих речовин, наприклад монооксиду вуглецю» [7].

Тому виглядає доцільним для існуючих в Україні установок не встановлювати поточні ТН допустимих викидів оксиду вуглецю, а граничнодопустимі

викиди СО визначити в дозволі на викиди на рівні фактичних обсягів викидів оксиду вуглецю станом на 01.01.2025 р.

Надалі оператор ССУ має здійснювати обов'язковий періодичний моніторинг викидів оксиду вуглецю (періодичність згідно вимог Директиви) на відповідність до значень граничнодопустимих викидів СО для забезпечення того, щоб робота ССУ не призводила до наднормованого погіршення якості повітря.

Висновки

1. До 01.01.2030 граничні викиди оксидів азоту від існуючих ССУ регулюються національним законодавством, а саме вимогами Наказу 309. Проте фактичні значення викидів оксидів азоту від деяких ССУ (зокрема викиди від ГМК) значно перевищують нормативи граничнодопустимих викидів. Правове врегулювання даної проблеми можливе через розроблення та впровадження поточних ТН допустимих викидів, відповідно до Постанови 1780. Запропонований проект поточних ТН допустимих викидів урахує реальні технічні та економічні можливості операторів ССУ. Актуальність питання наразі обумовлена тим, що поточні ТН розробляються раз на 10 років, а впровадження перспективних ТН відбудеться вже 01.01.2030.

2. Директива 2015/2193/EU про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин від ССУ, яка має пріоритет над національним законодавством, вже встановила граничні значення викидів оксидів азоту в атмосферне повітря для нових ССУ (газові двигуни – 95–190 мг/нм³, газові турбіни – 50–75 мг/нм³ залежно від палива), починаючи з 20.12.2018.

3. Ця Директива також встановила граничні значення викидів оксидів азоту в атмосферне повітря для існуючих ССУ (двигуни – 190 мг/нм³, турбіни – 150–200 мг/нм³ залежно від палива) із терміном впровадження 01.01.2030.

4. Встановлення граничних значень викидів оксиду вуглецю (поточних та перспективних ТН) для ССУ в Україні недоцільне, оскільки в ЄС вони не встановлені взагалі через широкий діапазон навантажень ССУ. Відповідно до вимог Директиви 2015/2193/EU достатньо налагодити сталий періодичний моніторинг викидів СО для запобігання погіршення якості повітря.

Література

1. Про охорону атмосферного повітря: Закон України від 16 жовтня 1992 р. (із змінами) № 2707-XII / Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради України*. 1992. № 50. Ст. 678.
2. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27 червня 2006 р. № 309 «Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06> (дата звернення 25.09.2024).
3. Постанова Кабінету Міністрів України від 28 грудня 2001 р. № 1780 «Про затвердження Порядку розроблення та затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1780-2001-p> (дата звернення 25.09.2024).
4. Вольчин І.А., Кривошеєв С.І. Про регулювання викидів забруднюючих речовин від середніх спалювальних установок на газомоторних компресорах нафтогазової галузі України. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* – Київ: ДЕА, 2020. – № 1(28). – С. 24-28. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.3>.

5. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 16 серпня 2004 р. № 317 «Про затвердження Переліку типів устаткування, для яких розробляються нормативи граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1102-04> (дата звернення 25.09.2024).
6. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони. Ратифіковано із заявою Законом № 1678-VII від 16.09.2014. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011. (дата звернення 25.09.2024).
7. DIRECTIVE (EU) 2015/2193 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 25 November 2015 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from medium combustion plants. *Official Journal of the European Union*. 28.11.2015. L 313/1-19.

ЕКОСИСТЕМНІ ПОСЛУГИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ (НА ПРИКЛАДІ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

Лопушанська М.Р.^{1,2,3}, Іванов Є.А.¹, Біланюк В.І.¹,
Пилипович О.В.¹, Циганок Л.В.², Ревуцька Н.В.³

¹Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Університетська, 1, 79007, м. Львів

²Асоціація професіоналів довкілля «РАЕВ»
а/с 25, 03087, м. Київ

³ГО «Жіночий енергетичний клуб України» (WECU)
вул. Воздвиженська, 14, корп. 2, 02000, м. Київ

maria.lopushanska.agrn@lnu.edu.ua, yevhen.ivanov@lnu.edu.ua,
volodymyr.bilanyuk@lnu.edu.ua, olha.pylypovych@lnu.edu.ua,
liudmyla.paeu@gmail.com, nataliia.revutska.wecu@gmail.com

При плануванні і реалізації проектів з відновлюваної енергетики важливо застосовувати екосистемний підхід, який полягає у визначенні взаємозв'язків екосистем з людьми та іншими екосистемами, що є їхньою складовою та є нерозривним від екосистемних послуг. Під визначенням «екосистемні послуги» слід вважати усі блага, які може отримати людина (людство) від природи (природного середовища). За функціональною класифікацією виділяють такі екосистемні послуги: біотичні – забезпечувальні послуги, регулювання і технічне обслуговування, біокультурні; абіотичні – забезпечення їжею, регулювання і технічне обслуговування; культурні.

Оскільки Україна імплементує європейське законодавство, слід враховувати екосистемні послуги при плануванні та експлуатації об'єктів відновлюваної енергетики. Проте станом на сьогодні в Україні відсутнє законодавство, яке б регулювало екосистемні послуги та їх оцінку у грошовому еквіваленті. Більшість екосистем в Україні зазнали тривалого катастрофічного впливу від військової агресії, безпосереднього ведення бойових дій, замінування, пожеж тощо. Власне тому варто зберегти цінні території та зменшити вплив на них від господарської діяльності.

Надзвичайно важливо під час проектування нових об'єктів відновлюваної енергетики в Україні в цілому та у Львівській області зокрема враховувати екосистемні послуги території, яка планується для будівництва. У разі значної шкоди локальним екосистемам відмовитись від реалізації проектів на користь малоцінних територій. Власне тому, важливо на етапі стратегічної екологічної оцінки (СЕО) під час розроблення стратегії розвитку громад, територій, зонінгу, генеральних планів тощо застосовувати екосистемний підхід та картувати усі типи екосистем в межах своєї території. А на етапі проходження процедури з оцінки впливу на довкілля враховувати зазначені типи екосистем та враховувати їх під час прийняття рішення щодо реалізації проектів з відновлюваної енергетики, зокрема це найбільше стосується проектів з малої гідроенергетики і вітрової енергетики у гірській частині області. *Ключові слова:* відновлювана енергетика, екосистемні послуги, екосистемний підхід, відновлювані джерела енергії, Львівська область.

Ecosystem services in the planning and operation of renewable energy facilities (on the example of Lviv region). Lopushanska M., Ivanov Ye., Bilaniuk V., Pylypovych O., Tsyganok L., Revutska N.

When planning and implementing renewable energy projects, it is important to apply an ecosystem approach, which is to identify the interconnections of ecosystems with people and other ecosystems that are part of them and are inseparable from ecosystem services. The definition of «ecosystem services» should include all the benefits that humans (humanity) can receive from nature (the natural environment). According to the functional classification, the following ecosystem services are distinguished: biotic – provisioning services, regulation and maintenance, biocultural; abiotic – food supply, regulation and maintenance; cultural.

As Ukraine implements European legislation, it is crucial to take ecosystem services into account when planning and carrying out economic activities. However, there is currently no legislation in Ukraine that regulates ecosystem services and their monetary valuation. A large number of ecosystems in Ukraine have suffered catastrophic long-term impacts from military aggression, direct hostilities, mining, fires, etc. That is why it is necessary to preserve valuable areas and reduce the impact of economic activity on them.

It is extremely important to take into account the ecosystem services of the area to be built when designing renewable energy projects in Ukraine in general and in Lviv region in particular. In the event of significant damage to local ecosystems, projects may be abandoned in favour of less valuable areas. That is why it is important to apply the ecosystem approach at the stage of strategic environmental assessment (SEA) when developing community development strategies, territories, zoning, master plans, etc. and map all types of ecosystems within the territory. And at the stage of the environmental impact assessment procedure, take into account these types of ecosystems and consider them when making decisions on the implementation of renewable energy projects, in particular, this is most relevant for small hydropower and wind energy projects in the mountainous part of the region. *Key words:* renewable energy, ecosystem services, ecosystem approach, renewable energy sources, Lviv region.

Постановка проблеми. Під час вивчення екосистемних послуг та адаптації їх до українського законодавства виникає проблема врахування цих послуг у процесі проектування, оскільки на сьогодні відсутні законодавчі вимоги щодо такого процесу.

Актуальність дослідження. Під час реалізації проектів з відновлюваної енергетики важливо враховувати не лише енергетичний потенціал території, екологічні обмеження щодо господарської діяльності, а також екосистемні послуги, які може надавати досліджувана територія. Завдяки використанню екосистемному підходу можна досягти максимальної користі проекту при мінімальній шкоді для екосистем.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Досліджено і закартовано типи екосистем у гірських районах Львівської області за допомогою відкритого сервісу *Copernicus Global Land Service (CGLC)*.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання екосистемних послуг в Україні досліджені О. Василюк і Л. Ільмінською, які розглянули концепцію «екосистемного добробуту» [1–3], науковцями Ужгородського національного університету, які запропонували методику оцінки вартості послуг екосистем та визначили екосистемні послуги річок в Українських Карпатах [4–6], а також екологи громадських організацій, зокрема МБО «Екологія-Право-Людина» та ГО «Українська природоохоронна група» та інші науковці та дослідники, які зосереджують власні дослідження на вивченні впливу війни на екосистеми та екосистемні послуги.

Метою роботи є оцінювання екосистемних послуг об'єктів відновлюваної енергетики у Львівській області, що розглянуті на прикладі Самбірського, Дрогобицького і Стрийського районів та картування окремих типів екосистем у районах дослідження.

Новизна. У статті зазначено типи екосистем у Львівській області та їх динаміку зміни і закартовано для Самбірського, Дрогобицького і Стрийського районів. Оцінено перспективи використання досліджуваних територій для потреб відновлюваної енергетики.

Методологічне значення. Для оцінювання екосистемних послуг об'єктів відновлюваної енергетики у Львівській області використано дані попередніх наукових досліджень та методику оцінки вартості послуг екосистем [4]. Район дослідження закартовано на основі даних відкритого сервісу *Copernicus Global Land Service (CGLC)* [7]. Проаналізовано перспективи врахування екосистемних послуг під час проектування об'єктів відновлюваної енергетики у Львівській області.

Викладення основного матеріалу. Екосистемними послугами є всі корисні ресурси і вигоди, які людина може отримати від природи. Від екосистемних послуг залежить задоволення нагальних потреб людини

у довіллі і продуктах харчування, а також визначає рівень життя суспільства [1]. В інших методичних рекомендаціях визначено, що екосистемні послуги є перевагою, які людство отримує від функціонування світу природи [4]. У цілому, підсумовуючи ці два визначення можна зазначити, що екосистемні послуги слід вважати усі блага, які може отримати людина (людство) від природи (природного середовища).

За останні десятиліття концепція екосистемних послуг набула широкого застосування у країнах Європейського Союзу, зокрема під час розроблення національних і регіональних політик, проходження процедур з оцінки впливу на довкілля та стратегічної екологічної оцінки [4, 5]. Господарська діяльність може призвести до втрати екосистемних послуг, компенсувати які вкрай важко і надто дорого [4].

Всі екосистемні послуги є безкоштовними, проте щоб визначити масштаби їхньої втрати використовують монетизацію, тобто оцінювання у грошовому еквіваленті. Проте, поки відсутні на законодавчому рівні як екосистемні послуги, так і їхня монетизація [1].

Для розуміння різновидів екосистемних послуг використовується їхня функціональна класифікація, зокрема в останній версії міжнародної класифікації послуг екосистем *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES V5.1)* виділені такі екосистемні послуги [4, 5, 8]:

– *біотичні* – забезпечувальні послуги (біомаса, генетичний матеріал з усієї біоти); регулювання і технічне обслуговування (регулювання фізичних, хімічних і біологічних умов, перетворення біохімічних або фізичних входів в екосистеми), біокультурні (непряма, віддалена, часто внутрішня взаємодія з живими системами, які не потребують присутності у середовищі, безпосередня взаємодія із ситуацією та з живими системами, що залежить від присутності в середовищі);

– *абіотичні* – забезпечення їжею (вода, неводні природні абіотичні результати екосистем); регулювання і технічне обслуговування (регулювання фізичних, хімічних і біологічних умов, перетворення біохімічних або фізичних вкладів в екосистеми, інший вид регулювання та обслуговування абіотичних процесів);

– *культурні* – непряма, віддалена, часто внутрішня взаємодія з фізичними системами, які не потребують присутності у середовищі, безпосередня взаємодія на місці та назовні з природними фізичними системами, які потребують присутності в середовищі, інші абіотичні характеристики природи, що мають культурне значення.

Так, для оцінки екосистемних послуг слід здійснити картування території. Зокрема в основі типології екосистем для картування взято запропоновану робочою групою *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services (MAES)* типологію екосистем, які виділяють 12 головних типів, які виділені на основі вищих рівнів класифікації оселищ *European Nature Information System (EUNIS)* [4].

Зокрема на першому рівні *MAES* виділяє три категорії екосистем: наземні, прісноводні і морські. На другому рівні у межах наземних екосистем виділяють сім типів екосистем, зокрема урбанізовані території, орні землі, пасовища, ліси і лісовкриті площі, пустирі і чагарники, незаросла земля і водно-болотні угіддя. На цьому рівні у прісноводних екосистемах виділяють один тип екосистеми – річки та озера, для морських екосистем виділяють чотири типи екосистем: морські затоки і перехідні води, прибережна зона, шельфова зона і відкритий океан [4].

Для Львівської області властиві наземні і прісноводні категорії екосистем.

Картування типів екосистем здійснено на основі геоданих відкритого сервісу *Copernicus Global Land Service (CGLS)*. Зокрема, цей сервіс відображає щорічні зміни наземного покриття з 2015 по 2019 роки. Вихідні дані для цього сервісу є супутникові спостереження *PROBA-V*. Також, за допомогою цього відкритого сервісу є відображення класів поверхні відповідно до системи класифікації земельного покриття *The Land Cover Classification System (LCCS)* ООН ФАО, які є співставними з класифікацією *MAES*. Карту типів екосистем для Самбірського, Дрогобицького і Стрийського районів розроблено з використанням цього сервісу [4].

Згідно з геоданими відкритого сервісу *CGLS* [7] майже половину типів екосистем Львівської області становлять ліси і лісовкриті площі (49,5%). На орні землі припадає 39,7%, на пасовища – 5,65% та на урбанізовані території – 4,2%. За період 2015–2019 рр. простежується тенденція щодо скорочення таких типів екосистем як ліси і лісовкриті площі (0,05%), пасовища (0,05%). Водночас спостерігаємо незначне збільшення урбанізованих територій (0,02%) і трав'янистих водно-болотних угідь (0,07%) (рис. 1).



Рис. 1. Динаміка типів екосистем Львівської області у 2015–2019 рр. (складено за геоданими *CGLS*)

Станом на 1 січня 2020 р. загальна площа земельного фонду Львівської області становила 2 183,1 тис. га, з них землі сільськогосподарського призначення займали 1 241,5 тис. га (56,9% загальної площі території області), ліси і лісовкриті площі – 703,0 тис. га (32,2%); забудовані землі – 162,0 тис. га (7,4%); землі під водами – 42,3 тис. га (1,9%); інші землі – 34,3 га (1,6%) [9].

Для визначення екосистемних послуг об'єктів відновлюваної енергетики у Львівській області обрано три сусідні райони – Самбірський, Дрогобицький і Стрийський. На прикладах цих районів можна визначити екосистемні послуги гірських і передгірних територій області. Гірська частина Львівської області має достатні передумови для розвитку вітрової енергетики, а передгірна – сонячної енергетики [10]. Проте, під час проектування нових та експлуатації існуючих об'єктів відновлюваної енергетики варто враховувати екосистемні послуги території та дотримуватись всіх обмежень, зокрема щодо природоохоронних територій та об'єктів Смарагдової мережі, близькості до водних об'єктів чи житлової забудови [11, 12].

У межах гірської частини Львівської області переважають ліси і лісовкриті площі. На передгірних територіях досліджуваних районів переважають орні землі, пасовища та урбанізовані території (рис. 2).

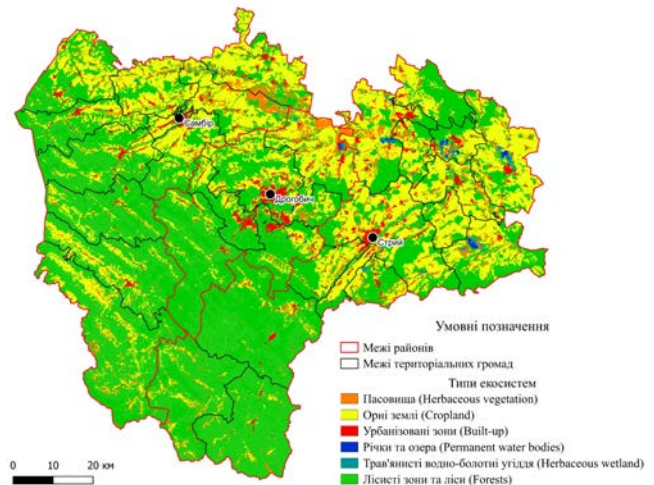


Рис. 2. Типи екосистем у гірських і передгірних районах Львівської області (складено за геоданими *CGLS*)

Згідно з класифікацією *CICES V5.1* екосистемні послуги природних екосистем Львівської області розділено за типологією картування екосистем *MAES* та оцінено у грошовому еквіваленті [4]. Оскільки найбільша частка припадає на ліси і лісовкриті площі розглянемо на їх прикладі.

1. *Біотичні послуги*. Забезпечувальні послуги: обсяг збору дикорослих ягід або дикорослих грибів, обсяг заготівлі ділової деревини, обсяг заготівлі дров, надлишок популяції мисливських тварин, який можна використовувати. Регуляційні і підтримувальні послуги: здатність рослинності запобігати або зменшувати ерозію ґрунту, зменшення шкоди і пов'язаних з цим витрат від надходження наносів у водотоки, здатність рослинності утримувати воду та повільно її віддавати, наявність екологічних умов (середовищ існування), необхідних для підтримки популяцій

видів, депонування сполук вуглецю у наземних екосистемах (торф, деревина, ґрунт).

2. *Абіотичні послуги*. Забезпечувальні послуги: Пряма взаємодія на місці та на відкритому повітрі з живими системами, яка залежить від присутності у навколишньому середовищі. Послуги: піший і велотуризм, гірський туризм, скі-тури, бірдовотчінг, екотуризм. Розрахунок послуг можна виконувати за допомогою програмного додатку *i-Tree*, зокрема *i-Tree Eco* [13, 14]. Найбільший вплив на водні екосистеми має будівництво малих гідроелектростанцій. Тому важливо оцінювати екосистемні послуги річок та інших водних об'єктів перед плануванням об'єктів при розрахунку загального гідроенергетичного потенціалу. Серед екосистемних послуг, які можуть надавати річки варто виділити [4, 6, 15]: Забезпечувальні послуги: біомаса (вирощування риби у риборозплідниках); вода (якісна питна вода, об'єм і характеристики водоносного горизонту, питна вода у системі комунального водопостачання, мінеральна вода); виходи неводної природної абіотичної екосистеми (піщано-гравійна суміш). Регуляційні і підтримувальні послуги: регулювання фізичних, хімічних і біологічних умов (підтримка життєвого циклу, захист середовища проживання та генофонду, здатність до самоочищення, аерація води, забезпечення сезонної міграції для водних організмів, рівень ґрунтових вод, підтримання високого біорізноманіття гідробіонтів тощо регулювання якості повітря, малий кругообіг води, сезонне зволоження заплавлених екосистем тощо).

3. *Культурні послуги*. Пряма взаємодія на місці та на відкритому повітрі з живими системами, яка залежить від присутності в навколишньому середовищі. Послуги: рафтинг, байдарки, серфінг, купання, рекреація, спортивна риболовля.

Надзвичайно важливо під час проектування об'єктів відновлюваної енергетики в Україні в цілому та у Львівській області зокрема враховувати екосистемні послуги території, яка планується для будівництва. У разі значної шкоди локальним екосистемам відмовитись від реалізації проектів на користь менш цінних територій. Саме тому, важливо на етапі стратегічної екологічної оцінки (СЕО) під час розроблення стратегій розвитку громад, територій, зонінгу, генеральних планів тощо застосовувати екосистемний підхід та картувати всі типи екосистем у межах власної території. А на етапі проходження процедури з оцінки впливу на довкілля враховувати зазначені типи екосистем та враховувати їх під час прийняття рішення щодо реалізації проектів з відновлюваної енергетики, зокрема це найбільше стосується проектів з малої гідроенергетики та вітрової енергетики у гірській частині області.

Висновки. Пропонуємо на розгляд такі головні висновки:

1. Під час проектування та експлуатації об'єктів відновлюваної енергетики надзвичайно важливим є врахування екосистемних послуг території, де здійснюється планована діяльність, або яка може зазнати впливу від діяльності цих об'єктів.

2. Львівська область володіє сприятливими умовами для розвитку відновлюваної енергетики у регіоні, саме тому важливо проаналізувати і закартувати територію за різними типами екосистем та оцінювати екосистемні послуги вже на етапі планування проекту.

3. Найпоширенішими типами екосистем у гірській частині області є ліси і лісовкриті площі, а у передгірній частині – орні землі і пасовища. Для лісів і лісовкритих площ розглянуто набір екосистемних (біотичних, абіотичних і культурних) послуг.

Література

1. Василюк О., Ільмінська Л. Екосистемні послуги: огляд / БО «БФ «Фонд захисту біорізноманіття України». Київ, 2020. 84 с. URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2020/09/EcoPoslugy_web_new.pdf (дата звернення: 29.08.2024).
2. Василюк О., Варуха А., Куземко А. та ін. Екосистемний добробут: методика обрахунку екосистемних послуг непрямыми методами. Чернівці, 2023. 184 с. URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2023/09/ekosyst-dobr_2023.pdf (дата звернення: 29.08.2024).
3. Ільмінська Л. Заплення рослин комахами. Екосистемні послуги / БО «БФ «Фонд захисту біорізноманіття України». Київ, 2020. URL: https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2020/08/EcoPoslugy_Zapylennya_pr5_str.pdf (дата звернення: 29.08.2024).
4. Гаврилюк Р., Станкевич-Волосянчук О., Савченко С. Екосистемні послуги та гідроенергетика: пілотне застосування європейських інструментів у річкових басейнах країн Східного партнерства. Кейс України / Національний екологічний центр України. Київ, 2021. 32 с.
5. Станкевич-Волосянчук О., Гаврилюк Р., Шаравара В. Екосистемні послуги гірських річок Українських Карпат. Ужгород: РІК-У, 2019. 32 с.
6. Copernicus Global Land Service (CGLC). Global Land Cover. Land Cover Classification: Відкрий сервіс. URL: <https://viewer.vito.be/2015/Ukraine/L'viv's'ka> (дата звернення: 29.08.2024).
7. Common International Classification of Ecosystem Services. CICES V5.1. URL: <https://cices.eu/> (дата звернення: 29.08.2024).
8. Лопушанська М.Р., Іванов Є.А. Кліматичні чинники та їхня роль у розвитку сонячної енергетики у Львівській області. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / гол. ред. О. І. Бондар. Київ: Видав. дім "Гельветика", 2022. № 6 (45). С. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.27>.
9. Статистичний щорічник Львівської області за 2021 рік. Ч. 2. Землі Львівської області. Львів: Головне управління статистики у Львівській області, 2022. 127 с.
10. Лопушанська М.Р., Іванов Є.А., Циганок Л.В., Вишва А.М., Абдуллаєв Ф.Ш. Екологічні обмеження розвитку вітрової енергетики у гірській частині Львівської області. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали*

XXV-ї міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 22–24 травня 2024 р.). Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. С. 301–302.

11. Ivanov Ye., Lopushanska M., Teslovych M. Environmental restrictions of planning the construction of renewable energy facilities in the Lviv region. *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022»* (October 3–5, 2022, Lviv, Ukraine). DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022590068>.
12. i-Tree Eco. Tools for Assessing and Managing Forest & Community Trees. URL: <https://www.itreetools.org/tools/i-tree-eco> (дата звернення: 29.08.2024).
13. Бондар О.Б., Мельник Є.С., Бицюра Л.О. та ін. Оцінювання екосистемних послуг зелених насаджень парку культури і відпочинку ім. Т. Шевченка (м. Кременець) з використанням інструменту I-Tree Eco. *Український журнал природничих наук: науковий журнал* / гол. ред. М. Овчаренко. Житомир : Вид-во Житомир. держ. ун-ту ім. І. Франка, 2023. № 4. С. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.5.2023.12>.
14. Лопушанська М.Р., Іванов Є.А. Гідрологічні чинники та їхня роль у розвитку відновлюваної енергетики у Львівській області. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / гол. ред. О. І. Бондар. Київ: Видав. дім “Тельветика”, 2023. № 4 (49). С. 105–113. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.14>.

ЕКОЛОГО-БЕЗПЕКОВІ ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ КОТЕЛЬНИХ УСТАНОВОК ПІДПРИЄМСТВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Сірик А.О., Євтушенко О.В.

Національний університет харчових технологій

вул. Володимирська, 68, 01601, м. Київ

01033sao@gmail.com, 0677389857@ukr.net

У роботі проаналізовано вплив викидів забруднюючих речовин при експлуатації промислових котельних установок харчових підприємств на довкілля. Розуміння проблем забруднення навколишнього середовища під час експлуатації промислових котельних установок, дозволить запропонувати заходи, які необхідно вжити для зменшення тиску на навколишнє середовище та мінімізацію негативного впливу на здоров'я працівників котельень. Робота промислових котельних установок є необхідною складовою забезпечення харчового виробництва всіма видами теплової енергії. Головним джерелом газопилових викидів від котельні є викиди частинок димових газів, які утворюються під час спалювання палива. З труб ТЕС в атмосферу викидається велика кількість оксидів сірки і азоту, дрібних твердих частинок золи, шлаку, повністю не згорілого палива. Одним з найбільш сучасних та ефективних підходів очищення димових газів від оксидів азоту є застосування амонійних сполук, що дозволяє об'єднати системи напісвоного сіркоочищення та системи селективного некаталітичного відновлення в одну комплексну систему газоочищення димових газів, що в свою чергу знижує викиди парникових газів та токсичних речовин. Але, при застосуванні сумішей амоніаку та водню, виникає необхідність розробки та впровадження менеджменту безпеки праці на робочих місцях у приміщеннях котельні з урахуванням фізичних, хімічних та біологічних шкідливих факторів, так як амоніак є потенційно небезпечним при потрапленні у повітря робочої зони, якщо його значення перевищують гранично допустимі концентрації. Запропоновано заходи щодо попередження ризику потраплення амоніаку у робочу зону котельні з урахуванням вимог стандарту ISO 45001 «Системи менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці». Отримані результати можуть бути використані при створенні інформаційного забезпечення системи екоменеджменту на підприємствах харчової промисловості в частині розробки систем управління та контролю екологічної безпеки. В цілому робота присвячена актуальній проблемі у сфері екології та безпеки праці у галузі дослідження роботи промислових котельних установок, зокрема ті що експлуатуються підприємствами харчової промисловості. *Ключові слова:* викиди, екологічна безпека, безпека праці, котлоагрегат, котельня, працівник.

Environmental and safety features of operation of industrial boiler plants at food industry enterprises. Siryk A., Yevtushenko O.

The paper analyzes the impact of pollutant emissions during operation of industrial boiler plants of food enterprises on the environment. Understanding the problems of environmental pollution during the operation of industrial boiler plants will allow us to propose measures that must be taken to reduce the pressure on the environment and minimize the negative impact on the health of boiler plant workers. The work of industrial boiler plants is a necessary component of providing food production with all types of heat energy. The main source of gas and dust emissions from the boiler house is the emission of flue gas particles, which are formed during fuel combustion. A large amount of sulfur and nitrogen oxides, small solid particles of ash, slag, and completely unburned fuel are emitted into the atmosphere from the pipes of the thermal power plant. One of the most modern and effective approaches to cleaning flue gases from nitrogen oxides is the use of ammonium compounds, which allows combining semi-dry desulfurization systems and selective non-catalytic reduction systems into one complex flue gas cleaning system, which in turn reduces emissions of greenhouse gases and toxic substances. But, when using mixtures of ammonia and hydrogen, there is a need to develop and implement occupational safety management at workplaces in the premises of the boiler room, taking into account physical, chemical and biological harmful factors, since ammonia is potentially dangerous when it enters the air of the working area, if its values exceed the maximum permissible concentration. Measures are proposed to prevent the risk of ammonia entering the working area of the boiler room, taking into account the requirements of the ISO 45001 standard "Occupational Health and Safety Management Systems". The obtained results can be used in the creation of information support of the eco-management system at food industry enterprises in the part of the development of environmental safety management and control systems. In general, the work is devoted to the current problem in the field of ecology and labor safety in the field of research into the operation of industrial boiler plants, in particular those operated by food industry enterprises. *Key words:* emissions, environmental safety, labor safety, boiler unit, boiler house, worker.

Постановка проблеми. Проблема забруднення навколишнього середовища при експлуатації промислових котельних установок, зокрема на підприємствах харчової промисловості, є важливим завданням сьогодення [1–5, 13, 15]. Сучасні природоохоронні вимоги ставлять на порядок денний перед промисловцями та науковцями в сфері екології та безпеки праці акту-

альні питання наближення до європейських значень та вимог міжнародних Директив скорочення викидів забруднюючих речовин та парникових газів при експлуатації котельних агрегатів, зокрема на підприємствах харчової промисловості. Це співпадає з планами України до вступу до Європейського Союзу. Промислова теплоенергетична установка, що пра-

цює на вугільному паливі, має відповідати принципу HELE – High Efficiency and Low Emission (високої ефективності та низьких викидів). Для дотримання Європейських екологічних вимог, через зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, котельні установки повинні оснащуватися новітніми системами очищення від забруднюючих речовин [1–4].

Водночас, із запровадженням модернізованих, екологічно спрямованих систем для роботи котельних агрегатів, виникає потреба зосередити увагу на безпеку процесів праці з урахуванням вимог законодавства України.

Актуальність дослідження. Робота промислових котельних установок є необхідною складовою забезпечення харчового виробництва всіма видами теплової енергії. Однак, від роботи котлоагрегатів на підприємствах харчової промисловості спостерігаються викиди забруднюючих речовин у атмосферу, які мають негативний вплив на довкілля і здоров'я людей, що є однією з екологічних загроз. Головним джерелом газопилових викидів від котельні є викиди частинок димових газів, які утворюються під час спалювання палива. З труб ТЕС в атмосферу викидається велика кількість оксидів сірки і азоту, дрібних твердих частинок золи, шлаку, повністю не згорілого палива.

Тому, дедалі більшої актуальності набувають сучасні методи зниження викиду діоксиду сірки при роботі котельних агрегатів з використанням напівсухих технологій сіркоочищення, оскільки такі технології мають достатню ефективність видалення SO_2 та невеликі капітальні й експлуатаційні затрати. Водночас ці методи (речовини) можуть чинити негативний вплив здоров'я працівників від їх можливих викидів за умови порушення норм безпеки при експлуатації або несправності обладнання у котельні.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Розглянута тема відповідає актуальним науковим дослідженням у сфері екології та безпеки праці в Україні у галузі дослідження роботи промислових котельних установок, зокрема ті, що експлуатуються підприємствами харчової промисловості. Слід зазначити, що з 15 грудня 2010 року в Україні ратифіковано Протокол «Про приєднання України до Договору про заснування Енергетичного Співтовариства», де Україна зобов'язалася адаптувати національне законодавство в сфері енергетики та довкілля, одним із завдань якого є захист навколишнього середовища. В Договорі передбачено, що після 31 грудня 2017 року всі великі спалювальні установки (котлоагрегати) потужністю більше 50 МВт держав-членів Договору мають відповідати вимогам Директиви 2001/80/ЄС про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин в атмосферу від великих спалювальних установок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізом екологічних аспектів діяльності хар-

чових підприємств, у тому числі дослідженням викидів при роботі котельних агрегатів, займалися І. Вольчин [1–4, 11, 14], Л. Гапонич [11], Згоран І. [11], Пшибильській В. [1–4, 14], Д. Олива [12], Т. Мостенська [13], та ін. У проаналізованих наукових працях не виділені конкретні екологічні особливості, зумовлені роботою промислових котельних підприємств харчової промисловості з урахуванням забезпечення безпечних умов праці працівників, які обслуговують котлоагрегати. Це зроблено авторами вперше, що підсилює наукову цінність та практичне значення цієї роботи.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Основною задачею науковців в сфері екології є зменшення забруднення навколишнього середовища, зокрема при роботі котлоагрегатів на промислових об'єктах, з урахуванням безпеки праці на робочих місцях. Один із способів зниження забруднення при експлуатації котельних установок є застосування амонійних сполук та ефективних системи сіркоочищення, враховуючи можливий негативний вплив на здоров'я працівників від викидів амоніаку, за умови порушення норм безпеки при експлуатації або несправності обладнання у котельні.

Новизна. Новизна дослідження полягає у комплексному дослідженні викидів речовин, які забруднюють повітря при експлуатації котлоагрегатів харчових підприємств. Результати наукової роботи дадуть змогу впроваджувати відповідні заходи щодо мінімізації впливу шкідливих речовин на навколишнє природне середовище та обґрунтувати управлінські рішення забезпечення безпечних умов праці працівників котельні.

Методологічне або загальнонаукове значення. Великого значення в енергетиці, за умови роботи складного енергетичного обладнання, зокрема на харчових підприємствах, набуває екологічно-безпечковий аспект експлуатації котлоагрегатів. Ці установки необхідні в різних промислових процесах, включаючи безпосереднє виробництво харчової продукції, виробництво електроенергії та опалення.

Разом з тим, при спалюванні твердого палива котельними агрегатами підприємств харчової промисловості є те, що з димовими газами в атмосферу надходить летуча зола, частинки якої містять вуглець, сірку, діоксид кремнію, оксиди алюмінію та заліза, деякі органічні сполуки, важкі метали та інші хімічні елементи. Одним із найбільш токсичних газоподібних викидів енергоустановок при спалюванні вугілля та мазуту є діоксид сірки SO_2 , що становить 98–99% викидів сірчастих сполук котельних. Склад і кількість продуктів згорання органічних палив у топках котлів харчових підприємств можуть змінюватися залежно від умов згорання, якості палива та ефективності системи згорання [5]. Якщо разом з вугіллям в топку ТЕС потрапляє порожня порода, яка містить в своєму складі домішки природ-

них радіоактивних елементів, то має місце радіоактивне забруднення атмосфери і земної поверхні, яке може набагато перевищувати можливе радіоактивне забруднення при експлуатації АЕС [6–9].

Метою статті є дослідження екологічних особливостей при експлуатації промислових котельних установок харчових підприємств з урахуванням забезпечення безпечних умов праці працівників котелень.

Виклад основного матеріалу. Усі процеси, пов'язані зі спалюванням органічних видів палива у котельних установках різної потужності, є джерелами забруднюючих речовин. Значну роль при роботі теплоенергетичного обладнання підприємств харчової промисловості є дослідження характеристик їх викидів у навколишнє середовище та негативний вплив газових викидів, аерозолів, оксидів металів які утворюються під час спалювання органічних палив в енергетичних установках. Кількість продуктів згорання органічних палив у топках котлів харчових підприємств можуть змінюватися залежно від умов згорання, якості палива та ефективності системи згорання. Означені питання викликають занепокоєння, саме тому їм повинна приділятися ретельна увага. Необхідно впроваджувати і підтримувати вітчизняні та Європейські стандарти й законодавство, спрямовані на обмеження шкідливих викидів у повітря.

Однією з найбільш складних для імплементації директив як в інституціональному, так і в вартісному плані є Директива 2010/75/ЄС «Про промислові викиди» (інтегроване запобігання та контроль забруднення), яка охоплює базові сфери промисловості, що системно впливають на показники якості навколишнього середовища [10].

На рис. 1 зазначені основні екологічні проблеми при експлуатації промислових котельних установок, що пов'язані із застарілим обладнанням, яке експлуатується на підприємствах харчової промисловості, а саме відсутністю ефективних установок сірко-

газоочищення, а також систем пилоочищення. Склад і кількість продуктів згорання органічних палив у топках котлів харчових підприємств досліджено у роботі [5].

Для дотримання вимог сучасних вітчизняних та Європейських екологічних стандартів при експлуатації промислових котельних установок підприємств харчової промисловості, зокрема що працюють вугіллі, необхідно впроваджувати ефективні технології очищення димових газів. Одним із найбільш ефективних підходів є застосування амонійних сполук, що дозволить об'єднати системи напівсухого сіркоочищення та системи селективного некаталітичного відновлення в одну комплексну систему газоочищення димових газів. Використання амоніаку як екологічно чистого палива для енергетичних установок дозволить знизити викиди парникових газів та токсичних речовин [1–4]. У роботі [11] автори визначають необхідний ступінь сіркоочищення димових газів та пріоритетний метод сіркоочищення для впровадження на ТЕС України.

З іншого боку, розглядаючи питання експлуатації теплоенергетичного обладнання підприємств харчової промисловості та вирішення питань зменшення екологічного навантаження при застосуванні сумішей амоніаку та водню, виникає необхідність розробки та впровадження менеджменту безпеки праці на робочих місцях у приміщеннях котельні з урахуванням фізичних, хімічних а також біологічних шкідливих та небезпечних факторів. Так, до хімічних факторів, при обслуговуванні промислових котельних установок належать: викиди шкідливих газів – оксиди азоту (NO_x), діоксид сірки (SO_2), окис вуглецю (CO) та інші токсичні речовини, які можуть виділятися під час роботи котельних установок, вдихання цих газів працівниками може призвести до отруєнь, подразнення дихальних шляхів та інших серйозних проблем зі здоров'ям. Амоніак є потенційно небезпечним для працівників котель-

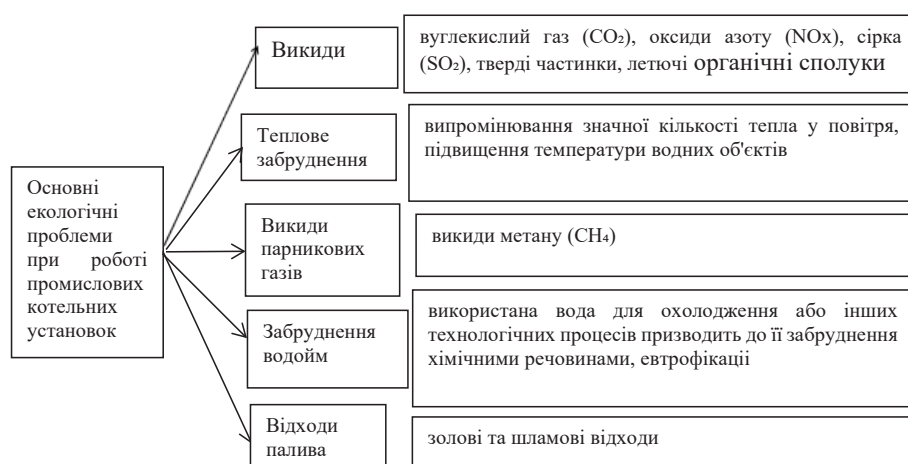


Рис. 1. Основні екологічні проблеми при експлуатації промислових котельних установок

них, якщо він потрапляє в повітря робочої зони та його значення перевищують гранично допустимі концентрації. Викиди амоніаку можуть відбуватися при несправності обладнання або порушенні норм безпеки. Амоніак є агресивною хімічним речовиною для людини, яка при контакті може викликати серйозні опіки очей і шкіри. Тривале або інтенсивне вдихання амоніаку може спричинити головний біль, запаморочення, втрату координації та навіть втрату свідомості. При постійному впливі низьких концентрацій амоніаку можуть виникати хронічні проблеми зі здоров'ям, включаючи астму, бронхіт та інші захворювання дихальної системи. Для мінімізації ризиків негативного впливу на працівників необхідно передбачити заходи, що виключають або зменшують їх показники до допустимих меж, проводити регулярні перевірки обладнання, за потреби використовувати засоби індивідуального захисту, а також встановлювати ефективні системи вентиляції, що запобігатиме накопиченню амоніаку у повітрі. Вище запропоновані заходи враховують вимоги стандарту ISO 45001 «Системи менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці», що був розроблений для проактивного підходу до здоров'я працівників та спирається на попереджувальні дії. Стимулом до впровадження Системи менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці на підприємствах харчової промисловості може бути легкість її інтеграції з Системою екологічного менеджменту згідно з ISO 14001 а також Системою управління якістю згідно з ISO 9001.

Головні висновки. Встановлено, що процеси, пов'язані зі спалюванням органічних видів палива у котельних установках різної потужності, є джерелами забруднюючих речовин. Зокрема, значне екологічне навантаження на екосистему спричиняють викиди при

роботі теплоенергетичного обладнання підприємств харчової промисловості, які утворюються під час спалювання органічних палив в енергетичних установках. Тому, для дотримання вимог сучасних вітчизняних та Європейських екологічних стандартів при експлуатації промислових котельних установок підприємств харчової промисловості необхідно впроваджувати і підтримувати стандарти та законодавство, спрямовані на обмеження шкідливих викидів у повітря.

Розглянуто підходи до очищення димових газів від оксидів азоту на основі застосування сумішей амоніаку та водню, з урахуванням менеджменту безпеки праці на робочих місцях у приміщеннях котельні. Адже амоніак є потенційно небезпечним для працівників котельних, якщо він потрапляє у повітря робочої зони та його значення перевищують гранично допустимі концентрації. Тому, для попередження ризику потрапляння амоніаку у робочу зону котельні необхідно проводити регулярні перевірки обладнання, вміст шкідливих речовин у повітрі робочої зони, аудит з охорони праці, а також встановлювати ефективні системи вентиляції, що запобігатиме накопиченню амоніаку у повітрі.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані при створенні інформаційного забезпечення системи екоменеджменту на підприємствах харчової промисловості в частині розробки систем управління та контролю екологічної безпеки.

Перспективним напрямком подальших досліджень у сфері еколого-безпекових особливостей експлуатації промислових котельних установок підприємств харчової промисловості може бути широке коло питань щодо розроблення методів зниження екологічного навантаження на екосистему з урахуванням безпеки праці працівників котельні.

Література

1. Volchyn I., Cherevatskyi D., Mokretskyy V., Pzybylski W. Creating the Holdings of Nuclear Power Plants and/or Renewable Energy Sources with Ammonia Production Plants on the Base of Circular Economy. Eds. Prof. Nasser S. S Awwad and Dr. Hamed Majdooda Algarni. *Nuclear Power Plants – New Insights*, 2023. Chapter 5.
2. Volchyn I., Mokretskyy V., Pzybylski W. Experimental Study of REDUXCO Fuel Additive Impact on Coal Boiler Performance, Efficiency and Emissions. Ed. A. Zaporozhets. *Systems, Decision and Control in Energy*, 2023. V. P. 411-423.
3. Volchyn I.A., Horyanoi S.V., Mezin S.V., Przybylski W.Ja., Yasynetskyi A.O. (2023) Peculiarities of using ammonium reagents in technologies of semi-dry desulfurization of flue gas. Ed. A. Zaporozhets. *Systems, Decision and Control in Energy*, 2023. V. P. 767-778.
4. Вольчин І., Ясинецький А., Пшибильські В. Екологічні аспекти ролі зеленого амоніаку в енергетиці України. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 2. 76-83.
5. Сірик А. О., Євтушенко О. В. Вплив викидів котлоагрегатів харчових підприємств на якість атмосферного повітря. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія Технічні науки*. 2023. № 4. С. 135-143.
6. Sahu S. K., Tiwari M., Bhangare R. C., Ajmal P. Y., Pandit G. G. Partitioning behavior of natural radionuclides during combustion of coal in thermal power plants, *Environmental Forensics*. 2017. № 18:1. С. 36-43.
7. Sudhir Y., Rajiv P. Status and Environmental Impact of Emissions from Thermal Power Plants in India. *Environmental Forensics*. 2014. №15:3. С. 219-224.
8. Ozden, B. Enrichment of naturally occurring radionuclides and trace elements in Yatagan and Yenikoy coal-fired thermal power plants, Turkey, *Journal of Environmental Radioactivity*. 2017.
9. Mohan Singh, Lalit & Kumar, Mukesh & Sahoo, Bijay & Sapra, Balvinder & Kumar, Rajesh. Study of radon, thoron exhalation and natural radioactivity in coal and fly ash samples of Kota Super Thermal Power Plant, Rajasthan, India. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016. 171.

10. Маковецька Ю.М., Омеляненко Т.Л. Поводження з відходами в контексті вимог Директиви 2010/75/ЄС про промислові викиди. *Економіка природокористування і охорони довкілля*. 2014. С. 10-12.
11. Вольчин І.А., Гапонич Л.С., Згоран І.П. Вибір технології десульфуризації димових газів для українських вугільних теплових електростанцій. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2018. Т. 24, № 4. С. 154-168.
12. Іваненко С.Д., Олива Д.А. Аналіз впливу на стан довкілля підприємств харчової промисловості. Проблеми та перспективи забезпечення цивільного захисту: матеріали міжнародної науково-практичної конференції молодих учених. Харків: НУЦЗУ. 2020. С. 355.
13. Мостенська Т.Л. Екологічні загрози при виробництві харчових продуктів. *Інтелект XXI*. 2015. № 3. С. 93-99.
14. Вольчин І.А., Ясинецький А.О., Пшибильські В.Я. Екологічні аспекти ролі «зеленого» амоніаку в енергетиці України. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2022. № 2. С. 76-83.
15. Громова О.М., Маркова Т.Д. Доцільність використання екологічно чистих технологій енергозабезпечення на підприємствах харчової промисловості. *Економіка харчової промисловості*. 2010. № 3. С. 59-62.

УДК 504.7.064.3:614.

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.17>

ВРАХУВАННЯ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ В МЕТОДОЛОГІЇ ОЦІНКИ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ СКЛАДНИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Шибанова А.М.¹, Руда М.В.¹, Джумеля Е.А.¹, Паславський М.М.²¹Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Степана Бандери, 12, 79000, м. Львів²Національний лісотехнічний університет України
вул. Генерала Чупринки, 103, 79057, м. Львівalla.m.shybanova@lpnu.ua, mariia.v.ruda@lpnu.ua,
elvira.a.dzhumelia@lpnu.ua, mykhailo.paslavskiyi@nltu.edu.ua

Традиційна оцінка життєвого циклу порівнює та аналізує вплив різних технологічних альтернатив для визначення відносної стійкості. Однак такий підхід часто ігнорує роль екосистемних послуг та екологічну пропускну здатність, попри їхнє важливе значення для підтримки людської діяльності. Це може призвести до надмірної залежності від обмежених ресурсів, погіршення стану екосистем і втрати можливостей для поліпшення. Стандартизовані методи передбачають комплексну оцінку чинників, які впливають на людей або чинять тиск на екосистеми, характеризуючи їх на етапі оцінки впливу за допомогою «середніх» показників, таких як потенціал глобального потепління, а індикатори кінцевих точок описують і агрегують «шкоду» аспектам соціального занепокоєння, викликану широким спектром екологічних проблем з боку складних технічних систем. Додаткова цінність моделювання на основі кінцевих впливів полягає в тому, що вони кількісно визначають відносну значущість середніх категорій впливу життєвого циклу шляхом інвентаризації фактичної шкоди, яку вони завдають екосистемам, здоров'ю людей і природним ресурсам, а не лише їхній потенціал завдати шкоди. Структура техніко-екологічної синергії враховує попит та пропозицію екосистемних послуг на різних просторових рівнях і формує показники абсолютної стійкості як на місцевому рівні, так і на рівні послуг. Основна увага техніко-екологічної синергії зосереджена на локалізованих системах, але для уникнення зміщення впливу необхідно також враховувати перспективу життєвого циклу. Автори запропонували структуру техніко-екологічної синергії в оцінці життєвого циклу, модифікувавши кожен етап традиційної оцінки життєвого циклу, щоб включити роль екосистемних товарів і послуг. Техніко-екологічної синергії в оцінці життєвого циклу не лише підтримує звичайні рішення щодо зменшення впливу через технологічні вдосконалення, але й відкриває нові екологічні можливості, спрямовані на досягнення абсолютної стійкості. Його переваги було продемонстровано на прикладі застосування моделі інтегрованого клімату до сільських територій, що піддаються впливу складних технічних систем. Застосована модель передбачає комбінований вплив управлінських рішень, місцевої погоди та ґрунтових умов на масообмін води, ґрунту, поживних речовин і пестицидів. Модель видає результати щодо врожайності, циклу вуглецю, циклу поживних речовин і гідрологічного циклу. Таким чином, техніко-екологічна синергія в оцінці життєвого циклу пропонує більш комплексний підхід до оцінки ефективності сталого розвитку. *Ключові слова:* життєвий цикл, екосистемні послуги, складна технічна система.

Accounting of ecosystem services in the life cycle assessment methodology of complex technical systems. Shybanova A., Ruda M., Dzhumelia E., Paslavskiyi M.

Traditional life cycle assessment compares and analyzes the impact of different technological alternatives to determine relative sustainability. However, this approach often ignores the role of ecosystem services and ecological carrying capacity, despite their importance in sustaining human activities. This can lead to over-reliance on limited resources, deterioration of ecosystems and loss of opportunities for improvement. Standardized methods provide a comprehensive assessment of factors that affect people or exert pressure on ecosystems, characterizing them at the impact assessment stage using "average" indicators, such as global warming potential, while endpoint indicators describe and aggregate "damage" aspects of social concern, caused by a wide range of environmental problems from complex technical systems. An added value of end-effect modeling is that it quantifies the relative importance of average life-cycle impact categories by inventorying the actual harm they cause to ecosystems, human health, and natural resources, not just their potential to cause harm. The structure of technical and ecological synergy takes into account the demand and supply of ecosystem services at different spatial levels and forms indicators of absolute sustainability both at the local level and at the service level. The main focus of techno-ecological synergies is on localized systems, but to avoid impact bias, a life cycle perspective must also be considered. The authors proposed a framework for techno-ecological synergies in life cycle assessment, modifying each stage of traditional life cycle assessment to include the role of ecosystem goods and services. Techno-ecological synergies in life cycle assessment not only support conventional solutions to reduce impact through technological improvements, but also open up new ecological opportunities aimed at achieving absolute sustainability. Its advantages were demonstrated on the example of the application of the integrated climate model to rural areas exposed to the influence of complex technical systems. The applied model assumes the combined effect of management decisions, local weather and soil conditions on the mass transfer of water, soil, nutrients and pesticides. The model outputs results for yield, carbon cycling, nutrient cycling and hydrological cycling. Thus, technical-ecological synergy in life cycle assessment offers a more comprehensive approach to assessing the effectiveness of sustainable development. *Key words:* life cycle, ecosystem services, complex technical system.

Постановка проблеми. Традиційна оцінка життєвого циклу (*Life Cycle Assessment (LCA)*) порівнює та аналізує вплив різних технологічних альтернатив для визначення найкращої практики. Однак він значною мірою ігнорує роль екосистемних послуг (*ecosystem services (ES)*) у підтримці діяльності людини. Це може призвести до несприятливих рішень, надаючи лише відносну оцінку стійкості [1].

Концепція планетарного кордону (*planetary boundary (PB)*) була запропонована для визначення абсолютної екологічної стійкості [2]. *PB* окреслює «безпечний робочий простір» для людської діяльності та припускає, що діяльність повинна здійснюватися в межах екологічної пропускну здатності [2]. Однак, як було запропоновано його розробниками, структуру *PB* не слід зменшувати для підтримки рішень на місцевому та регіональному рівнях. Таким чином, необхідна методологія, яка операціоналізує концепцію *PB* і визначає вимірні межі для кількох просторових масштабів.

Техніко-екологічна синергія (*Techno-Ecological Synergy (TES)*) заохочує синергію між технологічними та екологічними системами [1]. Ключова ідея *TES* полягає в тому, що використання ресурсів і викиди дозволені, але повинні залишатися в межах пропускну здатності екосистеми. Структура *TES* є багатомасштабною за своєю природою, що дозволяє приймати рішення від локального до глобального масштабів. Однак на даний момент більшість програм *TES* зосереджено на локалізованих системах. Щоб запобігти зміщенню впливів, також необхідно включити перспективу життєвого циклу [3].

Актуальність дослідження. Тривають дебати, які підтримують інтеграцію *ES* в *LCA* навколо того, як і де екосистемні послуги слід розташувати в причинно-наслідкових ланцюгах *LCA* [4–7]. Стандартизовані методи *ISO LCA* передбачають комплексну оцінку чинників, які впливають на людей або чинять тиск на екосистеми, характеризуючи їх на етапі оцінки впливу за допомогою «середніх» показників, таких як потенціал глобального потепління. Ці середні показники описують екологічні «проблеми». У деяких випадках вони пов'язані з індикаторами «кінцевої точки», які описують «шкоду» навколишньому середовищу, агрегуючи та підсумовуючи окремі середні впливи за ТЗЗ: якість екосистеми, доступність природних ресурсів і здоров'я людини [8]. Ці індикатори кінцевих точок описують і агрегують «шкоду» аспектам соціального занепокоєння, викликану широким спектром екологічних проблем з боку СТС. Існують різні погляди на те, чи слід представляти *ES* як середню категорію впливу [9–12] чи категорію кінцевої точки впливу [5, 13]. Додаткова цінність моделювання на основі кінцевих впливів полягає в тому, що вони кількісно визначають відносну значущість середніх категорій впливу *LCA* шляхом інвентаризації фактичної шкоди, яку вони завдають екосистемам, здоров'ю

людей і природним ресурсам, а не лише їхній потенціал завдати шкоди.

Більшість поточних підходів до інтеграції *ES* в *LCA* ґрунтується на зв'язку потоків інвентаризації (таких як експлуатація та трансформація землі) з пошкодженням *ES* як нових середніх категорій впливу. Існуючі дослідження дозволяють використовувати методології та регіональні коефіцієнти характеристики (*KX*) для впливу землекористування та зміни землекористування на *ES* (включаючи виробництво живої речовини, регулювання клімату, регулювання прісної води, регулювання ерозії та очищення води) для включення до існуючих протоколів *LCA* [14–17, 9, 18, 19]. Ключовим обмеженням цих досліджень є невелика кількість *ES*, для яких були розроблені моделі характеристики. Подальші обмеження стосуються зосередженості виключно на погіршенні постачання *ES* просторово-часовими геосистемами та землекористуванням як основною рушійною силою впливу *ES*. Актуальність роботи полягає в об'єднанні загальних структур для інтеграції *ES* та *LCA* та метрика, які можна використовувати для моделювання контекстно-залежних *KX* для широких категорій *ES* [20, 21, 10, 7, 12].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Виявлення шляхів підвищення стійкості складних технічних систем (СТС) за допомогою інструментів оцінки стійкості, таких як *LCA*, потребує широкого набору показників, які демонструють впливи по відношенню до меж планети [22]. Деякі автори стверджують, що включення *ES* в *LCA* для розширення діапазону використовуваних показників є ключовою частиною оцінки зменшення впливу з боку СТС на довкілля [23, 9, 24, 25, 7, 26]. Концепція *ES* визначає взаємозв'язок між людиною, та природою а також суспільну залежність від функціональних аспектів екосистем [27–29], а *ES* розуміють як численні переваги, які люди отримують від екологічних функцій і процесів, що відбуваються в екосистемі [30, 31]. Оцінка забезпечення *ES* є широко застосовуваним способом оцінки того, як на переваги, створені екосистемами, впливають зміни, спричинені людиною, та інші стресори, часто через грошову оцінку переваг, які надаються в поточному та гіпотетичному станах екосистеми [32, 33]. Включення *ES* до методологій *LCA* дозволяє оцінити не лише навантаження з боку СТС, але й вплив цих навантажень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На відміну від оцінок *ES*, які значною мірою залежать в екосистеми, методи *LCA* зазвичай мають широкі межі системи та враховують різноманітний набір впливів від систем продукції, які можуть завдати шкоди за трьома зонами захисту (ТЗЗ) у різних масштабах, включаючи віддалені непрямі впливи від видобутку ресурсів вище за течією, зміни у землекористуванні або експлуатації землі [34]. Етап оцінки впливу в методі *LCA* має бути розширений, щоб

включити вплив на постачання *ES* як більш повний засіб оцінки впливу *СТС* [35, 36, 24]. Широко поширена інтеграція *ES* в *LCA* є недостатньою [37, 6], особливо щодо методів інтеграції *ES* на етапі оцінки впливу в методі *LCA* [38, 26]. Ряд авторів досліджували деякі концептуальні проблеми інтеграції *ES* та *LCA*, які випливають із характеристик *ES* [23, 5, 6, 7, 26, 12], а основні моменти, пов'язані з цими широкими концепціями, викладені в таблиці 1.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. На рис. 1 узагальнено етапи *TES-LCA*, жирним шрифтом виділено новизну та додаткові етапи *TES-LCA* порівняно зі звичайним *LCA*.

Метою традиційного *LCA* є визначення технологічної діяльності, яка має найменший вплив на навколишнє середовище серед альтернатив. *TES-LCA* також намагається виявити нові можливості, такі як екологічне відновлення, щоб збільшити пропозицію *ES*, прагнучи досягти абсолютної екологічної стійкості.

У звичайній *LCA* визначено лише обсяг впливу *СТС*. У той час як у *TES-LCA* необхідно визначити межі для *СТС*, екологічних систем і *ES*-сервісів. Кожна технологічна діяльність вкладена в локальну екосистему, яка забезпечує необхідний *ES*; і кожен *ES* має свої відповідні сервісні приміщення. Абсолютну стійкість для кожного *ES* слід оцінювати за шкалою обслуговування.

Таблиця 1

Питання для інтеграції екосистемних послуг та оцінки життєвого циклу, розглянуті в існуючій літературі

Проблеми	Ключові моменти	Обмеження існуючої методології <i>LCA</i>
Послуги екосистеми взаємодіють динамічно	<ul style="list-style-type: none"> – <i>ES</i> – це очевидні переваги багатьох взаємодій і циклів зворотного зв'язку від екологічних характеристик, процесів і функцій. – Часто те, що називають <i>ES</i> у дослідженнях <i>LCA</i>, насправді є екологічними функціями екосистеми [6], що є складовою <i>ES</i>, а не самими <i>ES</i>, як описано [39]. – Деякі <i>ES</i> надають переваги прямо чи опосередковано, впливаючи на пропозицію інших <i>ES</i> [40]. – Деякі <i>ES</i> виникають разом з іншими, отже, один стресор може одночасно впливати на декілька [41]. 	<ul style="list-style-type: none"> – Причинно-наслідковий ланцюг <i>LCA</i> зазвичай припускають лінійний зв'язок між впливом та його наслідками, що є проблемою для обліку численних потенційних впливів чинника стресу на постачання <i>ES</i> та потенційного зворотного зв'язку на інші <i>ES</i> [26, 12]. – Ця багатофункціональність часто не згадується в дослідженнях <i>LCA</i>, спрямованих на оцінку впливу на <i>ES</i> з боку <i>СТС</i> [6].
Пропозиція екосистемних послуг є просторово неоднорідністю	<ul style="list-style-type: none"> – Значна проблема пов'язана з просторовими варіаціями в постачанні <i>ES</i> та «використанні» <i>ES</i>. – В праці [7] зазначено, що <i>ES</i> неоднорідно постачаються в різних масштабах і одночасно отримують переваги в різних масштабах. – Це створює проблему для кількісного визначення впливу на <i>ES</i> та встановлення шкали оцінки (або «межі системи»), щоб зафіксувати мультискалярні взаємодії [6]. – Інструменти просторово-явної оцінки з використанням складних моделей на основі процесів широко поширені в дослідженнях <i>ES</i> [28, 42, 31]. 	<ul style="list-style-type: none"> – Підходи <i>LCA</i> часто припускають просторову однорідність під час розрахунку впливу <i>ES</i>, маскуючи просторові варіації в здатності екосистем забезпечувати <i>ES</i> [6]. – Деякі автори досліджували, як просторово чітке моделювання <i>ES</i> може бути застосоване в <i>LCA</i> [4, 35, 36, 19], але це обмежено впливом землекористування на <i>ES</i> та обмежений набір <i>ES</i>. Існує потреба в подальшому дослідженні того, як це можна застосувати до ширшого набору впливів <i>ES</i>.
Пропозиція екосистемних послуг змінюється в часі	<ul style="list-style-type: none"> – Постачання <i>ES</i> також змінюється в часі в залежності від сезонних або річних коливань рівнів пропозиції [43]. – Схожий вплив зміни землекористування на <i>ES</i> не буде відбуватися з однаковою швидкістю в усіх місцях, а також зміни в постачанні <i>ES</i> не відбуватимуться в тому самому місці до попереднього антропогенного тиску [46]. – Історично недостатньо вивчені часові аспекти постачання <i>ES</i> [43]. 	<ul style="list-style-type: none"> – Звичайне моделювання <i>LCA</i> зазвичай припускає часову неоднорідність і використовує фактори характеристики, які не припускають тимчасової диференціації впливів [26]. – Динамічне моделювання <i>LCA</i> також досліджує деякі тимчасові проблеми в рамках традиційного <i>LCA</i> [44, 45]. – Однак часові аспекти <i>ES</i> не були досліджені в рамках існуючих тематичних досліджень інтеграції <i>ES</i> – <i>LCA</i>, це створює велику проблему, яку потрібно вирішити.

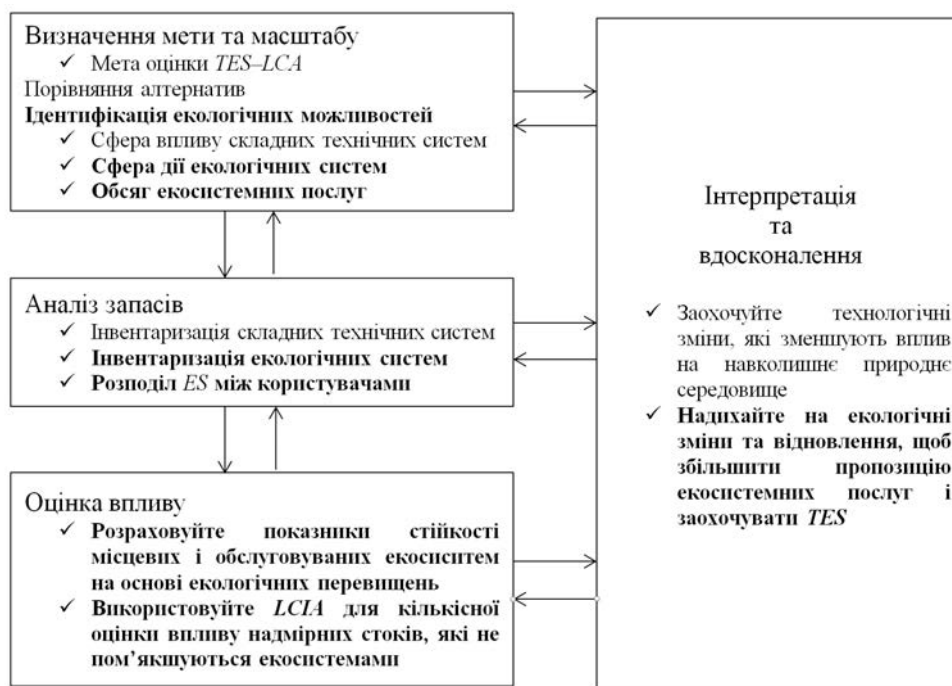


Рис. 1. Етапи в TES-LCA [3]). Сміливі кроки є унікальними для цього підходу

На етапі аналізу запасів звичайний LCA збирає дані про використання ресурсів і викиди, пов'язані з життєвим циклом продукту; в той час як TES-LCA кількісно визначає попит і пропозицію ES з життєвого циклу. Попит на ES визначається використанням ресурсів і викидами, що аналогічно традиційній інвентаризації життєвого циклу; тоді як пропозиція ES визначається здатністю екосистем надавати такі послуги. Наприклад, викиди CO₂ створюють попит на поглинання вуглецю ES, тоді як рослинність забезпечує поглинання вуглецю ES.

$$v_k = \frac{s_k - d_k}{d_k} \quad (1)$$

На етапі оцінки впливу звичайний LCA розраховує бали індикаторів для різних категорій впливу, застосовуючи методи оцінки впливу життєвого циклу (LCIA). Тоді як для TES-LCA етап оцінки впливу розділений на два етапи. По-перше, попит (d_k) і пропозиція (s_k) k -го ES використовуються для розрахунку метрики стійкості TES (v_k) [1] із застосуванням рівняння (1). По-друге, звичайні методи LCIA можуть бути застосовані для кількісної оцінки впливу потоків надмірного втручання в навколишнє середовище, які не можуть бути пом'якшені екосистемами.

На етапі аналізу вдосконалення звичайний LCA зосереджується на виявленні гарячих точок навколишнього середовища та підвищенні технічної ефективності СТС. У той час як для TES-LCA, метрики як у локальному, так і в обслуговуваному масштабі можуть бути визначені для підтримки прийняття рішень. Локальний показник стійкості можна використовувати для визначення місцевих покращень

показників стійкості. Показник масштабу обслуговування можна назвати показником абсолютної стійкості. Це припускає, що для того, щоб претендувати на абсолютну екологічну стійкість, попит на k -ту ES не повинен перевищувати її пропозицію в масштабі обслуговування. TES-LCA виступає за перехід до взаємовигідного сценарію, за яким ES використовується стабільно як у місцевому масштабі, так і в масштабах обслуговування.

Таким чином, методологія TES-LCA задовольняє дві необхідні, але недостатні умови для абсолютної стійкості [47]:

- 1) необхідний ES не повинен перевищувати екологічну пропускну здатність;
- 2) проблема не повинна бути просто зміщена за межі розглянутого просторово-часового кордону. Таким чином, він забезпечує більш повну оцінку стійкості технологічних альтернатив СТС.

Новизна. Запропонована методологія техніко-екологічної синергії в оцінці життєвого циклу (TES-LCA) модифікує кожен крок у традиційній LCA шляхом явного порівняння попиту та пропозиції ES у кількох просторових масштабах.

Методологічне або загальнонаукове значення. Для автоматизації подібних розрахунків також необхідна обчислювальна структура запропонованої методології TES-LCA. Оскільки TES-LCA є прямим розширенням традиційного LCA, обчислювальна структура TES-LCA також є прямим розширенням традиційного LCA. Він чітко включає екосистеми як модулі, які вводять відходи, що викидаються в результаті технологічної діяльності, і виводять ES, що утилізуються тех-

нологічною діяльністю, разом із модулями процесів у традиційному *LCA*. Рівняння (2) узагальнює обчислювальну структуру *TES-LCA* [48]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \mathbf{C} \\ \mathbf{D} \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{m} \\ \mathbf{m}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{f}_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ці матриці та вектори визначені для потоків як у СТС, так і в екосистемі. У складній технічній системі *A* – це технологічна матриця, яка вказує на потоки економічних продуктів між технологічними модулями. *D* – це матриця екологічних втручань, яка вказує на використання ресурсів і викиди, пов'язані з одиницею продукту. *m* – вектор масштабних коефіцієнтів для СТС, який визначається розв'язуванням балансових рівнянь $Am = f$, в якому *f* – вектор кінцевих вимог від технологічної мережі. Традиційна інвентаризація життєвого циклу *r* потім складається шляхом застосування $r = Dm$. Це обчислювальна структура традиційного *LCA* на основі процесів, оскільки вона зосереджена лише на технологічних системах.

Обчислювальна структура *TES-LCA* може бути отримана шляхом прямого розширення традиційної *LCA* шляхом визначення додаткових матриць і векторів, які представляють діяльність в екосистемі. *S* – це матриця екосистеми, яка фіксує взаємодію між екологічними системами, що в термінології *TES-LCA* можна інтерпретувати як постачання *ES*. *C* – це матриця управління, яка визначає потреби в управлінні добривами та пестицидами для екосистем, створених людиною. m_e та f_e є векторами коефіцієнтів масштабування та кінцевих вимог екосистем відповідно. m_e можна інтерпретувати як розмір екосистем, тоді як f_e можна інтерпретувати як надмірні потоки втручання, які не можуть бути повністю пом'якшені / відділені екосистемами.

Зауважте, що якщо екологічні компоненти (тобто *C*, *S*, m_e , f_e) виключити з рівняння (2), то обчислювальні структури *TES-LCA* та традиційного *LCA* стануть однаковими. Це свідчить про те, що *TES-LCA* і звичайний *LCA* не конкурують, а доповнюють один одного. Базова обчислювальна структура *TES-LCA* також може бути адаптована для врахування регіональних варіацій [36].

Виклад основного матеріалу. Застосування підходу для сільських територій, що перебувають під впливом складних технічних систем.

Потенційні переваги, які можна отримати за допомогою методології *TES-LCA*, проілюстровано на прикладі оцінки показників стійкості сільських територій, що перебувають під впливом СТС. Це цілком виправдано, оскільки сільськогосподарська діяльність значною мірою залежить від різних *ES*. Доступні різні варіанти вирощування культур, наприклад міські городи та кукурудзяні ферми. Таким чином, першочерговим питанням може бути: як громадські сади впливають на *ES* і як вони порівнюються з комерційними господарствами та іншими

видами використання міської землі, чи сільськогосподарської території в межах приміської території? Іншими словами, якщо є ділянка міської землі, як ми маємо вирішувати її використання на основі синергії *ES* та компромісів?

Повний життєвий цикл діяльності сільських територій, що перебувають під впливом СТС включає такі етапи, як виробництво сировини для сільського господарства, саме землеробство, подальша обробка та розподіл. Це дослідження зосереджено лише на етапі ведення сільського господарства, де *ES* є найбільш актуальним порівняно з іншими етапами. Якщо розглядати пропозицію та попит на *ES* впродовж життєвого циклу, процедури, розроблені Liu та Bakshi, можуть бути використані для збору даних інвентаризації [3].

Таблиця 2

***ES*, розглянуті в цьому прикладі**

ES приклади	Попит	Постачання
Поглинання вуглецю	Втрати CO ₂ з ґрунту та викиди від сільськогосподарських операцій	Вміст вуглецю рослинних залишків, закладених у ґрунт
Забезпечення водою	Випаровування та зрошення	Природні опади
Регулювання якості води	Забруднювачі води, напр. N і P стік добрив	Самоочисна здатність водойми
Продовольче забезпечення	Суспільні потреби	Польова врожайність

Відповідні *ES*, які розглядаються в цьому прикладі, включають врожайність (тобто забезпечення їжею), поглинання вуглецю, забезпечення водою та регулювання якості води. Попит і пропозиція вищезазначених *ES* наведені в таблиці 2. Ці компоненти кількісно визначені моделлю інтегрованого клімату *Environmental Policy Integrated Climate (EPIC)* [49].

Моделювання моделі EPIC. Модель *EPIC* передбачає комбінований вплив управлінських рішень, місцевої погоди та ґрунтових умов на рух води, ґрунту, поживних речовин і пестицидів [49]. Щоб використовувати *EPIC*, необхідно визначити схеми управління для різних альтернатив землеробства в умовах міста, які включають графік посіву та збирання врожаю, а також тип, час і кількість пестицидів і добрив для застосування. Для комерційного землеробства рекомендовані практики можна отримати з Дослідження управління сільськогосподарськими ресурсами (*Agricultural Resource Management Survey (ARMS)*) [50]. Стосовно громадських садівників, оскільки їх основною метою є не продаж продукції заради прибутку, вони можуть не дотримуватися рекомендованих практик. У цьому дослідженні передбачається, що практики управління за замовчуванням, надані в моделі *EPIC*, використовуються громадськими садівниками.

Модель EPIC також потребує погодних і кліматичних даних щодо сонячної радіації, температури, опадів, відносної вологості та швидкості вітру [51, 52, 53]. Крім того, EPIC потребує даних про ґрунти, включаючи типи ґрунтів, структуру, фізичні та хімічні властивості [54]. Модель видає результати щодо врожайності, циклу вуглецю, циклу поживних речовин і гідрологічного циклу.

Для громадських садів зроблено кілька додаткових припущень: по-перше, не застосовуються механічні операції, що призводить до відсутності споживання палива; по-друге, практикується землеробство, тому зрошення не потрібне (тобто потреба у водному забезпеченні ES складається лише з випаровування врожаю). Ці припущення є обґрунтованими через основну мету громадського садівництва. Крім того, у цьому дослідженні кукурудзяні ферми використовуються як проксі для міських ферм. Це цілком виправдано, оскільки отримання даних для різних видів сільського господарства в містах є складним завданням і є частиною поточних досліджень.

Було визначено різні показники ES для порівняння альтернатив сільських територій, що перебувають під впливом складних технічних систем та розуміння синергії та компромісів ES. Порівняння можна проводити на 1 га міської землі.

На рис. 2 наведено врожайність кукурудзи з гектара (га) землі для трьох агротехнічних прийомів. Оскільки промислове землеробство дотримується рекомендованої практики, яка передбачає вищі норми внесення добрив, воно має вищу врожайність. Урожайність з га комерційної ферми кукурудзи в три рази вища, ніж у невеликих ферм із звичайним обробітком ґрунту.

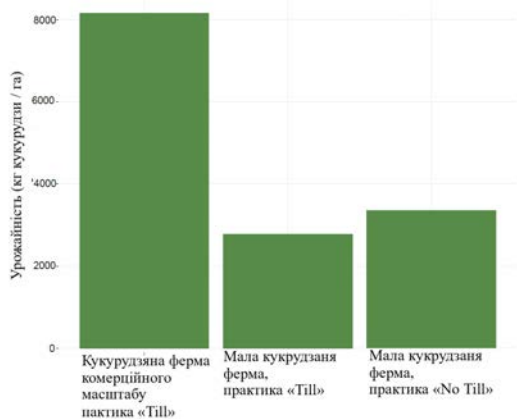


Рис. 2. Екосистемна послуга (ES) – забезпечення продовольством

Однак, як показано на рис. 3, комерційні ферми також мають більший стік поживних речовин. Комерційні ферми мають майже вдвічі більший стік нітратів, ніж невеликі ферми. Це розумно, оскільки добрива можуть підвищити врожайність, але над-

мірне внесення добрив може призвести до більшого стоку. Крім того, вартість комерційного землеробства буде вищою через використання додаткової техніки та палива, а також більші матеріальні затрати (наприклад, добрива, пестициди).

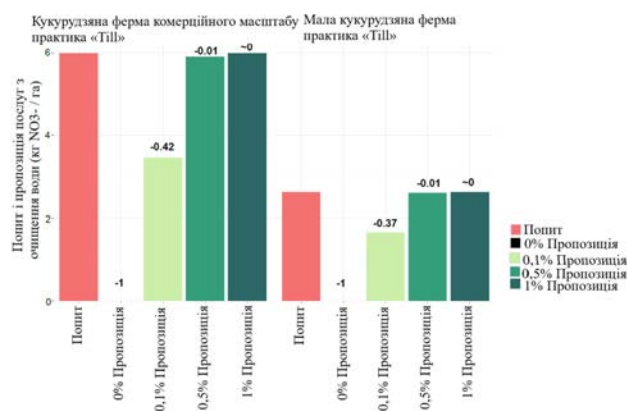


Рис. 3. Екосистемна послуга (ES) – очищення води (числові значення позначають розраховані значення v_k для кожного сценарію постачання)

Рис. 3 також показує, що постачання води в результаті регулювання якості води ES дорівнює нулю, оскільки ці забруднювачі води не можуть бути пом'якшені самою сільськогосподарською землею (тобто сценарій 0% пропозиції). Постачання ES було б доступним, якби частину землі використовували для будівництва водно-болотних угідь, які забезпечують регулювання якості води ES. У цьому конкретному дослідженні передбачається, що 0,1%, 0,5% і 1% сільськогосподарських угідь можна використовувати для відведення водно-болотних угідь. Для визначення здатності видалення поживних речовин на основі моделі першого порядку в стаціонарному стані було застосовано модель водно-болотних угідь для обробки поверхневого потоку вільної води [55]:

$$\frac{C_0}{C_i} = e^{-K_T t}$$

$$K_T = 1,15^{T-20} \quad (3)$$

$$t = \frac{A \epsilon t}{Q}$$

де C_0 та C_i – концентрація поживних речовин у відтоці та припливі відповідно. K_T – константа швидкості з одиницею добу⁻¹, виміряна в T , яка представляє температуру поверхні води. У цьому дослідженні припускається, що T дорівнює 20°C, тому $K_T = 1$. A (одиниця виміру: м²) – це площа водно-болотних угідь; s – пористість шару (приймається рівною 0,42); h (одиниця вимірювання: м) – глибина заболочених ділянок (прийнято 0,6 м); Q (одиниця виміру: м³/добу) – швидкість гідравлічного навантаження. З моделюванням поверхневої води (тобто Q) і стоку поживних речовин за допомогою EPIC можна розрахувати C_i . Значення A залежить від того, скільки

сільськогосподарських угідь використовується під болота. Рис. 3 показує, що з 0,5% землі, яка використовується під болота, майже весь стік нітратів може бути очищений.

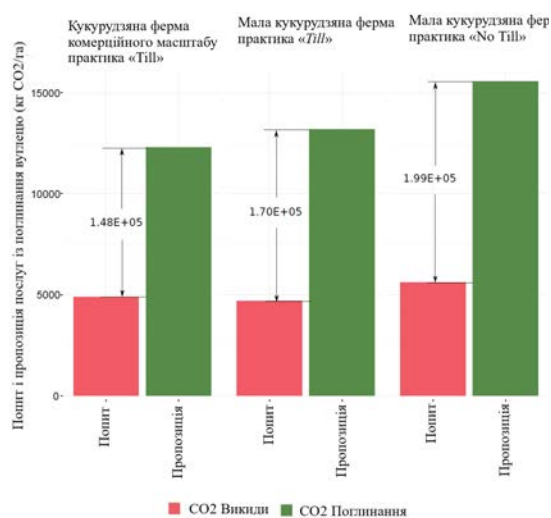


Рис. 4. Екосистемна послуга (ES) – поглинання вуглецю (числові значення позначають чисте поглинання вуглецю в одиницях кг CO₂/га)

На рис. 4 зображено результат ES – поглинання вуглецю. З точки зору дрібного землеробства, практика «No Till» є гіршою з точки зору попиту, яка прийнята звичайним LCA. Практика «No Till» – це сучасна модель обробки ґрунту, при якій ґрунт не обробляється традиційним, механічним і звичним для нас способом за допомогою оранки, а вкривається мульчею (подрібненими залишками рослинних культур). «Нульовий» спосіб землеробства не слід сприймати спрощено, лише як відмова від оранки, оскільки даний метод – це в першу чергу складна технологічна модель, яка потребує особливих знань і наявності висококваліфікованих фахівців і спеціальної техніки, тому позитивний ефект від її застосування можна отримати, лише використовуючи комплексний і системний підхід. Тим не менш, на практиці доведено, що застосування практики «No-Till» дозволяє істотно знизити витрати на сільськогосподарські роботи, оскільки при цьому методи обробки полів знижуються трудовитрати і економиться значна частина дорогих ресурсів.

Однак, якщо розглядати постачання ES, то практика «No-Till» є кращим, ніж звичайна практика «Till», про що свідчить більша чиста величини поглинання вуглецю. Можна також зробити висновок, що діяльність з вирощування кукурудзи на місцевому рівні є стійкою, оскільки пропозиція ES перевищує попит на неї. Тим не менш, абсолютна стабільність поглинання вуглецю все ще не може бути заявлена, оскільки це має бути визначено на глобальному рівні. Абсолютні показники стійкості можна розрахувати відповідно до методології, розробленої Liu та Bakshi для оцінки використання ES у масштабі обслуговування [3].

Головні висновки. Розуміння синергії та компромісів ES має важливе значення для прийняття комплексного рішення в контексті складних технічних систем. Методологію TES-LCA можна використовувати в такому контексті для розробки індикаторів ES, які можуть полегшити порівняння між різними альтернативами.

Перспективи використання результатів дослідження. Майбутня робота включає розгляд додаткових ES, таких як запилення та родючість ґрунту. Потрібні систематичні методи правильного визначення компонентів попиту та пропозиції на ці послуги.

Крім того, оскільки існують компроміси ES між різними альтернативами, може знадобитися розробити схему агрегування. Потенційні методи включають використання вагових коефіцієнтів або перетворення потоків ES у грошові одиниці. Крім цих фізичних індикаторів, соціальні індикатори, такі як переваги мешканців, також повинні бути включені для підтримки остаточного прийняття рішень.

Подяка. Цю роботу підготовлено завдяки грантовій підтримці Національного Фонду Досліджень України, реєстраційний номер проєкту 0123U103529 (2022.01/0009) «Оцінювання та прогнозування загроз відбудові та сталому функціонуванню об'єктів критичної інфраструктури» за конкурсом «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

Публікація містить результати досліджень, проведених у рамках НДР «Економіка деградації земель унаслідок війни та їх повоєнного відновлення: інноваційні практики сталого управління аграрним природокористуванням», № д. р. 0124U000518.

Література

- Bakshi, B. R., Ziv, G., Lepech, M. D., 2015. Techno-ecological synergy: A framework for sustainable engineering. Environmental Science & Technology 49(3): 1752–1760.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., De Vries, W., De Wit, C. A., Folke, C., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science 347(6223): 1259855.
- Liu, X., Bakshi, B. R., 2018. Ecosystem Services in Life Cycle Assessment while Encouraging TechnoEcological Synergies. Journal of Industrial Ecology. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12755>
- Blanco, C.F., Marques, A., van Bodegom, P.M., 2018. An integrated framework to assess impacts on ecosystem services in LCA demonstrated by a case study of mining in Chile. Ecosyst. Serv. 30, 211–219. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.11.011>
- Callesen, I., 2016. Biodiversity and ecosystem services in life cycle impact assessment – inventory objects or impact categories? Ecosyst. Serv. 22, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2016.09.021>

6. Othoniel, B., Rugani, B., Heijungs, R., Benetto, E., Withagen, C., 2016. Assessment of life cycle impacts on ecosystem services: promise, problems, and prospects. *Environ. Sci. Technol.* 50, 1077–1092. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03706>
7. Rugani, B., Maia de Souza, D., Weidema, B.P., Bare, J., Bakshi, B., Grann, B., Johnston, J. M., Pavan, A.L.R., Liu, X., Laurent, A., Veronesi, F., 2019. Towards integrating the ecosystem services cascade framework within the Life Cycle Assessment (LCA) cause-effect methodology. *Sci. Total Environ.* 690, 1284–1298. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.023>
8. Baumann, H., Tillman, A.-M., 2004. *The Hitch Hiker's Guide to LCA: an Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Studentlitteratur, Lund.
9. Koellner, T., Geyer, R., 2013. Global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1185–1187. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0580-6>
10. Pavan, A.L.R., Ometto, A.R., 2018. Ecosystem services in life cycle assessment: a novel conceptual framework for soil. *Sci. Total Environ.* 643, 1337–1347. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.191>
11. Schaubroeck, T., Alvarenga, R.A.F., Verheyen, K., Muys, B., Dewulf, J., 2013. Quantifying the environmental impact of an integrated human/industrial– natural system using life cycle assessment; A case study on a forest and wood processing chain. *Environ. Sci. Technol.* 47, 13578–13586. <https://doi.org/10.1021/es4046633>
12. Zhang, Y.I., Singh, S., Bakshi, B.R., 2010. Accounting for ecosystem services in life cycle assessment part I: a critical review. *Environ. Sci. Technol.* 44, 2232–2242. <https://doi.org/10.1021/es9021156>
13. Dewulf, J., Benini, L., Mancini, L., Sala, S., Blengini, G.A., Ardente, F., Recchioni, M., Maes, J., Pant, R., Pennington, D., 2015. Rethinking the area of protection «natural resources» in life cycle assessment. *Environ. Sci. Technol.* 49, 5310–5317. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00734>
14. Arbault, D., Rivi`ere, M., Rugani, B., Benetto, E., Tiruta-Barna, L., 2014. Integrated earth system dynamic modeling for life cycle impact assessment of ecosystem services. *Sci. Total Environ.* 472, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.10.099>
15. Brand`ao, M., i Canals, L.M., 2013. Global characterisation factors to assess land use impacts on biotic production. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1243–1252. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0381-3>
16. Cao, V., Margni, M., Favis, B.D., Desch`enes, L., 2015. Aggregated indicator to assess land use impacts in life cycle assessment (LCA) based on the economic value of ecosystem services. *J. Clean. Prod.* 94, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.041>
17. Koellner, T., Baan, L., Beck, T., Brand`ao, M., Civit, B., Margni, M., Canals, L.M., Saad, R., Souza, D.M., Müller-Wenk, R., 2013. UNEP-SETAC guideline on global land use impact assessment on biodiversity and ecosystem services in LCA. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1188–1202. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0579-z>
18. Saad, R., Koellner, T., Margni, M., 2013. Land use impacts on freshwater regulation, erosion regulation, and water purification: a spatial approach for a global scale level. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1253–1264. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0577-1>
19. Zhang, Y.I., Anil, B., Bakshi, B.R., 2010. Accounting for ecosystem services in life cycle assessment part II: toward an ecologically based LCA. *Environ. Sci. Technol.* 44, 2624–2631. <https://doi.org/10.1021/es900548a>
20. Crenna, E., Sala, S., Polce, C., Collina, E., 2017. Pollinators in life cycle assessment: towards a framework for impact assessment. *J. Clean. Prod.* 140, 525–536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.058>
21. Maia de Souza, D., Lopes, G.R., Hansson, J., Hansen, K., 2018. Ecosystem services in life cycle assessment: a synthesis of knowledge and recommendations for biofuels. *Ecosyst. Serv.* 30, 200–210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.02.014>
22. Zeug, W., Bezama, A., Thr`an, D., 2021. A framework for implementing holistic and integrated life cycle sustainability assessment of regional bioeconomy. *Int. J. Life Cycle Assess.* 26, 1998–2023. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01983-1>
23. Alejandre, E.M., van Bodegom, P.M., Guin`ee, J.B., 2019. Towards an optimal coverage of ecosystem services in LCA. *J. Clean. Prod.* 231, 714–722. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.284>
24. Othoniel, B., Rugani, B., Heijungs, R., Beyer, M., Machwitz, M., Post, P., 2019. An improved life cycle impact assessment principle for assessing the impact of land use on ecosystem services. *Sci. Total Environ.* 693 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.180>
25. Pascual, U., Palomo, I., Adams, W.M., Chan, K.M.A., Daw, T.M., Garmendia, E., G`omez– Baggethun, E., De Groot, R.S., Mace, G.M., Martín-L`opez, B., Phelps, J., 2017. Off-stage ecosystem service burdens: a blind spot for global sustainability. *Environ. Res. Lett.* 12 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7392>
26. VanderWilde, C.P., Newell, J.P., 2021. Ecosystem services and life cycle assessment: a bibliometric review. *Resour. Conserv. Recycl.* 169, 105461 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105461>
27. Braat, L.C., de Groot, R., 2012. The ecosystem services agenda: bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. *Ecosyst. Serv.* 1, 4–15. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.011>
28. Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., Farber, S., Grasso, M., 2017. Twenty years of ecosystem services: how far have we come and how far do we still need to go? *Ecosyst. Serv.* 28, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
29. de Groot, R., Alkemade, R., Braat, L., Hein, L., Willemen, L., 2010. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecol. Complex.* 7, 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.10.006>
30. Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P., 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecol. Econ.* 68, 643–653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
31. Seppelt, R., Dormann, C.F., Eppink, F.V., Lautenbach, S., Schmidt, S., 2011. A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead. *J. Appl. Ecol.* 48, 630–636. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01952.x>
32. Seppelt, R., Fath, B., Burkhard, B., Fisher, J.L., Gr`et-Regamey, A., Lautenbach, S., Pert, P., Hotes, S., Spangenberg, J., Verburg, P.H., van Oudenhoven, A.P.E., 2012. Form follows function? Proposing a blueprint for ecosystem service assessments based on reviews and case studies. *Ecol. Indicat.* 21, 145–154. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.09.003>
33. Vihervaara, P., Ronka, M., Walls, M., 2010. Trends in ecosystem service research: early steps and current drivers. *Ambio* 39, 314–324.

34. Weidema, B.P., Schmidt, J., Fantke, P., Pauliuk, S., 2018. On the boundary between economy and environment in life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 23, 1839–1846. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1398-4>
35. Liu, X., Ziv, G., Bakshi, B.R., 2018. Ecosystem services in life cycle assessment – Part 1: a computational framework. *J. Clean. Prod.* 197, 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.164>
36. Liu, X., Ziv, G., Bakshi, B.R., 2018. Ecosystem services in life cycle assessment – Part 2: adaptations to regional and serviceshed information. *J. Clean. Prod.* 197, 772–780. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.283>
37. De Luca Peˆna, L.V., Taelman, S.E., Prˆeat, N., Boone, L., Van der Biest, K., Custˆodio, M., Hernandez Lucas, S., Everaert, G., Dewulf, J., 2022. Towards a comprehensive sustainability methodology to assess anthropogenic impacts on ecosystems: review of the integration of life cycle assessment, environmental risk assessment and ecosystem services assessment. *Sci. Total Environ.* 808, 152125 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152125>
38. D’Amato, D., Gaio, M., Semenzin, E., 2020. A review of LCA assessments of forest-based bioeconomy products and processes under an ecosystem services perspective. *Sci. Total Environ.* 706, 135859 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135859>
39. Persson, L., Arvidson, A., Lannerstad, M., Lindskog, H., Morrissey, T., Nilsson, L., Noel, S., Senyagwa, J., 2010. Impacts of Pollution on Ecosystem Services for the Millennium Development Goals. Stockholm Environment Institute.
40. Carpenter, S.R., Mooney, H.A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R.S., Diaz, S., Dietz, T., Duraipappah, A.K., Oteng-Yeboah, A., Pereira, H.M., Perrings, C., Reid, W.V., Sarukhan, J., Scholes, R.J., Whyte, A., 2009. Science for managing ecosystem services: beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 106, 1305–1312. <https://doi.org/10.1073/pnas.0808772106>
41. Cord, A.F., Bartkowski, B., Beckmann, M., Dittrich, A., Hermans-Neumann, K., Kaim, A., Lienhoop, N., Locher-Krause, K., Priess, J., Schrˆoter-Schlaack, C., Schwarz, N., Seppelt, R., Strauch, M., Vˆaclavik, T., Volk, M., 2017. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: main concepts, methods and the road ahead. *Ecosyst. Serv.* 28, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.07.012>
42. Schˆagner, J.P., Brander, L., Maes, J., Hartje, V., 2013. Mapping ecosystem services’ values: current practice and future prospects. *Ecosyst. Serv.* 4, 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.02.003>
43. Qiu, J., Carpenter, S.R., Booth, E.G., Motew, M., Kucharik, C.J., 2020. Spatial and temporal variability of future ecosystem services in an agricultural landscape. *Landsc. Ecol.* 35, 2569–2586. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01045-1>
44. Lueddeckens, S., Saling, P., Guenther, E., 2020. Temporal issues in life cycle assessment—a systematic review. *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 1385–1401. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01757-1>
45. Pignˆe, Y., Gutiˆerrez, T.N., Gibon, T., Schaubroeck, T., Popovici, E., Shimako, A.H., Benetto, E., Tiruta-Barna, L., 2020. A tool to operationalize dynamic LCA, including time differentiation on the complete background database. *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 267–279. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01696-6>
46. Folke, C., Carpenter, S., Walker, B., Scheffer, M., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C. S., 2004. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 35, 557–581. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.021103.105711>
47. Bakshi, B. R., Gutowski, T. G., Sekulic, D. P., 2018. Claiming Sustainability: Requirements and Challenges. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 6(3): 3632–3639.
48. Assessment Part 1: A Computational Framework. *Journal of Cleaner Production* 197(P1): 314-322. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.06.164
49. Environmental policy integrated climate model. Accessed August 2018. <https://epicapex.tamu.edu/epic/>
50. 50 ARMS Farm Financial and Crop Production Practices. Accessed August 2018. <https://data.ers.usda.gov/reports.aspx?ID=17883>
51. National Aeronautics and Space Administration Prediction of World-wide Energy Resource Project Data Sets. Accessed August 2018. <https://power.larc.nasa.gov/>
52. Global Wind Atlas. Accessed August 2018. <https://globalwindatlas.info/>
53. Beaumont Research Center iAIMS Climatic Data. Accessed August 2018. <https://beaumont.tamu.edu/climaticdata/WorldMap.aspx>
54. Web Soil Survey. Accessed August 2018. <https://websoilsurvey.sc.egov.usda.gov/App/HomePage.htm>
55. Kadlec, R.H., 1997. Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design. *Water Science and Technology* 35(5): 149–156.

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 574.583, 502.573

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.18>

СТАН РІЧКИ СІВЕРСЬКИЙ ДОНЕЦЬ ТА ШЛЯХИ ЙОГО ПОКРАЩЕННЯ. ВПЛИВ ВОЄННИХ ДІЙ НА ВОДНІ РЕСУРСИ УКРАЇНИ

Божко Т.В.¹, Ігнатенко М.Я.^{1,2}

¹Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»
вул. Бакуліна, 6, 61166, м. Харків

²Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області
вул. Космічна, 21, 61165, м. Харків
tbozko082@gmail.com, ignatenkomihail787@gmail.com

В статті проведено аналіз екологічного стану річки Сіверський Донець. Воєнні дії РФ на території України впливають на стан водних об'єктів, порушують процеси самоочищення водних екосистем та їх здатність до відновлення і функціонування. Розглянуто основні екологічні наслідки антропогенного навантаження під час воєнних дій на водні об'єкти. Обговорюється дія антропогенних факторів у водних об'єктах, яка викликає порушення екологічної рівноваги в процесах саморегуляції, що призводить до різкого погіршення якості води. Серед основних наслідків впливу воєнних дій на водні екосистеми є забруднення вод важкими металами, нафтопродуктами та іншими небезпечними компонентами, руйнування та підрив дамб, насосних станцій, підтоплення територій та погіршення їхнього санітарного стану, посилення процесів евтрофікації. Проаналізовано методи біомеліорації, що здатні покращити ситуацію за рахунок процесів, близьких до природних, а також підвищити резистентність екосистем до чинників антропогенного навантаження, зокрема й тих, що спричиняють евтрофікацію. Проте увага щодо екологічної ролі, наслідків біологічної меліорації та оцінок ініційованих змін у екосистемах посилюється у зв'язку з сучасними вимогами.

Розглянуто питання доцільності ведення спеціального моніторингу, перш за все біологічного, з метою контролю за забрудненням і перебігом внутрішньоводоймових процесів. Запропоновано використання методів біоіндикації та біотестування для інтегральної оцінки стану водної екосистеми. Визначення екологічного стану річки Сіверський Донець за допомогою біоіндикації є важливим аспектом моніторингу водних екосистем. Біоіндикація використовує живі організми як індикатори екологічного стану води, що дозволяє отримати інформацію про якість води та вплив забруднень. Біомеліорація є потужним інструментом для відновлення річок після військових дій. Вона не лише покращує екологічний стан водойм, але й сприяє відновленню соціально-економічної стабільності в регіонах, що постраждали від конфліктів. Побороти наслідки воєнних дій на водні екосистеми можна за допомогою комплексних заходів. *Ключові слова:* військові дії, забруднення, водна інфраструктура, водні екосистеми, біологічна меліорація, самоочищення, біоценоз, моніторинг, водні об'єкти, відновлення водних екосистем, збереження водойм, токсичність, біотестування.

State of the Siverskyi Donets river and ways of its improvement. Impact of military actions on water resources of Ukraine. Bozhko T., Ignatenko M.

The article analyzes the ecological state of the Siverskyi Donets River. Military actions of the Russian Federation on the territory of Ukraine affect the state of water bodies, disrupt the self-cleaning processes of water ecosystems and their ability to restore and function. The main ecological consequences of anthropogenic load during military operations on water bodies are considered. The action of anthropogenic factors in water bodies is discussed, which causes a violation of the ecological balance in the processes of self-regulation, which leads to a sharp deterioration of water quality. Among the main consequences of the influence of military actions on water ecosystems are water pollution with heavy metals, oil products and other dangerous components, the destruction and undermining of dams, pumping stations, flooding of territories and deterioration of their sanitary condition, strengthening of eutrophication processes. Biomelioration methods capable of improving the situation due to processes close to natural ones, as well as increasing the resistance of ecosystems to factors of anthropogenic load, including those that cause eutrophication, have been analyzed. However, attention to the ecological role, consequences of biological reclamation and evaluations of initiated changes in ecosystems is increasing in connection with modern requirements. The question of the expediency of conducting special monitoring, first of all biological, in order to control pollution and the course of intra-reservoir processes, was considered. The use of bioindication and biotesting methods for the integral assessment of the state of the water ecosystem is proposed. Determining the ecological state of the Siverskyi Donets River using bioindication is an important aspect of monitoring aquatic ecosystems. Bioindication uses living organisms as indicators of the ecological state of water, which allows obtaining information about water quality and the impact of pollutants. Bioremediation is a powerful tool for restoring rivers after military operations. It not only improves the ecological condition of water bodies, but also contributes to the restoration of socio-economic stability in regions affected by conflicts. It is possible to overcome the consequences of military actions on water ecosystems with the help of complex measures. *Key words:* military actions, pollution, water infrastructure, water ecosystems, biological reclamation, self-purification, biocenosis, monitoring, water objects, restoration of water ecosystems, conservation of water bodies, toxicity, biotesting.

Постановка проблеми. Річка Сіверський Донець є головною і найважливішою водною артерією сходу України. Він забезпечує потреби у воді населення, сільського господарства та промислового комплексу Луганської, Донецької та Харківської областей [1; 2; 3]. Більша частина річки Сіверський Донець знаходиться в зоні ведення активних військових дій. Екологічними наслідками вторгнення РФ є: забруднення хімічними речовинами (Витік паливних матеріалів та інших хімічних речовин з затопленої техніки може призвести до забруднення води та ґрунту. Це може негативно вплинути на здоров'я людей, а також на флору та фауну річки); забруднення вибухонебезпечними предметами (Затоплені снаряди та міни роблять річку небезпечною для людей та судноплавства); знищення екосистеми (Бойові дії та забруднення води можуть призвести до знищення рибних ресурсів, рослин та інших водних організмів). Потрібно провести комплексну оцінку екологічного стану басейну річки Сіверський Донець та вирішити завдання, які призведуть до поліпшення якості води та підвищення резистентності екосистеми.

Актуальність дослідження. В результаті військових дій у водних об'єктах виникають порушення екологічної рівноваги в процесах їх саморегуляції, що призводить до різкого погіршення якості води. У зв'язку з цим, останнім часом все більша увага приділяється методам біомеліорації, що здатні покращити ситуацію за рахунок процесів, близьких до природних, а також підвищити резистентність екосистем до чинників антропогенного навантаження, зокрема й тих, що спричиняють евтрофікацію. Моніторингова оцінка екологічного стану річки Сіверський Донець необхідна для прийняття управлінських рішень та визначення шляхів інтегрованого управління водними ресурсами та прогнозування стану водних ресурсів.

Новизна. Виконана екологічна оцінка стану річки Сіверський Донець за біологічними методами. Проаналізовано якісний та кількісний склад біоти водойми. Запропоновано використання біомеліоративних методів поліпшення якості води.

Методологічне або загальнонаукове значення. Екологічна оцінка стану річки Сіверський Донець дозволить визначити спроможність та інтенсивність перебігу у водоймі процесів самоочищення та відновлення екосистеми після дії забруднювачів, що дозволить побудувати оптимальну модель управління і досягти високого екологічного статусу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Було проаналізовано публікації останніх років з цих питань. Проблеми оцінки екологічного стану водних ресурсів, їх управління, відновлення водних екосистем досліджувались у наукових працях А. Гриценка, О. Васенка, В. Рацлава, А. Яцика, Б. Барановського, Т. Клауссена, Т. Іванової, І. Герасименка, Т. Левченко, В. Ткаченко, Д. Сміта, К. Паттерсона та інших [6; 7; 8; 10; 14]. Ці автори досліджували вплив військо-

вих дій на екосистеми, оцінювали вплив конфліктів на біорізноманіття водних екосистем, особливо в контексті постконфліктного відновлення, вивчали зміни екосистем у результаті військових дій. Сучасні дослідження підкреслюють важливість розуміння екологічних наслідків військових дій для розробки стратегій відновлення водних біоценозів у постконфліктних зонах [12].

Викладення основного матеріалу. Воєнні дії суттєво впливають на якість водних ресурсів України, до них потрапляє велика кількість забруднюючих речовин через підриви нафтохранищ, складів паливно-мастильних матеріалів, а також через руйнування агресором інфраструктури підприємств та очисних споруд. Повномасштабне вторгнення РФ в Україну 2022 року спричинило забруднення річки Сіверський Донець, яка є важливим джерелом водопостачання для східних регіонів країни. Бойові дії призвели до затоплення військової техніки, снарядів та інших небезпечних предметів, а також до витоків паливних матеріалів [9; 12]. Це негативно вплинуло на екосистему річки та несе ризик для людей, які використовують її воду.

Наслідки забруднення:

– **Забруднення хімічними речовинами:** Витік паливних матеріалів та інших хімічних речовин з затопленої техніки може призвести до забруднення води та ґрунту. Це може негативно вплинути на здоров'я людей, а також на флору та фауну річки.

– **Забруднення вибухонебезпечними предметами:** Затоплені снаряди та міни роблять річку небезпечною для людей та судноплавства.

– **Знищення екосистеми:** Бойові дії та забруднення води можуть призвести до знищення рибних ресурсів, а також інших водних організмів.

– **Руйнування інфраструктури:** Знищення дамб, каналів та інших гідротехнічних споруд може змінити рівень води, викликати повені або осушення території.

– **Зміна русла річки:** Військові дії можуть викликати ерозію та переміщення наносів, що змінює русло річки.

– **Руйнування інфраструктури:** Знищення дамб, каналів та інших гідротехнічних споруд може змінити рівень води, викликати повені або осушення території.

– **Зміна русла річки:** Військові дії можуть викликати ерозію та переміщення наносів, що змінює русло річки.

Шляхи відновлення:

– **Розмінування:** Для того, щоб зробити річку безпечною для людей та судноплавства, необхідно провести розмінування. Це складний та ризикований процес, який потребує залучення фахівців.

– **Очищення води:** Для очищення води від хімічних забруднень можуть бути використані різні методи, такі як фільтрація, сорбція та біологічне очищення.

– **Відновлення екосистеми:** Після очищення води та розмінування, необхідно взяти заходів для відновлення екосистеми річки. Це може включати зарибнення, відновлення прибережної рослинності та інші заходи.

Розмінування, очищення води та відновлення екосистеми річки – це кроки, які допоможуть повернути Сіверський Донець до його природного стану та зробити його безпечним для людей. В інших країнах, які пережили війни, також стикалися з проблемою забруднення водних об'єктів [4; 5; 6]. Наприклад, після Другої світової війни було проведено розмінування Чорного моря. Загалом, військові дії можуть призвести до серйозних екологічних, соціальних і економічних проблем для річки Сіверський Донець і прилеглих територій. Важливо взяти заходів для моніторингу та відновлення екосистеми річки після закінчення конфлікту, а також для запобігання подібним впливам у майбутньому. Внаслідок російської військової агресії з 24 лютого в басейні Сіверського Дінця порушено систему управління водними ресурсами, що створює ризики сталого водопостачання. Через бойові дії в регіоні проблема якісного стану річок стала ще більш актуальною, адже російські війська завдають цілеспрямованих ударів по інфраструктурі для забору, очищення та постачання води, а також по каналізаційних очисних спорудах, зазнали пошкоджень об'єкти водопостачання та водовідведення у містах Харківської, Донецької і Луганської областей. Значно впливає на якість поверхневих вод пошкодження в результаті воєнних дій електропостачання об'єктів критичної інфраструктури, вимкнення струму призводить до припинення роботи очисних споруд у населених пунктах [10]. У разі вимкнення електропостачання припиняється подача повітря на аеротенки очисних споруд, що призводить до загибелі мікроорганізмів активного мулу і процес очищення стічних вод не відбувається, внаслідок чого забруднені стоки з очисних споруд потрапляють безпосередньо у річки [12]. Після відновлення моніторингу в регіоні фіксуються підвищені концентрації в р. Сіверський Донець по азоту амонійному, що є показником недостатньої ефективної роботи очисних споруд. Також негативні прояви військових дій відзначаються за результатами попередніх досліджень (червень-липень).

Так, у суббасейні річки Сіверський Донець було зафіксоване перевищення екологічних нормативів якості по таких небезпечних речовинах, як пестициди, поліароматичні вуглеводні, леткі органічні сполуки та важкі метали. Також було виявлено наявність у воді нафтопродуктів. Посилює проблему забруднення річок низька водність, яка спостерігається в басейні Сіверського Дінця понад 10 років, і цей рік не є виключенням [3]. Маловоддя на даний час спостерігається не тільки в басейні Дінця, але і на річках по всій Європі.

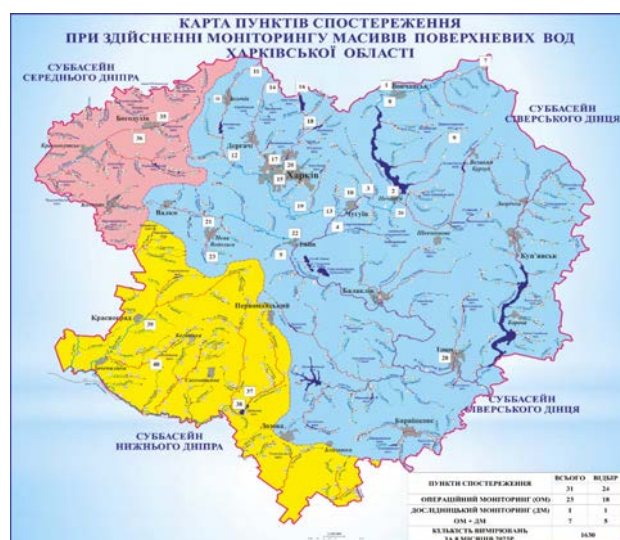


Рис. 1. Карта пунктів спостереження при здійсненні моніторингу РОВР у Харківській області

Екологічна оцінка якості води – це оцінка стану водних об'єктів із використанням біологічних властивостей та інших прямих вимірювань біоти, заснована на системі біоіндикації [15; 16]. Протягом останніх 20 років в Європейському Союзі відбувся перехід до оцінки екологічного стану водних об'єктів у відповідності з біологічною складовою. Основною причиною переходу на біологічний контроль є той факт, що угруповання водних організмів відображають сукупний вплив факторів середовища на якість поверхневих вод. Біологічні методи ґрунтуються на визначенні кількісного та якісного складу біоти. Відповідь біоти усереднює «ефект забруднення» у часі [18]. Біологічні методи дозволяють оцінити спроможність та інтенсивність перебігу у водному об'єкті процесів самоочищення та відновлення екосистеми після дії забруднювача. Головними перевагами біологічних методів оцінки якості води є: низька вартість, наукова обґрунтованість, швидке отримання результатів, можливість виявити результати впливу попереднього чи довготривалого забруднення, доступність для широкого кола фахівців, що дуже важливо під час військових дій. Зараз існують різні системи біоіндикації вод. Найвживанішими є американська система RPBs (Rapid Bioassessment Protocols) та британська RIVPACS (River Invertebrate Prediction and Classification System) [17]. Суттєвий поштовх до розвитку і вдосконалення системи біоіндикації у країнах ЄС дала Європейська Рамкова водна директива (WFD) [13]. Основною метою Директиви є досягнення високого екологічного статусу для усіх водних систем. Відповідно до WFD розроблено моніторингові програми, що є основою для управління водними ресурсами.

Проект ПУРБ Дону, що повинен забезпечити інтегроване управління водними ресурсами в суббасейні р. Сіверський Донець в умовах воєнного стану і заходи для досягнення доброго стану вод, схвалений на засіданні басейнової ради Сіверського Дінця

та нижнього Дону в червні 2024 року та готується до подання на затвердження до Кабінету Міністрів України. Саме цей стратегічний документ містить програму заходів для вирішення головних водно-екологічних проблем (з урахуванням впливу військових дій) задля досягнення доброго екологічного і хімічного стану вод району басейну річки Дон [5].

У 2024 році державний моніторинг поверхневих вод в суббасейні річки Сіверський Донець здійснюється у 47 пунктах моніторингу в Харківській та Донецькій областях (з урахуванням оперативної військової ситуації). У разі аварійного забруднення забезпечується виконання дослідницького моніторингу. Вимірювання здійснюється за 74 показниками. За результатами останніх моніторингових, поверхневі води суббасейну річки Сіверський Донець залишаються частково забрудненими. Фіксуються підвищення концентрації по групі азоту та нафтопродуктах відносно середньобогаторічних концентрацій, але без перевищення нормативних значень. Тоді як до початку військової агресії РФ, нафтопродукти у районах поверхневих питних водозаборів взагалі не фіксувались. Зафіксовано часткове перевищення екологічних нормативів якості. Зокрема, у річці Кривий Торець, вище Костянтинівки, у п'ять разів перевищена норма свинцю та у шість кадмію.

Згідно Плану управління річковим басейном Дону, правою притокою якого є річка Сіверський Донець, фахівці мають зменшити рівень забруднення у водоймах, відновити гідрологічний режим, запобігти виснаженню підземних вод, ліквідувати наслідки негативного впливу військових дій. План розрахований на шість років. До виконання мають приступити у 2025-му.

Побороти наслідки воєнних дій на водні екосистеми можна за допомогою комплексних заходів, які включають:

1. Очищення забруднених водойм: Проведення екологічних операцій для видалення забруднюючих речовин, таких як нафта, хімікати та інші відходи. Це може включати біоремедіацію, гідравлічне очищення та використання спеціальних матеріалів для збору забруднень.

2. Відновлення природних середовищ: Відновлення деградованих екосистем через садіння водоростей, відновлення рибних угідь та покращення умов для флори і фауни.

3. Моніторинг якості води: Регулярний контроль якості води для виявлення забруднень і їх джерел, а також для оцінки стану екосистем.

4. Законодавче регулювання: Введення і підтримка екологічних норм та стандартів для захисту водних ресурсів, що дозволить запобігти подальшому забрудненню.

5. Освіта і підвищення обізнаності: Проведення інформаційних кампаній для місцевих жителів про важливість збереження водних екосистем і відповідальне використання водних ресурсів.

6. Залучення міжнародної допомоги: Співпраця з міжнародними організаціями для отримання технічної і фінансової допомоги в відновленні екосистем.

7. Створення резервів: Встановлення водних заповідників та охоронних зон для збереження біорізноманіття і природних ресурсів.

8. Участь громади: Залучення місцевих громад до процесу відновлення, що допоможе втілити більш адаптовані до місцевих умов рішення.

Ці заходи можуть суттєво сприяти відновленню і збереженню водних екосистем, постраждалих від військових дій. Моніторинг стану водойм за допомогою біотестування є ефективним методом оцінки екологічного стану водних екосистем. Цей підхід використовує живі організми для визначення впливу забруднюючих речовин і загального стану середовища. Визначення екологічного стану річки Сіверський Донець за допомогою біоіндикації є важливим аспектом моніторингу водних екосистем. Біоіндикація використовує живі організми як індикатори екологічного стану води, що дозволяє отримати інформацію про якість води та вплив забруднень. Основні етапи лабораторних досліджень:

1. Вибір індикаторних видів:

– **Безхребетні:** Наприклад, бентосні організми, такі як ракоподібні, молюски, та інші, які чутливі до змін у якості води.

– **Риби:** Склад і чисельність рибних видів, чутливих до забруднень.

– **Водорості:** Визначення видового складу та біомаси.

2. Збір зразків:

– Проведення експедицій для збору зразків води та організмів з різних ділянок річки. Важливо обирати ділянки, які можуть піддаватися різним рівням забруднення (промислові, сільськогосподарські, природні).

3. Лабораторні дослідження:

– Аналіз зібраних зразків на вміст забруднюючих речовин, токсичність, а також визначення видової різноманітності та чисельності організмів.

4. Оцінка екологічного стану:

– Використання біоіндексів, таких як:

– Індекс біологічної різноманітності (Biodiversity Index) – оцінка різноманіття видів.

– Індекс сапробності (Saprobity Index) – вказує на ступінь забруднення органічними речовинами.

– Індекс якості води (Water Quality Index) – загальна оцінка стану води на основі кількох параметрів.

5. Інтерпретація результатів:

– Порівняння отриманих даних з нормативними значеннями. Визначення потенційних джерел забруднення (промислові скиди, сільськогосподарські відходи).

Біоіндикація є ефективним методом для оцінки екологічного стану річки Сіверський Донець. Регулярний моніторинг і аналіз даних допоможуть виявити проблеми та розробити стратегії для поліпшення якості води, збереження біорізноманіття і забезпечення сталого розвитку регіону [6; 7].

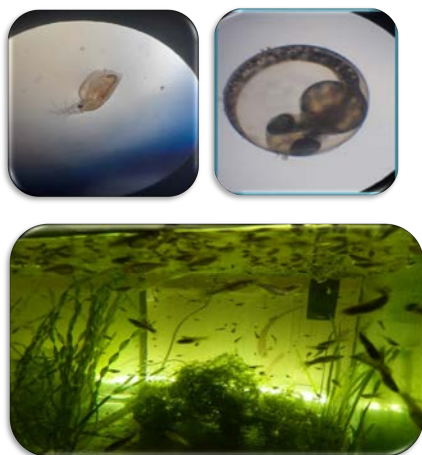


Фото 1–3. Біотести. Біотестування є потужним інструментом для моніторингу стану водойм і може стати основою для розробки стратегій їх охорони і відновлення (Лабораторія моніторингу вод та ґрунтів РОВР у Харківській області)

Біоіндикація є ефективним методом для оцінки екологічного стану річки Сіверський Донець. Регулярний моніторинг і аналіз даних допоможуть виявити проблеми та розробити стратегії для поліпшення якості води, збереження біорізноманіття і забезпечення сталого розвитку регіону [6; 7]. Біоіндикація використовує живі організми як індикатори екологічного стану води, що дозволяє отримати інформацію про якість води та вплив забруднень.



Фото 4–7. Лабораторні дослідження (РОВР у Харківській області)

Біомеліорація – це процес відновлення екосистем за допомогою використання живих організмів, що може бути особливо ефективним для відновлення річок після військових дій [11]. Ось кілька способів, як біомеліорація може допомогти:

– **Фітомеліорація:** Водні рослини можуть покращити якість води, поглинаючи забруднювальні речовини та надаючи притулок для водних організмів.

– **Відновлення прибережної рослинності:** Відновлення рослин на берегах річок допоможе запобігти ерозії, покращити стабільність ґрунтів і створити природні бар'єри.

– **Фітоочищення:** Використання рослин для видалення забруднюючих речовин з води, таких як важкі метали та пестициди.

– **Біоремедіація:** Залучення мікроорганізмів, які можуть розкласти токсичні речовини і покращувати якість води.

– **Стимулювання розвитку популяцій риб і безхребетних:** Створення умов для відновлення природних популяцій водних організмів через покращення середовища існування.

– **Інтродукція індикаторних видів:** Відновлення чутливих до забруднення видів може слугувати показником екологічного стану річки.

– **Встановлення природних фільтрів:** Рослинність може діяти як природний фільтр, зменшуючи надходження забруднень з прилеглих територій.

– **Створення захисних зон:** Запровадження охоронних територій для запобігання антропогенному впливу на річкові екосистеми.

– **Зміцнення берегів:** Рослинність може допомогти зміцнити береги річки, що зменшує ризик ерозії та затоплень.

– **Покращення водорегуляції:** Відновлення водних екосистем сприяє утриманню води та зменшенню ризиків, пов'язаних із зміною клімату.

– заходів для місцевого населення про важливість збереження екосистем і участь у відновленні.

– **Волонтерські проекти:** Залучення місцевих жителів до програм з висадки рослин і очищення річок.

Висновки. За даними моніторингу гідрохімічних показників р. Сіверський Донець та її основних приток здійснено аналіз сучасного стану водних об'єктів басейну, екологічну оцінку стану водних об'єктів. Поверхневі води річки Сіверський Донець належать переважно до III класу якості 4 категорії (задовільні, слабо забруднені). Визначення екологічного стану річки Сіверський Донець за допомогою біоіндикації є важливим аспектом моніторингу водних екосистем. Побороти наслідки воєнних дій на водні екосистеми можна за допомогою комплексних заходів. Біологічні методи дозволяють оцінити спроможність та інтенсивність перебігу у водному об'єкті процесів самоочищення та відновлення екосистеми після дії забруднювача. Біомеліорація допоможе відновити екосистеми річок після військових дій. Для забезпечення комплексного гідроекологічного моніторингу за процесами та явищами у межах басейну річки необхідно розв'язати ряд принципових питань, без яких неможливо побудувати повноцінні оптимальні моделі управління басейном та розробити правила його експлуатації. Підтримання якості води на високому рівні та збереження біорізноманіття мають стати ключовими завданнями будь-яких заходів у галузі водокористування, раціонального природокористування та здійснення природоохоронних дій у водоймах.

Література

1. Енциклопедія Сучасної України/ под ред. І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк та ін. Київ: КБ ЕСУ НАН України, 2001. Т. 2. 872 с.
2. Строкаль В.П., Ковпак А.В. Причинно-наслідкові зв'язки забруднення біогенними елементами басейну річки Дніпра: синтез теоретичних даних. Науково-практичний журнал «Екологічні науки № 2(35), 2021. С. 37-44.
3. Строкаль В.П., Ковпак А.В. Екологічний стан природних вод суббасейну Верхнього Дніпра та Десни: показники якості води і можливі причини їх погіршення. Науковий журнал «Біологічні системи: теорія та інновації». Том 12, № 2, 2021. С. 24–40.
4. Водний Кодекс України / ВВР України. 1995. № 213/95.
5. Сіверський Донець: Басейн Здоров'я – людям життя! Київ: ВАІТЕ, 2018. С. 30.
6. Васенко О.Г. Екологічні основи водоохоронної діяльності в теплоенергетиці. Харків: УкрНДІЕП, 2000. Т. 2. 243 с.
7. Романенко В.Д., Жукинський В.М., Оксіюк О.П. та ін., Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями Київ: Символ-Т, 1998. 28 с.
8. Яцик А.В. Вода України: проблеми, перспективи. *Водне господарство України* / А.В. Яцик . Київ, 1996. С. 3–8.
9. Загальнодержавна цільова програма розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021року: Закон України від 24.05.2012 р. № 4836-VI.
10. Білоцерківська Н.О., Сидоренко І.В. Якісний аналіз вод басейну р. Сіверський Донець за гідрохімічними показниками. *Водне господарство*. 2018. № 5. С. 50.
11. Розробка біологічного обґрунтування і режиму біологічної меліорації Муромського водосховища Харківської області. Харків: УкрНДІЕП. 2018. 31с.
12. Оцінка екологічної шкоди та пріоритети відновлення довкілля на сході України. Київ : ВАІТЕ, 2017. С. 87–88.
13. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. Київ, 2006. 240с.
14. Мокін В.Б. Технологія оптимізації управління водними ресурсами басейну р. Дністер шляхом автоматизації складання його водогосподарського балансу. XIV Міжнародна науково-практична конференція: Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: 5–9 жовтня 2015 р. Київ, 2015. С. 131–134.
15. Мальцев В.І., Карпова Г.О., Зуб Л.М. Визначення якості води методами біоіндикації. Київ : НЦЕБМ НАН України, ІНЕКО, 2011. 112 с.
16. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / В.Д. Романенко, В.М. Жукинський, О.П. Оксіюк та ін. Київ : ВІПОЛ, 1998. 28 с.
17. Досвід використання «Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними критеріями» (пояснення, застереження, приклади) / А.В. Яцик, В.М. Жукинський, А.П. Чернявська, І.Є. Єзловецька. Київ : Символ-Т, 1998. 48 с.
18. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Definitions of Main Terms. Київ, 2006. 240 с.

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

УДК 911.9:620.91

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.19>

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АГРОФОТОВОЛЬТАЇКИ У ЛЬВІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Лемага Н.М.

Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Університетська, 1, 79007, м. Львів
nadiia.lemega@lnu.edu.ua

Львівська область є однією із передових областей у західному регіоні щодо розвитку сонячної енергетики. Зокрема, тут була збудована перша сонячна станція на заході країни у 2012 році та розміщена найбільша сонячна станція в регіоні.

Розвиток сонячної енергетики є одним із ключових пріоритетів в Україні в цілому та Львівській області зокрема. Через вигідне географічне положення рівнинна територія області має хороші передумови для розвитку сонячної енергетики. Зокрема, рівнинна територія області має високі показники глобального горизонтального опромінення, які необхідні для розвитку сонячної енергетики. Найменші показники глобального горизонтального опромінення характерні для гірської частини області, зокрема для Сколівських Бескидів. Так, у Львівській області частка сонячної енергетики у встановленій потужності від об'єктів відновлюваної енергетики становить 91% (2022 рік).

Проте, однією з головних проблем при будівництві сонячних електростанцій є значна площа станції. У Львівській області для вироблення 1 МВт електроенергії використовують ділянки з площею, яка коливається від 0,0028 км² до 0,0068 км². Така відмінність у площі залежить в першу чергу від природніх передумов, а також від встановлених типів фотоелектричних панелей. Сучасні сонячні панелі мають коефіцієнт корисної дії до 20%.

Саме тому, доцільно використовувати агрофотовольтаїчні системи при будівництві сонячних станцій в майбутньому в області. Головна мета – ефективно використання площі, яка використовується для будівництва сонячних станцій в цілях вирощування сільськогосподарських культур. Це дозволить ефективно використати площу під встановлення сонячних панелей. В цілях агрофотовольтаїки пропонуємо розглядати деградовані та малопродуктивні землі у межах області, а також як пілотні проекти – вирощування фотоелектричних систем для садів у Городоцькій громаді Львівського району.

Станом на сьогодні агрофотовольтаїчні системи малопоширені у Львівській області, а в промисловому масштабі – не поширені. Цей напрямок енергетики є доволі перспективним та потребує додаткового вивчення та впровадження у області.
Ключові слова: відновлювана енергетика, сонячна енергетика, деградовані землі, агрофотовольтаїка, відновлювані джерела енергії, Львівська область.

Prospects for the development of agro-photovoltaics in the Lviv region. Lemeha N.

Lviv region is one of the leading regions in the Western region in terms of solar energy development. In particular, the first solar power plant in the west of the country was built here in 2012 and is the largest solar power plant in the region.

The development of solar energy is one of the key priorities in Ukraine in general and Lviv region in particular. Due to its favourable geographical location, the region's flat territory has good prerequisites for the development of solar energy. In particular, the plain territory of the region has high global horizontal irradiation, which is essential for the development of solar energy. The lowest global horizontal exposure rates are typical for the mountainous part of the region, in particular for the Skole Beskydy. In Lviv region, the percentage of solar energy in the installed capacity of renewable energy facilities is 91% (2022).

However, one of the main problems in the construction of solar power plants is the large area of the plant. In the Lviv region, plots with an area ranging from 0.0028 km² to 0.0068 km² are used to generate 1 MW of electricity. This variation in area depends primarily on the natural conditions and the types of photovoltaic panels installed. Modern solar panels have an efficiency of up to 20%.

That is why it is advisable to use agro-photovoltaic systems in the construction of solar power plants in the region in the future. The main goal is to make efficient use of the area used for the construction of solar power plants for growing crops. This will allow for efficient use of the area for the installation of solar panels. For the purposes of agro-photovoltaics, we propose to consider degraded and unproductive lands within the region, as well as to grow photovoltaic systems for gardens in the Horodok community of Lviv district as pilot projects.

As of today, agro-photovoltaic systems are not widespread in Lviv region, and they are not widespread on an industrial scale. This area of energy is quite promising and requires further study and implementation in the region. *Key words:* renewable energy, solar energy, degraded land, agro-photovoltaics, renewable energy sources, Lviv region.

Постановка проблеми. Однією із головних проблем розвитку сонячної енергетики слід віднести значні площі під станцій. У Львівській області для вироблення 1 МВт електроенергії використовують ділянки з площею, яка коливається від 0,0028 км² до 0,0068 км². Така відмінність у площі залежить в першу чергу від природніх передумов, а також від встановлених типів фотоелектричних панелей.

У цілях сонячної енергетики слід використовувати деградовані та малопродуктивні землі. Проте, за умови впровадження технології агрофотовольтаїки в області можна будувати сонячні станції на землях сільськогосподарського призначення.

Актуальність дослідження. Надзвичайно важливим для Львівської області є забезпечення виробництва чистої електроенергії при тому, з мінімальним впливом на довкілля. Саме тому, впровадження агрофотовольтаїки допоможе забезпечити баланс між енергетикою та сільськогосподарським виробництвом в області.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Досліджено тенденції розвитку агрофотовольтаїки та можливості впровадження у Львівській області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями перспектив використання агрофотовольтаїчної сонячної станції для поєднання виробництва електроенергії, збереження ґрунтів та застосування їх у сільському господарстві займаються у Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу [1], можливості впровадження агрофотовольтаїки як новий ландшафтотворчий елемент малих поселень – у Національному університеті «Львівська Політехніка» [2]. Ефективність використання агрофотовольтаїки вивчали науковці Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [3].

Метою роботи є оцінка потенціалу розвитку агрофотовольтаїки та можливості впровадження у Львівській області.

Новизна. У статті досліджено тенденції розвитку агрофотовольтаїки та можливості впровадження у Львівській області.

Методологічне значення. Для оцінки агрофотовольтаїки використано дані міжнародних наукових публікацій, офіційних ресурсів виробників сонячних панелей, попередніх наукових досліджень, проаналізовано перспективи впровадження агрофотовольтаїки у Львівській області.

Викладення основного матеріалу. Львівська область має вдале географічне положення для розвитку сонячної енергетики, а також такого напрямку як агрофотовольтаїка.

За визначенням В. Ференца [3] агрофотовольтаїка – одночасне використання землі для «збирання» сонячної енергії та ведення сільського господарства. Колектив авторів І. Ващишак, С. Ващишак [1] під визначенням агрофотовольтаїка розуміють сонячні електростанції, які розміщені над ґрунтами сільськогосподарського призначення та повинні забезпечувати певний рівень урожайності при одночасному генеруванні електроенергії.

Концепцію агрофотовольтаїки буда запропоновану у 1982 році Арміном Застроу та Адольфом Гетцбергером. Головна мета – ефективно викори-

стання площі, яка використовується для будівництва сонячних станцій в цілях вирощування сільськогосподарських культур. Для максимальної ефективності таких систем необхідно правильно обрати культури та правильний кут розміщення сонячних панелей [4].

На двох верхніх рисунках (рис. 1,а) бачимо два різні поля площею по 1 га, де на одному 100% засіяно пшеницю, а на іншому – 100% встановлено сонячними панелями. Якщо другому випадку засіяти 80% пшеницею та встановити 80% поля сонячними панелями на двох рівноцінних полях, то в такому випадку збільшується ефективність на понад 60% як вражаю пшениці, так і виробництва електроенергії.

При вирощуванні картоплі, цей показник становитиме 86%.

Основна техніка агрофотовольтаїки подана на рис. 1–2.

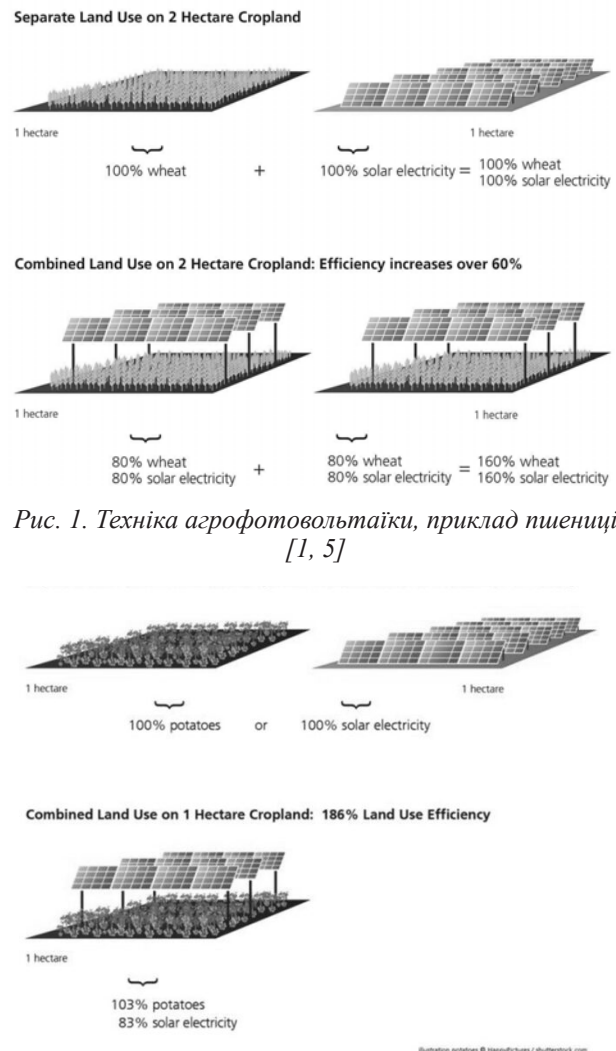


Рис. 1. Техніка агрофотовольтаїки, приклад пшениці [1, 5]

Рис. 2. Техніка агрофотовольтаїки, приклад картоплі [3, 7]

Серед головних переваг агрофотовольтаїки слід виділити захист посівів та врожаю від екстремаль-

них погодних умов, зокрема вітру, злив, спеки тощо. Також з використанням агрофотовольтаїки можна підвищити врожайність сільськогосподарських культур. Проте є й ряд недоліків, зокрема великі витрати, проблеми захисту ґрунтів, в також збалансоване сільськогосподарське виробництво та виробництво електроенергії [6].

Ще одним важливим елементом для розвитку агрофотовольтаїки є вибір культур, які можна вирощувати. До таких культур можна віднести квасолю, перець, помідори, капуста тощо [6].

Існує три головні типи агрофотовольтаїки:

– стаціонарні сонячні панелі над посівом культур;

– підняті (навісні) сонячні панелі;

– сонячні теплиці.

Розглянемо детальніше кожен із типів. Стаціонарні сонячні панелі над посівом культур – це найпоширеніший тип агрофотовольтаїки для великомасштабних проектів (потужністю понад 5 МВт) і полягає у встановленні наземних сонячних станцій, а поміж ними – вирощування сільськогосподарських культур (рис. 3,а). Серед переваг такого типу станцій слід віднести захист врожаю від несприятливих погодних умов, а також покращення росту врожаю [7].

Наступний тип – підняті (навісні) сонячні панелі, який полягає у розташування сонячних панелей на висоті (від 2,5 до 5 м в залежності від типу культури). Цей тип агрофотовольтаїки часто використовується у сажах та виноградниках (рис. 3,б) [7, 8].

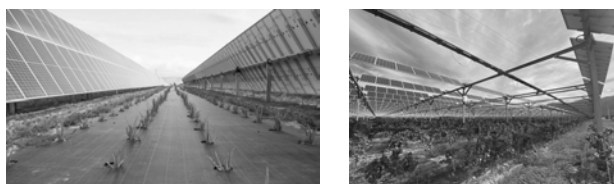


Рис. 3. а) Стаціонарні сонячні панелі над посівом культур [7], б) Підняті (навісні) сонячні панелі, виноградники у Франції [8]

Не менш важливий тип – сонячні теплиці. Зокрема, теплиці, які повністю працюють від сонячної енергії та забезпечують власні потреби електроенергією (рис. 4) [7].



Рис. 4. Приклад сонячних теплиць [9]

У межах Львівської області хороші передумови розвитку агрофотовольтаїки. Зокрема, для потреб сонячної енергетики необхідна значна територія. Для максимально ефективного використання території доцільно встановлювати агрофотовольтаїчні системи.

Більшість промислових СЕС у Львівській області розміщені в межах ареалу із достатнім показником інсоляції (1 130–1 139 кВт год/м²), за винятком Бориславської СЕС, яка розміщена в межах Передкарпаття на межі з гірською частиною Карпат, де показник інсоляції є порівняно нижчим (1 110–1 119 кВт год/м²). Вісім СЕС побудовано в регіоні з найвищими показниками інсоляції (Львівський та Стрийський райони), проте їхня сумарна встановлена потужність у разі поступається потужностям СЕС, які побудовані у Яворівському районі (рис. 5) [10].

В цілях агрофотовольтаїки пропонуємо розглядати деградовані та малопродуктивні землі у межах області, а також як пілотні проекти – вирощування фотоелектричних систем для садів у Городоцькій громаді Львівського району (рис. 6).

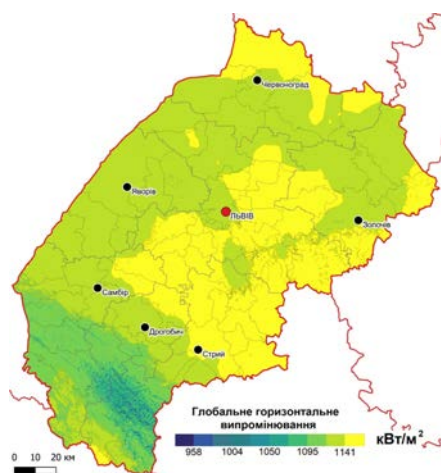


Рис. 5. Глобальне горизонтальне опромінення у Львівській області [11]

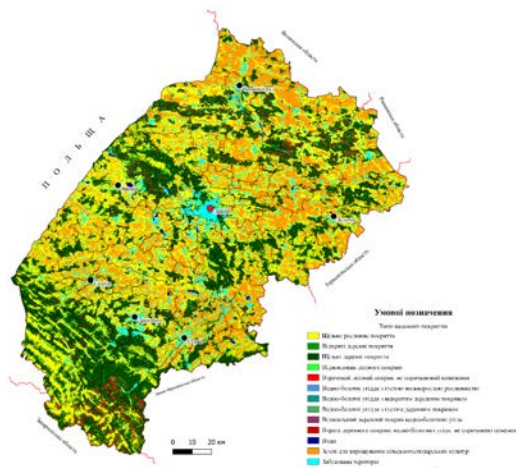


Рис. 6. Типи наземного покриття у Львівській області [12]

Агрофотовольтаїка у Львівській області може стати одним із перспективних напрямків в аграрному секторі, зокрема для наступних рішень:

– забезпечити ефективність використання земель сільськогосподарського призначення, зокрема за рахунок використання агрофотовольтаїчних систем можна збільшити продуктивність сільськогосподарських культур та зменшити площі, які відведені під класичні сонячні станції;

– у поєднанні з енергетичними культурами – забезпечити вирощування енергетичних культур та виробництва чистої електроенергії на одній площі;

– впровадження сонячних теплиць у фермерські господарства області;

– використання навісних сонячних систем для садівництва.

Станом на сьогодні агрофотовольтаїчні системи малопоширені у Львівській області, а в промисловому масштабі – не поширені. Цей напрямок

енергетики є доволі перспективним та потребує додаткового вивчення та впровадження у області.

Висновки. Пропонуємо на розгляд такі головні висновки:

1. Рівнинна частина Львівської області має вдале географічне положення, що дозволяє розвивати як і сонячну енергетику так і агрофотовольтаїку.

2. Агрофотовольтаїка може забезпечити ефективність використання земель сільськогосподарського призначення, вирощування енергетичних культур та виробництва чистої електроенергії на одній площі.

3. Перспективним для Львівської області є впровадження сонячних теплиць у фермерські господарства, а також використання навісних сонячних систем для садівництва.

4. Розвиток агрофотовольтаїки є важливим фактором для досягнення кліматичної нейтральності та енергонезалежності Львівської області.

Література

1. Ващишак І. Р., Ващишак С. П. Агрофотовольтаїчна сонячна станція з вимірювальними каналами IoT. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2020. Т. 30, № 2. С. 129–134. DOI: <https://doi.org/10.36930/40300223>.
2. Смалійчук А., Хіблін Д. Агровиробництво та продовольча безпека як фактор змін архітектурних об'єктів та урбанізованих територій у другій половині XXI ст. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*. Архітектура. 2022. Vol. 4, Iss. 2. С. 170–177. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPARX_2022_4_2_21.
3. Ференц В. І. Ефективність використання агрофотовольтаїки. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 4(75). С. 55–63. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4\(75\).55-63](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.4(75).55-63).
4. Weselek A., Ehmann A., Zikeli S. та ін. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2019. Т. 39, № 35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>.
5. The history of agrivoltaic. *Renewablepedia* : веб-сайт. – URL: <https://renewablepedia.com/the-history-of-agrivoltaic/> (дата звернення: 02.09.2024).
6. Agri-photovoltaic: Solar boom in agriculture. *Agtecher* : веб-сайт. – URL: <https://agtecher.com/uk/agri-photovoltaic-solar-boom-in-agriculture/> (дата звернення: 02.09.2024).
7. Agrivoltaics: How solar panels are changing agriculture. *Maysun Solar* : веб-сайт. – URL: <https://www.maysunsolar.com/blog-agrivoltaics-how-solar-panels-are-changing-agriculture/> (дата звернення: 02.09.2024).
8. Solar panels help French winemaker keep climate change at bay. *Reuters* : веб-сайт. – 04 жовтня 2021 р. – URL: <https://www.reuters.com/business/environment/solar-panels-help-french-winemaker-keep-climate-change-bay-2021-10-04/> (дата звернення: 02.09.2024).
9. Photovoltaic Greenhouses – Smart Use of the Land. *CRTS Group* : веб-сайт. – URL: https://www.crtsgroup.com/en/engineering_talks/photovoltaic-greenhouses-smart-use-of-the-land/ (дата звернення: 02.09.2024).
10. Геоєкологія Львівської області : монографія / Ю. Андрейчук, Л. Безручко, В. Біланюк та ін. / за заг. ред. Є. Іванова. Львів : Простір-М, 2021. 606 с.
11. Лопушанська М. Р., Іванов Є. А. Кліматичні чинники та їхня роль у розвитку сонячної енергетики у Львівській області. *Екологічні науки*. 2022. № 6 (45). С. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.есо.6-45.9>.
12. Лопушанська М. Р., Іванов Є. А., Циганок Л. В., Вижва А. М., Абдуллаєв Ф. Ш., Лопушанська Ю. Р. Роль географічних чинників у розвитку біоенергетики у Львівській області. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXV-ої міжнародної науково-практичної конференції* (м. Київ, 22–24 травня 2024 р.). Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. С. 489–490.

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДЕКАНТАЦІЇ ТА ВАКУУМНОЇ ДИСТИЛЯЦІЇ НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Соколов А.В., Улицький О.А., Д'яченко Н.О.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ
natalidyachenko1969@gmail.com

Вивчені особливості впровадження технологій декантації та вакуумної дистиляції небезпечних речовин для підвищення рівня екологічної безпеки в умовах аварійного розливу нафтопродуктів як наслідок руйнувань, завданих російськими агресорами обстрілами паливно-мастильних баз, нафтопереробних заводів та авіаційної інфраструктури України, що призвело до забруднення ґрунтів, підземних та поверхневих вод. Під час аварійного розливу нафтопродуктів важливо своєчасно вжити заходів для забезпечення безпечного видалення забруднюючих матеріалів та їх утилізації або переробки з наступним використанням. На сьогодні технічні засоби, що використовуються в Україні, дозволяють частково ліквідувати забруднення навколишнього природного середовища, але вони потребують переробки або утилізації відходів, забруднених нафтопродуктами, що не розв'язує проблему повною мірою. Проте нині в країні не повною мірою використовуються новітні технології декантації, регенерації та вакуумної дистиляції як технологій оздоровлення довкілля. Аналіз існуючого стану впровадження таких технологій засвідчив, що застосування системи очищення ґрунту шляхом вакуумної дистиляції найефективнішими є технології «Harbauer» (запатентована в Європі та в США), а також «Masner Grandbow», розроблені з метою знешкодження та термічної переробки нафтовмісних та олійовмісних відходів, що містять кислі гудрони, забруднену олією землю, емульсійні шлами тощо. Отже, вони можуть використовуватися під час рекультивативної забруднених ґрунтів.

Окреслені особливості пілотного проєкту, спрямованого на вивчення можливостей та доцільності використання вакуумної дистиляції для рекультивативної забрудненого нафтопродуктами ґрунту, а також дозволив продемонструвати ефективність використання інноваційних технологій з метою зменшення забруднення. Отримані результати засвідчують, що вони можуть застосовуватися в різних галузях промисловості, зокрема, нафтогазовій і газодобувній; управлінні промисловими відходами; оздоровленні навколишнього середовища. Означені завдання проєкту та методологія робіт. *Ключові слова:* декантація, вакуумна дистиляція, ремедіація, технологія, забруднення, екологічна небезпека, нафтопродукти.

Introduction of decantation and vacuum distillation technology for hazardous substances to improve environmental safety.
Sokolov A., Ulytsky O., Diachenko N.

The paper presents the results of an analysis of the current state of implementation of decantation and vacuum distillation technologies for hazardous substances to improve environmental safety in the event of an accidental oil spill during the destruction caused by shelling. Most of the destruction in Ukraine occurred at fuel and lubrication depots, refineries, and aviation infrastructure, which led to contamination of soil, groundwater, and surface water. In the event of an accidental oil spill, it is important to take measures to ensure the safe removal, cleanup of contaminated materials and their disposal or recycling for further use. The technical means used in Ukraine allow for partial elimination of environmental pollution, but these pollutions require recycling or disposal of oil-contaminated waste, which does not solve the problem fundamentally. However, the state is still in no hurry to take steps to use the latest decantation, regeneration and vacuum distillation technologies as environmental remediation technologies. The analysis of the current state of implementation of these technologies showed that an example of the application of a soil cleanup system by vacuum distillation is the «Harbauer» (patented in Europe and the United States) and «Masner Grandbow» technologies, which are designed for the neutralization and thermal processing of oil and oil-containing waste containing acid tar, oil-contaminated soil, emulsion sludge, etc. In other words, they can be used for remediation of contaminated soils.

That is why the study proposes to create a pilot project to test the feasibility and expediency of using vacuum distillation for the remediation of oil-contaminated soil, which would demonstrate the effectiveness of this innovative technology in reducing pollution. The project objectives and methodology have been formulated. The results obtained can be applied in various industries, including oil and gas; industrial waste management; and environmental rehabilitation. *Key words:* decantation, vacuum distillation, remediation, technology, pollution, environmental hazard, oil products.

Постановка проблеми. Згідно з даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [1] за період з 24 лютого 2022 р. до травня 2023 р. під час військової агресії РФ в Україні зруйновано 35 нафтобаз, що призвело до викидів забруднюючих речовин (ЗР) у кількості 499 тис. т. Ці викиди призвели не тільки до завдання матеріальних збитків довкіллю на 3,3 млрд. грн., але, в першу чергу, забруднили ґрунти, поверхневі та підземні

води і атмосферу. Більшість руйнувань в Україні припало на паливно-мастильні бази та нафтопереробні заводи. У перші дні повномасштабного вторгнення на Київщині одразу були пошкоджені два нафтоховища. У Васильківському районі спалахнуло сховище нафтопродуктів «КЛЮ», зруйновано нафтобазу «Амік» у м. Бородянка [2] (рис. 1), зруйновані нафтобази у селах Крячки та Калинівка. В останньому випадку були знищені 22 резервуари

відокремлюється від поглинача й використовується за призначенням. Відпрацьований поглинач регенерується у спеціальній печі, а залишки нафтопродукту використовуються як додаткове паливо в процесі регенерації. Регенований поглинач може бути повторно використаний, при цьому кількість циклів «насичення – вичавлювання – регенерація» може досягти від 10 до 15 [9].

Надалі необхідними стають відповідні прийоми, технології оброблення та утилізації відпрацьованих нафтопродуктів. Один з таких прийомів полягає у проходженні процесу ректифікації. Технологічний процес здійснюється на основі принципу зниження пружності парів вуглеводневої сировини в результаті її додаткового нагріву та відбору виправлених легких фракцій. Технологія, яка широко використовується для розділення та очищення речовин з різними температурами кипіння, – це вакуумна дистиляція. Коли мова йде про переробку небезпечних відходів, вакуумна дистиляція може використовуватися для підвищення рівня екологічної безпеки. Піддаючи небезпечні відходи вакуумній дистиляції, можна відокремити складові на основі їхніх температур кипіння. Такий процес передбачає використання вакууму для зниження температури кипіння відходів, що дозволяє відокремити і зібрати конденсовані речовини. Такий метод досить корисний для речовин з високими температурами кипіння або термочутливих речовин.

Впровадження технології вакуумної дистиляції для переробки небезпечних відходів має кілька екологічних переваг. По-перше, це дає змогу відновлювати та переробляти цінні матеріали з потоку відходів, зменшуючи потребу у видобутку сировини. Крім того, вона допомагає безпечно утилізувати небезпечні компоненти, запобігаючи їхньому потраплянню в навколишнє середовище [10].

Нещодавно розроблена технологія переробки відпрацьованих автомобільних мастил заснована на їхній вакуумній перегонці в суміші із залишками атмосферної перегонки. Понад 95% небезпечних важких металів, золи та залишків вуглецю у відпрацьованих мастилах було видалено у вакуумній залишки, і ці залишки були успішно перетворені в асфальт для дорожнього покриття [10]. Збільшення виходу і поліпшення якості дистильованих продуктів було експериментально виявлено в діапазоні співвідношення змішання відпрацьованих мастил з атмосферними залишками 0–20%. Ці експериментальні результати показали розумну згоду з розрахунковими значеннями, отриманими під час моделювання процесу з використанням PRO II.

У праці [11] здійснено огляд сучасних практик поводження з відпрацьованими мастильними оліями (WLO) в Європі з метою не тільки просування економіки замкнутого циклу, але й екологічної безпеки, розглянуті характеристики первинної та відпрацьованої олії, їхні небезпечні властивості

та наслідки неправильної утилізації. Представлені сучасні методи очищення і технології регенерації, прийняті в Європі. Наведено огляд оцінки життєвого циклу стратегій управління WLO. У вітчизняних дослідженнях є поодинокі наукові роботи стосовно втілення цих технологій. Наприклад, НТУ «КПІ ім. І. Сікорського» [12] та Український державний хіміко-технологічний університет, займаються питаннями розробки нових технологій та методик вакуумної дистиляції з точки зору застосувань технології в різних галузях промисловості.

Наукові дослідження з впровадження технологій декантації та вакуумної дистиляції небезпечних речовин в аварійних ситуаціях спрямовані на підвищення рівня екологічної безпеки в Україні.

Мета роботи. Аналіз сучасного стану впровадження технологій декантації та вакуумної дистиляції небезпечних речовин в аварійних ситуаціях на підприємствах України для підвищення рівня екологічної безпеки та існуючого обладнання для забезпечення безпечного видалення, очищення забруднених матеріалів та їх утилізації або переробки з наступним використанням в умовах аварійного розливу нафтопродуктів або руйнування.

Об'єкт дослідження. Сучасні природоохоронні технології захисту навколишнього природного середовища та забезпечення екологічної безпеки завдяки впровадженню технологій декантації та вакуумної дистиляції небезпечних речовин.

Методологічне або загальнонаукове значення. Окреслені в праці наукові практики та висновки сприятимуть майбутнім перспективам ширшого впровадження технологій декантації та вакуумної дистиляції небезпечних речовин в аварійних ситуаціях для підвищення рівня екологічної безпеки в Україні.

Виклад основного матеріалу. Найширшого поширення в Україні отримав метод відцентрового поділу нафтових відходів з використанням декантерів (ДК) і сепараторів [13], тобто відцентрового поділу нафтових відходів на базі декантерної центрифуги DSD. Оскільки в Україні переробка відпрацьованих олій є серйозною екологічною проблемою, декантери, відомі як відстійники або освітлювачі, зазвичай використовуються в нафтовій промисловості для відділення нафти або олії від стічних вод та інших забруднень. Як правило, декантерний метод передбачає такі етапи:

1. Попередня обробка: відпрацьована олія або нафтопродукти спочатку проходять попередню обробку для видалення значних забруднень, зокрема, бруд, пісок та інші тверді речовини, за допомогою фільтрів або сіток.

2. Змішування та нагрівання: попередньо оброблену відпрацьовану олію потім змішують із теплом, хімікатами чи іншими агентами для поліпшення процесу розділення.

3. Декантація: потім суміш подається в графин – горизонтальний або вертикальний циліндрич-

ний резервуар з конічним дном. ДК призначений для відділення олії від стічної води та інших забруднень.

4. Розділення: під дією сили тяжіння олія піднімається до верхньої частини графіна, а стічні води та забруднювачі осідають вниз.

5. Видалення олії та стічних вод: відокремлена олія видаляється з верхньої частини графіна, а стічна вода та забруднювачі видаляються знизу.

Переваги такого методу мають такі ознаки: висока ефективність під час відокремлення олії від стічних вод та піску або інших твердих речовини, низькі експлуатаційні витрати, просте і легке обслуговування, гнучкість конструкції та експлуатації.

Метод ефективний при обробці відпрацьованих олій з різних джерел, зокрема: відпрацьовані моторні масла, промислові мастила, гідравлічні рідини, трансмісійні масла, трансформаторні масла, нафтопродукти.

В Україні працює низка компаній, які використовують графіни, хоча це поодинокі випадки. Варто зазначити, прикладів застосування ДК для очищення ґрунтів, що зазнали впливу аварійного розливу нафтопродуктів, в Україні на сьогодні не існує. Нафта – складний і досить стійкий забруднювач. Є приклади спільного використання сорбентів і мікроорганізмів-деструкторів для очищення забрудненого ґрунту, але внесення мікроорганізмів доцільно в тому разі, якщо активність природного біоценозу невисока, а окислення нафти відбувається вкрай повільно. Зважаючи на значну адсорбувальну поверхню ґрунту, в ньому накопичується забруднювач [14]. А якщо гранулометричний склад ґрунту та вміст вологи не відповідають таким умовам, то виникає необхідність застосовувати інші технології та способи рекультивації засмічених ґрунтів.

Аналогічна ситуація склалася із застосуванням в Україні технології вакуумної дистиляції (ВД) в процесах оздоровлення довкілля. Хоча ВД пропонує економічно ефективну та екологічно чисту альтернативу для рекультивації забрудненого нафтою ґрунту, а звичайні методи рекультивації, зокрема земляні роботи та захоронення, часто є дорогими та мають екологічні ризики.

Процес вакуумної дистиляції передбачає такі етапи: 1. Підготовка ґрунту: забруднений ґрунт викопується та подається до зони обробки. 2. Прогрівання: ґрунт нагрівають до температури 100–150°C для підвищення випаровування летких сполук. 3. Застосування вакууму для посилення випаровування та подальшої конденсації летючих сполук (нафтові вуглеводні), з ґрунту: до нагрітого ґрунту застосовується вакуум, щоб знизити температуру кипіння забруднень та поліпшити випаровування. 4. Конденсація: випаровувані забруднення потім конденсуються та збираються в окремому баку. 5. Обробка: оброблений ґрунт охолоджується та може повторно використаний або безпечно утилізований.

Переваги: ВД має кілька переваг перед традиційними методами рекультивації, зокрема: економічна

ефективність – нижчі витрати порівняно з розкопками та захороненням. Екологічні переваги: мінімізує утворення відходів і знижує ризик вторинного забруднення, зменшення потреб у звалищах, виробництво цінних продуктів з відходів, зокрема, паливо та хімікати, сприяння розвитку сталої економіки замкнутого циклу, відновлення навколишнього середовища в Україні завдяки очищенню ґрунтів.

Показовим прикладом застосування системи очищення ґрунту шляхом вакуумної дистиляції є технологія Harbauer, що запатентована як в Європі (патент № EP0388387), так і в США. Згідно з технологією Harbauer, система може використовуватися з метою рекультивації забруднених ґрунтів, особливо забруднених летючими та на пів летючими органічними сполуками або важкими металами [15] Вона поєднує хімічні та фізичні процеси для обробки адсорбованих, розчинених і вільних забруднювачів у ґрунті у вільній фазі. З моменту свого створення в 1987 році технологія Harbauer була застосована лише на об'єкті в Європі (в Марктредвіці). У США компанія Harbauer представлена компанією Lockwood Greene Engineers, Inc. Технологія складається з двох основних процесів: 1. Процес промивання ґрунту, який розділяє забруднений ґрунт на грубозернисту і дрібнозернисту фракції. 2. Процес вакуумної дистиляції, який полягає в нагріванні ґрунту під вакуумом для випаровування і видалення поллютанту.

Інший приклад, технологія німецької фірми «Masner Grandbow», розроблена для знешкодження та хімічної переробки нафтовмісних, олійовмісних відходів, що містять кислі гудрони, забруднену олією землю, емульсійні шлами, тощо [16]. За цією ж технологією, разом зі знешкодженням нафтовмісних відходів відбувається і їх збирання, що дає змогу очищати та рекультивувати забруднені земельні площі. За повідомленням фірми, таким методом можна очищати від забруднень великі площі від нафти під час її витоку або під час транспортування нафтопроводом, танкером і т. д. Цей інноваційний підхід усуває зростаючу стурбованість забрудненням навколишнього середовища, спричиненим забрудненими нафтою ґрунтами, водою та небезпечними відходами.

У цій сфері важливо знати, що згідно з Директивою 2008/98/EC переробка означає «будь-яку операцію з відновлення, за допомогою якої відходи переробляються в продукти, матеріали або речовини для первинних або інших цілей. Вона передбачає відмивання, регенерацію, повторну обробку та регенерацію WLO, але виключає відновлення енергії». Відмивання – це обробка із замкнутим циклом, особливо для гідравлічних рідин і рідин. Процес передбачає видалення твердих частинок шляхом фільтрації, зневоднення шляхом ВД та додавання свіжих добавок. При цьому, оброблені нафтопродукти повертається для повторного використання [17]. Гідравлічні рідини також можна обробити шляхом регенерації, коли мастильний матеріал центри-

фугують та/або фільтрують, а потім повторно використовують [18].

Підбиваючи підсумки проведеного аналізу, треба констатувати, що в Україні необхідно розробити пілотний проект з перевірки можливостей та доцільності використання вакуумної дистиляції для рекультивації забрудненого нафтою ґрунту, мета якого продемонструвати ефективність інноваційної технології у зниженні забруднення ґрунту нафтовими вуглеводнями. Отримані результати можуть мати широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема: нафтогазовій: обробка забрудненого нафтою ґрунту, води та небезпечних відходів; управління промисловими відходами: переробка промислових відходів, що містять нафту та нафтопродукти; оздоровлення навколишнього середовища: відновлення забруднених ділянок та екосистем.

Основне завдання проекту: 1. Оцінити ефективність ВД для зниження рівня поллютантів у забрудненому ґрунті. 2. Проаналізувати рентабельність ВД порівняно з традиційними методами відновлення. 3. Оцінити екологічні переваги з огляду мінімізації утворення відходів та зниження ризиків вторинного забруднення.

Методологія, що передбачається у пілотному проекті. Збір зразків ґрунту із забрудненої ділянки та обробка їх за допомогою мобільної установки ВД. Вона складається з камери нагріву, вакуумного насоса та конденсатора. Забруднений ґрунт нагрівають до 400–450°C, застосовувався вакуум 0,1 бар для підвищення випаровування нафтових вуглеводнів. Конденсовані пари збирають та вимірюють вміст ТРН. Оброблений ґрунт перевірити на його хімічні та біологічні властивості, у тому числі й РН, токсичність і мікробну популяцію. Останній етап – біоло-

гічна ремедіація, тобто оброблений ґрунт подається біологічній ремедіації з використанням мікроорганізмів для подальшого розщеплення будь-яких органічних сполук, що залишилися.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами дослідження, вивчена можливість застосування технології декантації та вакуумної дистиляції небезпечних речовин під час аварійних ситуацій на підприємствах України для підвищення рівня екологічної безпеки та рекультивації забруднених нафтою ґрунтів і води з подальшим використанням перероблених поллютантів. Впровадження таких технологій засвідчило, що показовим прикладом застосування системи очищення ґрунту шляхом ВД є технологія Harbauer, запатентована в Європі та в США, а також німецької фірми «Masner Grandbow», яка розроблена з метою знешкодження та хімічної переробки нафтовмісних й олійовмісних відходів, що містять кислі гудрони, забруднену олією землю, емульсійні шлами тощо. Така система може бути використана для рекультивації забруднених ґрунтів, особливо забруднених летючими та напівлетючими органічними сполуками або важкими металами.

Саме тому в дослідженні порушена теза щодо необхідності створення відповідного пілотного проекту з метою означення ступеня можливостей та доцільності використання вакуумної дистиляції для рекультивації забрудненого нафтопродуктами ґрунту, продемонструвати ефективність використання інноваційних технологій у різних галузях промисловості, зокрема: нафто-газовій; управлінні промисловими відходами; оздоровленні навколишнього природного середовища тощо. Окреслені завдання проекту та методологія робіт.

Література

1. Green Deal. Interfax Україна, Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. сайт URL: <https://interfax.com.ua/news/greendeal/907725.html> (дата звернення 9.05.24).
2. Boyko K., Diachenko N., Ulytsky O., Sokolov A. Assessment of accidental penetration of petroleum products into the geological environment and scientific substantiation of minimizing negative changes. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, 2023 P. 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520019>.
3. Улицький О., Д'яченко Н., Соколов А., Сердюкова О. Дослідження забруднення нафтопродуктами зони аерації методом математичного моделювання. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 2023. – № 59. – С. 44-55. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-59-04>.
4. Природа та війна: як російська агресія вплинула на довкілля. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2022/11/08/infografika/suspilstvo/pryroda-ta-vijna-yak-rosijska-ahresiya-vplynula-dovkillya> (дата звернення 17.06.24)
5. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року. Київська школа економіки. Київ: KSE, 2024. – 39 с. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf (дата звернення 5.07.24).
6. List of classifications, IARC. Volume 1–120, 2018. URL: http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/latest_classif.php (дата звернення 15.07.24).
7. Pinheiro, C. T., Ascensão, V. R., Cardoso, C. M., Quina, M. J., & Gando-Ferreira, L. M. An overview of waste lubricant oil management system: Physicochemical characterization contribution for its improvement. *Journal of Cleaner Production*, 2017. 150, P. 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.044>.
8. Carolina Pinheiro, Margarida J. Quina, Licínio M. Gando-Ferreira. Management of waste lubricant oil in Europe: A circular economy approach. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Volume 51, 2021 – Issue 18. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1771887>.
9. Стратінов Є. В. Застосування терморозширеного графіту (ТРГ) як поглинач для очищення поверхонь води і ґрунту від розливів органічних рідин. Інститут газу НАН України. 2016. URL: <https://gas-inst.org.ua/3-2-pryumenenye-termorasshyrennogo>

grafyta-trg-kak-poglotytelya-dlya-ochystky-poverhnostej-vod%D1%8B-y-pochv%D1%8B-ot-razlyvov-organycheskyh-zh-ydkostej/ (дата звернення 15.05.24).

10. Myung-Soo Kim, Jong-Sic Hwang & Hyung-Rak Kim. Re-refining of waste lube oils by vacuum distillation with petroleum atmospheric residuum. *Journal of Environmental Science and Health. Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, Volume 32, 1997 – Issue 4. <https://doi.org/10.1080/10934529709376593>.
11. Carolina T. Pinheiro, Margarida J. Quina & Licínio M. Gando-Ferreira Management of waste lubricant oil in Europe: A circular economy approach. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Volume 51, 2021 – Issue 18. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1771887>.
12. Ставрова У.Л., Ульєв Л.М. Теплоенергетична інтеграція процесу вакуумної дисциляції мазуту на АВТ-Ф12/6. *Матеріали VI Університетської науково-практичної студентської конференції магістрантів*, Київ, 2013. – С. 90-92.
13. Новикова К. Б. *Вивчення методів утилізації технологічних шлаків*. Дипл. роб. на здобуття освіт. ступ. магістр. Український державний університет науки і технологій, Дніпро, 2021. – 93 с. URL: https://crust.ust.edu.ua/bitstream/123456789/14819/1/Novikova_dyp_2021.pdf (дата звернення 15.06.24).
14. Хохлов А.В., Хохлова Л.Й. Очищення піщаних ґрунтів від нафтозабруднень застосуванням біосорбційних комплексів. *Екологічні науки*, № 6 (33), 2020. – С. 86-90. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.12>.
15. Harbauer soil washing / vacuum-distillation system / innovative technology evaluation report, San Diego, California, 1996. URL: https://clu-in.org/download/contaminantfocus/mercury/EPA_vacuum.pdf (дата звернення 15.06.24).
16. Рагімова К.Е., Абдуллаєва Н.З. Особливості знешкодження нафтовмісних промислових відходів. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2015. – Вип. 25 (3) – С. 106-111, URL: https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2015/25_3/20.pdf (дата звернення 15.06.24).
17. Totten, G. E., & De Negri, V. J. *Handbook of hydraulic fluid technology* (2nd ed.). CRC Press., 2017. – 984 с.
18. Monier, V., Labouze, E. Critical review of existing studies and life cycle analysis on the regeneration and incineration of waste oils. European Commission: DG Environment Report, 2001. URL: http://ec.europa.eu/environment/waste/studies/oil/waste_oil.pdf (дата звернення 19.06.24).

ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ

УДК 502/504:911,5

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.21>

ЗАЛИШКОВА ЗДАТНІСТЬ ДО ПРИРОДНОЇ САМОРЕГУЛЯЦІЇ УРБОЛАНДШАФТНИХ БАСЕЙНОВИХ ГЕОСИСТЕМ В УМОВАХ МЕГАПОЛІСУ

Ричак Н.Л.¹, Кізілова Н.М.¹, Внукова Н.В.²

¹Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
пл. Свободи, 6, 61022, м. Харків

²Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків
rychak@karazin.ua, n.kizilova@gmail.com, vnukovanv@ukr.net

Наведено детальний огляд сучасної літератури, яка присвячена методам дослідження природної саморегуляції, екологічної безпеки і стійкості ландшафтних геосистем за наявності навантаження через інтенсивне природокористування людиною, а також відповідним кількісним показникам (коефіцієнтам, індексам), які були запропоновані різними авторами та використані для оцінок ландшафтних геосистем у різних країнах. Досліджено залишкову здатність до природної саморегуляції урболандшафтних басейнових геосистем р. Уди, л. Лопань та р. Харків в умовах м. Харкова. Головну увагу було зосереджено на визначенні рівня фазово-антропоїзаційної стійкості урболандшафтних геосистем. Дослідження методологічно побудовано на розрахунку індексів фазово-антропоїзаційної стійкості для кожної із зазначених урболандшафтних геосистем. Основою для розрахунків індексів слугували карти ландшафтів і використання ґрунтів м. Харкова, визначені площі урболандшафтних геосистем, площі (питомі площі) визначених урболандшафтних підсистем міста і визначені площі морфологічних структур. Проведено аналіз басейнових морфологічних і позиційних підсистем та аналіз впливу містобудівно-функціональних підсистем у межах тестових об'єктів. На основі отриманих результатів досліджено здатність геосистем до саморегуляції шляхом визначення індексу $I_{\text{ФАС}}$ фазово-антропоїзаційної стійкості (ФАС). Встановлено, що найбільшу залишкову здатність до саморегуляції має геосистема р. Лопань ($I_{\text{ФАС}} \sim 51\%$). Урбанізовані геосистеми р. Уди і Харків мають досить слабку здатність до саморегуляції ($I_{\text{ФАС}} \sim 35\%$ та $I_{\text{ФАС}} \sim 43\%$, відповідно). Для поглиблення розуміння ФАС досліджених геосистем були розраховані співвідношення площ (квазі)еконегативних урбанізованих підсистем над (квазі)екопозитивними урбанізованими підсистемами. В цілому, для геосистеми р. Лопань ситуація є найкращою з усіх геосистем, що досліджувались: відзначається домінанта площ (квазі)еконегативних підсистем над (квазі)екопозитивними підсистемами лише у 1,9 разів. Ситуації для урболандшафтних геосистем басейну р. Уди та р. Харків значно гірші. Так, в цілому для геосистеми р. Харків в умовах міста сумарна площа (квазі)еконегативних підсистем перевищує площу (квазі)екопозитивних підсистем у 5,3 рази. Отримані кількісні результати та їх детальний аналіз можуть бути корисними для розробки методів збалансованого екологічного управління урболандшафтними геосистемами. *Ключові слова:* урболандшафтна басейнова геосистема, самовідновлення, ступінь антропоїзації, моделювання стійкості.

The residual capacity for natural self-regulation of urban landscape river basin geosystems on a megalopolis territory. Ruchak N., Kizilova N., Vnukova N.

A detailed review of modern literature on the methods of studying natural self-regulation, ecological safety and stability of landscape geosystems in the presence of anthropogenic load and on the corresponding quantitative indicators (coefficients, indices) that were proposed by various authors and used for the assessment of landscape geosystems in different countries is given. The residual capacity for natural self-regulation of urban-landscape basin geosystems of the Udy River, Lopan River and the Kharkiv River on the territory of Kharkiv megalopolis is studied. The main attention was focused on determining the level of phase-anthropization stability of urban landscape geosystems. The study is methodologically based on the calculation of phase-anthropization stability indices for each of the specified urban-landscape river-basin geosystems. Maps of landscapes and land use on the territory of Kharkiv and around it, defined areas of urban landscape geosystems, areas (specific areas) of defined urban landscape subsystems of the city, and defined areas of morphological structures served as the basis for index calculations. The analysis of the morphological and positional subsystems of the river basins, and the analysis of the influence of urban planning and functional subsystems within the test objects were carried out. Based on the obtained results, the ability of geosystems to self-regulate was investigated by determining the index I_{FAS} of phase-anthropization stability (FAS). It was shown that the geosystem of the Lopan River has the greatest residual ability to self-regulate ($I_{\text{FAS}} \sim 51\%$). The urbanized geosystems of the River Udy and River Kharkiv have a rather weak ability to self-regulate ($I_{\text{FAS}} \sim 35$ and $I_{\text{FAS}} \sim 43$, respectively). To deepen the understanding of FAS of the geosystems, the ratio of the areas of (quasi)econegative urbanized subsystems over (quasi)ecopositive urbanized subsystems was calculated. In general, the situation for the geosystem of the Lopan River is the best of all geosystems studied: the dominant area of (quasi) eco-negative subsystems over (quasi) eco-positive subsystems is noted by only 1,9 times. The situations for the urban landscape geosystems of the Udy River and Kharkiv River basins are much worse. Thus, in general, for the Kharkiv river geosystem in the conditions of the megalopolis, the total area of (quasi) eco-negative subsystems exceeds the area of (quasi) eco-positive subsystems by 5.3 times. The obtained quantitative results and their detailed analysis will be useful for the development of methods of balanced ecological management of urban landscape geosystems. *Key words:* urban landscape basin geosystem, self-recovery, degree of anthropization, modeling of sustainability.

Постановка проблеми. Для урбанізованих ландшафтів завжди важливим є питання рівня стійкості. Чинники, що сприяють порушенню стійкості, досліджувалися багатьма ученими. Визначалися вагомість кожного з чинників, розраховувалися відповідні коефіцієнти і індекси стійкості. Досліджувалися процеси антропоізації, її наслідки, подекуди її незворотні дії на урбанізовані ландшафти, робили висновки про ступінь антропоізації досліджуваної території і прогнози її подальшого розвитку. Саме ступінь антропоізації впливає на стійкість урбанізованих річкових басейнових геосистем. І цей показник виступає вирішальним при вивченні викликів екологічної безпеки та при прийнятті управлінських рішень щодо оптимізації стану довкілля в урбанізованих геосистемах. Проте, цей показник недостатньо вивчений для складних геосистем, до складу яких входять річкові басейни міських ландшафтів. У даній роботі проблема розглядається для басейну річки Уди з притокою Лопань та її притокою Харків, що знаходяться в межах м. Харкова. Тестова ділянка обрана з урахуванням складних ландшафтних умов, промислового і автотранспортного навантаження міста. Проведення аналізу рівня стійкості урбанізованих басейнових геосистем, опираючись на морфологічну основу та ландшафтну структуру території м. Харкова, дасть повне і більш глибоке розуміння ландшафтно-геохімічних процесів для виявлення особливостей установа рівня стійкості урбанізованих басейнових геосистем в динаміці.

Актуальність дослідження. Визначення особливостей установа рівня стійкості урбанізованих басейнових геосистем дає змогу спрямувати управління функціонування соціальною та природоохоронною складовими мегаполісу в умовах відбудови міста та його відновлення після завершення війни, щоб досягти оптимально можливого стану природної складової урбанізованих басейнових геосистем. Дослідження залишається вкрай актуальним для систематизації інформації про стан геосистем, проведення рангування порядку значущості порушень їх стійкості та визначення причин погіршення стану, якщо така динаміка спостерігається. Дослідження допоможе у визначенні засобів з поліпшення стану малих урбанізованих басейнових геосистем, опираючись на дані про морфологічну основу геосистем (річище, заплава, схилова, вододільно-рівнинна підсистема) та допоможе визначитись з комбінаторним вибором найбільш доцільних заходів у конкретній безпечній ситуації для досягнення природооптимального стану та найвищого рівня стійкості геосистем.

Зв'язок авторського доробку із важливими та практичними завданнями. У липні 2024 року Кабінет міністрів України схвалив Концепцію державної цільової програми комплексного водозабезпечення територій, які зазнали впливу воєнних дій, на період до 2030 року. На її основі буде передано

на розгляд саму Програму. Реалізація Програми планується на території 9 областей, серед яких є Харківська, де протікають досліджувані нами річки та функціонують урбанізованих басейнових геосистем згаданих річок області з різними рівнями стійкості. У схваленій Концепції зазначається, що сьогодні ми не маємо права на повільний рух до самовідновленого «доброго» стану вод [1]. Серед заходів, які передбачає Програма: спорудження систем водозабезпечення, будівництво та реконструкція гідротехнічних споруд, розчищення русел річок. Реалізація Програми буде показовою – наскільки у нашій країні створюється комплексний підхід до питання управління водними ресурсами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання стійкості ландшафтів, у тому числі й урбанізованих, піднімаються та поступово вирішуються. Фундаментальними є дослідження українських вчених: ландшафтно-екологічні підходи М. Д. Гродзинського [2–4], урбанізованих – О. Ю. Дмитрука [5]. Отримані висновки згаданих досліджень стали основою та вкрай вагомими при продовженні досліджень у даному напрямку. Запропоновані обґрунтування теоретично-прикладних основ, набір модельних складових і оцінювання рівня стану малих урбанізованих басейнових геосистем М. В. Самойленко та ін. [6], а також методики аналізу міри антропоізації ландшафтів [7]. Розроблена робоча шкала міри антропоізації фізико-географічних таксонів України і проведена верифікація отриманих за її допомогою результатів [8]. Розглянуто питання екологічної безпеки у містах при реконструкції та проектуванні транспортної підсистеми в контексті загального забезпечення екологічної безпеки [9].

У урбанізованому середовищі річки та інші водні об'єкти мають значний соціально-економічний та екологічний вплив на ландшафтні геосистеми міст [3, 6, 7, 10]. Параметричне моделювання на основі вимірюваних в динаміці геофізичних, метеорологічних і екологічних показників поширене в оцінці міських ландшафтів з річковими басейнами [4, 6, 11], але протягом останнього десятиліття були запропоновані більш детальні кількісні показники для оцінки екологічної безпеки, самовідновлення, сталого розвитку та стабільності урбанізованих геосистем [12–14]. Концепція поліфункціональності ландшафту, взаємозв'язку його компонентів і стабільного розвитку екосистеми є одним із головних напрямів ландшафтно-екології [15–17]. Ландшафти охоплюють широкі території, які включають різні типи ґрунтового покриву або землекористування, які є системами з різним ступенем антропогенного впливу. Ландшафтна екологія вивчає динаміку, сучасний стан і можливості покращення взаємозв'язку між просторовою структурою та екологічними процесами на різних масштабах ландшафту. Це міждисциплінарна галузь досліджень, яка об'єднує біофізичні та аналітичні підходи з гуманістичними

та цілісними перспективами природничих і соціальних наук. Як наукова парадигма, ландшафтна екологія характеризується явним акцентом на причинах, процесах та екологічних наслідках просторової неоднорідності в багатьох масштабах [18].

Наявність міждисциплінарних (геофізичних, гідрологічних, екологічних, соціальних, економічних, біологічних, кліматичних) даних є необхідною для будь-яких кількісних оцінок, аналізу та прийняття рішень щодо управління навколишнім середовищем [19]. Геосистеми річкового басейну особливо вразливі до екологічних та антропогенних стресорів, включаючи міське, промислове та сільськогосподарське забруднення, а також глобальні зміни клімату [20–23]. Індекс якості води (Water quality index, WQI) [24], індекс екологічного здоров'я (Ecological Health Index, EHI) [25], індекс біотичної цілісності (Index of Biotic Integrity, IBI) [26], бактеріологічний інтегральний індекс [27] та низка інших були розраховані для оцінки стабільності басейнів різних малих і великих річок в різних країнах. Розрахунки WQI базуються на вимірюванні різних забруднювачів у поверхневих, ґрунтових, технічних та питних водах і обчисленні для загального індексу з певними ваговими коефіцієнтами. Оскільки стандартні нормативи на забруднювачі різні у різних країнах, а також підходи до вибору вагових коефіцієнтів не узгоджені, існують проблеми з порівнянням якості води у різних країнах і регіонах [24].

Розрахунки EHI базуються на середньозважених значеннях індексу стабільності ґрунту (Soil Stability Index, SSI), індексу водного циклу (Water Cycle Index, WCI), індексу циклу поживних речовин (Nutrient Cycle Index, NCI), індексу динаміки рослинного співтовариства (Plant Community Dynamics Index, CDI) і індексу потоку енергії (Energy Flow Index, EFI) [25], що потребує достатньо масштабного моніторингу показників цих складових екосистем даного ландшафту, а також кліматичних і метеорологічних даних з урахуванням впливу антропогенних факторів у динаміці (середні за місяць/рік).

Для розрахунків IBI використовуються детальні дані про чисельність місцевих видів рослин і тварин, що живуть у певних ареалах ландшафту, а також дані про підвищення або зменшення їх численності протягом останніх років [26]. У модифікованому показнику IBI використовуються середньозважені дані про відносні кількості різних бактерій у пробах води і ґрунтів [27].

Кумулятивні комплексний екологічний індекс (Comprehensive Environmental Index, CEI) та комплексний індекс забруднення навколишнього середовища (Comprehensive Environmental Pollution Index CEPI) були запроваджені для більш глобальної оцінки екологічного здоров'я, у тому числі і міських річкових систем [28, 29]. Нещодавно був розроблений і випробуваний індекс екологічної сприйнятливості (Ecological Susceptibility Index, ESI)

для ESI кількісної оцінки рівня деградації та зміни екологічного стану річкових систем, гідрогеоморфичної цілісності та естетичної якості прибережної смуги. Цей показник був використаний для моніторингу екологічного ризику річкових систем на р. Маюракші у Східній Індії [30], Східному Ляо в Китаї [31], р. Ертіс (Казахстан) [32], р. Сіверський Донець в Україні [33]. З використанням вагових коефіцієнтів для урахування різних факторів були проведені комплексні оцінки водозберігаючої функції, вітрозахисної та піскофіксаційної функцій, зони збереження біорізноманіття та комплексний індекс екологічної безпеки.

Індекс нових органічних забруднювачів (Emerging Organic Pollutants, EOP) також важливий для міських річок через швидкий розвиток промисловості та зростання населення з поступовим збільшенням кількості синтетичних хімічних продуктів, які вводяться в наше повсякденне життя [34]. Сьогодні існують понад 40 000 синтетичних органічних сполук, таких як промислові хімікати, антибіотики, біоциди, добрива та засоби особистої гігієни і всі вони розглядаються як потенційні EOP [35]. Індекс EOP теж розраховується як середньозважене концентрацій забруднювачів, де вагові коефіцієнти враховують ступінь токсичності кожного забруднювача.

Для точної оцінки впливу майбутнього розширення міст (Urban Expansion Impact, UEI) на поверхневий стік була запропонована комбінація моделей динаміки сценарію землекористування (Land Use Scenario Dynamics Land Use Scenario Dynamics, LUSD) і кривої збереження ґрунту (Soil Conservation Service-Curve Number, SCS-CN), яка була протестована на басейні Цінхайху-Хуаншуй на Тибетському нагір'ї, Китай [36]. Комбінована модель LUSD – SCS-CN дозволила зменшити абсолютні похибки оцінки з 3,40% і 11,78% до 0,18% і 4,23% порівняно із роздільним застосуванням моделей LUSD і SCS-CN.

Розроблені підходи ландшафтної екології включають оцінку екосистемних потоків, які реалізуються через антропогенні фактори (Ecosystem Services Flow, ESF), які, як правило, зменшуються з відстанню, а їх вплив змінюється в залежності від природних умов, таких як напрямок вітру, потоків поверхневих і підземних вод, стоку води, міських водних потоків (промислові, цивільні, питні тощо), зміни складу і конфігурації ґрунтового покриву в часі [37], а також швидкості зростання і активності руху населення [38]. Процеси ESF значно впливають на здоров'я і добробут людини і стабільність екосистеми. Це дозволяє вирішити задачу оптимізації екологічної компенсації для зниження екологічної небезпеки за різними сценаріями майбутнього розвитку, включаючи антропогенний вплив, та UEI для даної екосистеми [39]. Концепція ESF забезпечує детальні прогнози земельного покриву та використання, включаючи екологічну безпеку [40]

і розробку оптимальної моделі екологічної безпеки для управління розширенням міських земель [41]. Систематичний аналіз (82 тематичні дослідження) [42] основних концепцій, методів вимірювання, розрахунків і застосування ESF, показав, різне розуміння навіть визначення концепції ESF як потоку компонент (опадів, забруднень, ерозії ґрунтів, сільськогосподарської продукції, рослин і травин, та усього, що пов'язано із взаємодією природи і людини) за часом (1), фактичного обсягу використання компонент (2), просторового зв'язку між компонентами у вигляді динамічних мереж (графи або мережеві моделі) з потоками компонент (3), та інших (4). Ця різноманітність визначень (1)–(4) вже призвела до невизначеності і до розробки дуже різних методів вимірювання [42]. Кількісні розрахунки в рамках концепції ESF, яка узагальнена з урахуванням всіх переваг і недоліків підходів (1)–(4), допомагає кількісно оцінити вплив природи на життя людей, зрозуміти взаємозв'язок між попитом і пропозицією, що сприятиме розвитку регіонального планування та політики (наприклад, планування збереження простору, планування інфраструктури, міжрегіональне управління тощо).

Таким чином, наведений огляд сучасної світової літератури за проблемами кількісної оцінки стану урбанізованих ландшафтів, міри їх антропоїзації, здатності до природної саморегуляції та розробки науково обґрунтованих планів відновлення урбанізованих ландшафтів та їх подальшого розвитку показав, що запропоновані десятки різних індексів, які базуються на даних екологічних, медико-біологічних, метеорологічних, геофізичних, демографічних та інших параметрів. На жаль, до цих пір немає ні єдиних стандартних наборів даних для вимірювань, ні загальноприйнятих показників для порівняння стану ландшафтів і екосистем у різних країнах і регіонах. Можна зазначити, що більшість авторів вважає за необхідне використовувати середньозважені індекси $I_g = \sum_j (C_{gj} X_j)$, де X_j – абсолютна величина (або відносна до норми значення) показника, який вимірюється, $j=1,2,\dots,n$ – номер показника, C_{gj} – вагові коефіцієнти, які обираються, виходячи зі ступеню впливу показника на систему/процес, який вивчається.

Ґрунтуючись на досвіді світової спільноти, в даній роботі теж буде використаний аналогічний підхід у дослідженні рівня антропоїзаційної стійкості урбанізованих ландшафтів та екосистем в умовах мегаполісу на прикладі басейнової системи м. Харкова. У попередніх статтях авторами були досліджені окремі складові, які слугують основою для продовження досліджень рівня стійкості урбанізованих ландшафтів та екосистем в умовах міста [22, 23, 44, 45], а також розглянуті типи існуючих урбанізованих підсистем у басейнах річок Уди, Лопань і Харків на території м. Харкова та їх площі [23, 46].

Аналіз площі водозбірної басейну р. Уди (яка частково розташована на території урбанізованих

м. Харкова) за допомогою онлайн карт світового землекористання [47, 48] вказує, що 8,5 тис. га зайнято зеленими насадженнями (40,4% загальної площі урбанізованої території водозбору), під забудовою зайнято 7,5 тис. га (36% загальної площі). Дороги з твердим покриттям займають до 0,5 га (2,4% загальної площі). Площі під промисловими та складськими територіями 3,5 га (17%) та 1,5 га – площі без забудови та пустирища (7% від загальної площі). Також визначені межі та площі урбофункціональних підсистем урбанізованої басейнової геосистеми р. Уди та межі і площі морфологічно-позиційних підсистем, запропонований аналіз типів урбофункціональних підсистем у басейні геосистеми р. Уди і проведено оцінювання екологічного стану поверхневих вод р. Уди в межах мегаполісу [44–46].

Попередній аналіз урбанізованих басейнових підсистем р. Харків показав, що найбільші площі займають житлова, громадсько-адміністративна, промислова, транспортна і складська компоненти, які слугують головними джерелами забруднення, а природоохоронна та полірекреаційна підсистеми займають лише 11% території басейну. Також, надано оцінку навантаження на поверхневі води р. Харків, що є складовою урбанізованої та потерпають під впливом різних типів басейнових геосистем [45].

Окремо нами були досліджені гідрологічні параметри урбанізованої басейнової геосистеми на території м. Харків, яка включає річки Уди, Лопань, Харків, і Немишлю [46], а також якість повітря [49] і поверхневих вод [50] як компонент ESF, що сприяють розповсюдженню і накопиченню забруднень. За даними радарного сканування була побудована точна геометрична модель профілю місцевості урбанізованої басейнової геосистеми та проведені розрахунки в програмному середовищі OpenGeoSys [51] рівня води, швидкості течії та концентрацій важких металів, сульфатів і нафтопродуктів в водах кожної з річок системи за різними сценаріями змін клімату, рівня промислових викидів та інших факторів.

Розраховані та виміряні дані розміщені в базі даних урбанізованої басейнової геоінформаційної системи м. Харків [52]. Результати дають можливість систематично накопичувати як дані про рівні забруднень річкових вод на урбанізованій території міста, так і показники, що характеризують динаміку накопичення кожного із забруднюючих елементів у придонному ґрунті, рослинах, спроможності екосистеми до самоочищення та інші.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Зважаючи на ретельну роботу і проведення значної кількості картографічних, геофізичних, польових і лабораторних фізико-хімічних досліджень, можна стверджувати, що набір вихідних даних є достатнім для розрахунків на основі сучасних математичних моделей, які проаналізовані у попередньому розділі, для визначення рівня стійкості урбанізованих басей-

нових геосистем річок в умовах мегаполісу Харкова. Нажаль, ця робота у довоєнні роки не була закінчена. Поставлені питання на сьогоднішньому етапі залишаються актуальним і ще не вирішеним, в умовах додаткових воєнних забруднень регіонів України і необхідності створення належної системи екологічної безпеки. Також, на жаль, комплексна система оцінки якості землекористування на території урболандшафтної геосистеми ще в повній мірі не розроблена.

Новизна. На основі аналізу картографічних матеріалів з використанням сучасних онлайн карт та інтерактивних систем [47, 48, 51] для аналізу вимірних показників в динаміці та розрахунків індексів антропоізаційної стійкості визначено стійкість урболандшафтних басейнових геосистем р. Уди, р. Лопань та р. Харків у межах міста станом на 2023 р. (доступні дані з відкритих джерел).

Мета дослідження – визначити стійкість істотно урбанізованих ландшафтів з урахуванням складових урбанізованого гідродовкілля для вдосконалення системи екологічної безпеки.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Методологічне значення. В цьому дослідженні розраховані показники і проаналізована фазово-антропоізаційна стійкість для вказаних геосистем. Фазово-антропоізаційну стійкість визначаємо як залишкову здатність окремо взятої урболандшафтно-басейнової геосистеми до природної саморегуляції. Для розрахунку фазово-антропоізаційної стійкості до уваги брались: територіально-функціональна структура басейнової геосистеми, типи урбофункціональних підсистем, які функціонують у певній підсистемі, природні морфологічно-позиційні підсистеми (вододільно-рівнинні, схилі, заплави) та їх площі.

Для визначення фазово-антропоізаційної стійкості урболандшафтних басейнових геосистем створено інформаційний базис, до якого входять три басейнові геосистеми річок м. Харкова: Уди, Лопань, Харків (Рис. 1). Здійснено узагальнення зібраних даних та їх аналіз, розглянуто гідрологічні чинники та їх вплив на функціонування геосистем мегаполісу. Розраховано індекс фазово-антропоізаційної стійкості ($I_{\text{ФАС}}, \%$) [6–8], який оцінює антропоізаційну стійкість певної геосистеми, що зумовлюється ступенем її антропоізації та вказує на можливу здатність до відновлення.

У поєднанні з даними про басейнові геосистеми використовуємо ще одну важливу характеристику, яка суттєво доповнює розуміння стійкості геосистеми та розглядає потенційні можливості її відновлення. Це співвідношення сумарних площ – (квазі)екопозитивних (до яких відносять природоохоронну, полірекреаційну та меморіально-культурну урбофункціональні підсистеми) до (квазі)еконегативних (до яких відносять агропромислову, культурно-освітню, громадсько-адміністративну, житлову, транспортну, складську та промислову урбофункціональні підсистеми).

Дослідження є першим важливим кроком для визначення рівня ступеня стійкості урболандшафтних басейнових геосистем в умовах великого міста, для науково обґрунтованого визначення територій для об'єктів цивільного будівництва, об'єктів і територій екомережі, а також відновлення/створення природофункціональних територій.

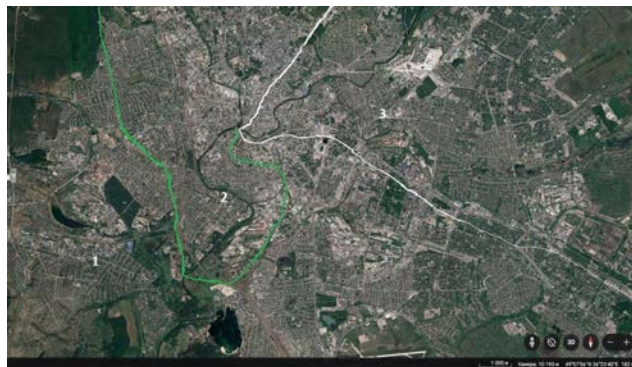


Рис. 1. Басейнові геосистеми річок Уди (1), Лопань (2), Харків (3) на території м. Харкова (з відкритого онлайн ресурсу Google-maps)

Викладення основного матеріалу. Стійкість природного об'єкту визначається як його здатність зберігати/відновлювати природну структуру і можливість виконувати свої функції за умовами різноманітних видів еконегативних дій на цей об'єкт [2, 5, 6, 7]. Стійкість урболандшафтної басейнової геосистеми оцінюють за допомогою двох складових: фазової та параметричної [6]. Зміст фазової стійкості визначають, відповідно, три складові: фазово-антропоізаційна стійкість; фазово-етологічна стійкість, та фазово-загальнофункціональна стійкість.

У наших дослідженнях спочатку зупинимось на кількісному вираженні фазово-антропоізаційної стійкості. Ця складова загальної фазової стійкості відображає міру «залишкової» на час аналізу здатності ландшафтів до природної саморегуляції. Цей показник кількісно знаходиться в оберненому зв'язку зі ступенем антропоізації ландшафтів. Фазово-антропоізаційна стійкість, з огляду на функціональну структуру природокористування у певній геосистемі, початково моделюється за індексом фазово-антропоізаційної стійкості ($I_{\text{ФАС},k}, \%$), який має вигляд [6]:

$$I_{\text{ФАС},k} = 100 - I_{\text{АНТ},k} = 100 - \sum_{ij=1}^n (r_i \times q_j) \times p_{ij}, \quad (1)$$

де $I_{\text{АНТ},k}$ – середньовиважений за площами відповідних полів індекс антропоізації k -тої модельної геосистеми ($\%$);

$r_{i,j}$ – загальна частка площі території урбанізованої басейнової геосистеми у цілому з i -тим рангом антропогенної перетвореності та j -тим індексом глибини такої перетвореності (у частках одиниці);

r_i – значення зазначеного i -того рангу антропогенної перетвореності (y %), що визначається за домінантною функціональною ознакою (головним видом «урбанізаційного» природокористування), тобто за типом певних урбофункціональних підсистем в межах урбанізованої геосистеми чи її складників;

q_j – значення зазначеного j -того індексу глибини цієї перетвореності, який відображає «субфункціональні» особливості таких підсистем;

n – кількість комбінацій i -того рангу та j -того індексу.

Для проведення розрахунків індексу ми скористалися запропонованими інтервальними та усередненими значеннями для різних типів урбофункціональних систем (Табл. 1). Для остаточного визначення рівня стану урбанізованих басейнових геосистем за ознаками її фазово-антропоізаційної стійкості використовували запропоновані дані (Табл. 2).

Таблиця 1

Інтервальні та усереднені значення добутку ($r_i \times q_j$) у залежності від типів урбофункціональних підсистем [6]

Типи урбофункціональних підсистем в межах малих урбанізованих ландшафтних геосистем	Інтервальні та усереднені значення ($r_i \times q_j$), %
1) природоохоронна	(0–10];5
2) полі рекреаційна	(10–20];15
3) меморіально-культурна	(20–30];25
4) агропробудовна	(30–40];35
5) культурно-освітня	(40–50];45
6) громадсько-адміністративна	(50–60]; 55
7) житлова	(60–70];65
8) транспортна	(70–80];75
9) складська	(80–90];85
10) промислова	(90–100];95

Таблиця 2

Категорійно-класифікаційна схема рівнів стану урбанізованих басейнових геосистем за ознаками її фазово-антропоізаційної стійкості [6]

Значення Іфас за моделлю, %	Здатність до саморегуляції	Рівень стану за класом
≥ 90	вельми сильна (1)	відмінний (I)
[80–90)	сильна (2)	добрий (II)
[70–80)	середня (3)	задовільний (III)
[60–70)	послаблена (4)	
[50–60)	слабка (5)	незадовільний (IV)
[30–50)	вельми слабка (6)	
< 30	гранично слабка (7)	поганий (V)

При дослідженні міського середовища необхідно враховувати ландшафтні особливості міста та його ландшафтно-морфологічну структуру, тому наші дослідження проводилися на основі карт місцево-

сті (Рис. 1), ландшафтів м. Харкова у довоєнний час (Рис. 2), і інтерактивних карт землекористування (Рис. 3).



Рис. 2. Ландшафти Харкова у довоєнний час [43]

Межі та площі урбофункціональних і морфологічно-позиційних підсистем в межах басейнових геосистем річок м. Харкова були визначені методом автоматичних облічень числа пікселів відповідного кольору на заданій площі на зображеннях з високою роздільністю і відомими геометричними розмірами пікселя [53].

Площа водозбірної басейну р. Уди, що розташована на території урбосистеми Харкова становить усю територію міста, р. Лопань є лівою притокою р. Уди, а р. Харків є лівою притокою р. Лопань. Якщо не враховувати території, які умовно відмежовуються від водозірної басейну р. Уди, тоді площа урболандшафтної басейнової геосистеми річки складає близько 19 тис. га. Гідрологічні, географічні, екологічні характеристики стану поверхневих вод річки і урболандшафтного басейну геосистеми надані у роботі [44].



Рис. 3. Інтерактивна карта землекористування на території басейнів річок системи Харків (1), Лопань (2) і Уди (3) м. Харкова станом на 2023 р. [48]

Типи урбофункціональних підсистем в мережі водозбірного басейну річок м. Харкова

Типи урбофункціональних підсистем в ландшафтній геосистемі	р. Лопань (не враховуючи р. Харків)		р. Харків		р. Уди	
	Площа, га	Значення, %	Площа, га	Значення, %	Площа, га	Значення, %
Природоохоронна	115	1	90	1	190	1
Полірекреаційна	3450	30	540	12	1900	10
Меморіально-культурна	345	3	90	2	380	2
Агровиробнича	575	5	540	12	1520	8
Культурно-освітня	575	5	270	6	1330	7
Громадсько-адміністративна	460	4	360	8	950	5
Житлова	3795	33	1575	35	5320	28
Транспортна	805	7	270	6	760	4
Складська	460	4	405	9	950	5
Промислова	920	8	405	9	5700	30

Загальна площа водозбірного басейну р. Лопань становить 200 тис. га; площа в межах міста Харків становить 11,5 тис. га (не враховуючи р. Харків). В межах водозбірного басейну, що знаходиться під впливом урбанізованої території, виділено урбофункціональні підсистеми, розраховані площі та їхні процентні відношення. Площа урболандшафтної басейнової геосистеми р. Харків складає 4,5 тис. га. Детальний аналіз території водозбірного басейну р. Харків у межах мегаполісу, її гідролого-, еколого-географічні характеристики запропоновані у роботі [45]. Розподіли площ урбофункціональних підсистем басейнових геосистем річок Уди, Лопань та Харків наведені у Таблиці 3.

Результати розрахунків вказують, що найбільші площі в усіх трьох досліджених геосистемах – це площі житлової та промислової підсистем, що вказує на значне антропогенне навантаження на ці геосистеми. Проте, для розрахунку індексу фазово-антропоїзаційної стійкості геосистем ще потрібні питомі площі урбофункціональних підсистем. Склад підсистем і розподіл їх питомих площ у порівнянні між собою наведені на Рис. 4.

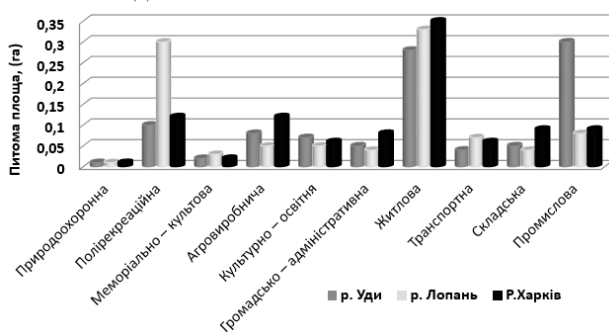


Рис. 4. Зведений розподіл питомих площ урбофункціональних підсистем

Отримані результати з визначення та розрахунків індексу фазово-антропоїзаційної стійкості $I_{\text{ФАС}}$ за формулою (1), які наведені у Таблиці 4, вказують, що урболандшафтні геосистеми річок Уди та Харків мають дуже низькі залишкові здатності до саморегуляції. Лише геосистема р. Лопань характеризується дещо вищою здатністю до саморегуляції у порівнянні з геосистемами річок Уди та Харків.

Доповненням до визначення залишкової здатності до самовідновлення урболандшафтних басейнових геосистем міста є характеристики сумарних площ (квазі) екопозитивних (S_{1-3}) та (квазі)еконегативних (S_{4-10}) підсистем і співвідношення цих площ (S_{4-10}/S_{1-3}) [6]. Підсистеми використовуються згідно з порядковими номерами, запропонованими у Табл. 1.

Таким чином урболандшафтна геосистема басейну Уд відзначається (Рис. 1–3, Табл. 3):

- у заплаві: домінують полірекреаційні підсистем зі співвідношенням (S_{4-10}/S_{1-3}) = 0,6. Ця ситуація вказує на переважання екопозитивних підсистем над еконегативними підсистемами в майже у півтори рази. Це сприймається як високий рівень стану геосистеми заплави Уди за ознаками фазово-антропоїзаційної стійкості;

- у вододільно-рівнинній: домінують полірекреаційні підсистеми, віце-домінують житлову підсистему. Співвідношення (квазі) еконегативних підсистем до (квазі)екопозитивних екосистем складає 1,3. Тобто, (квазі)еконегативні підсистеми переважають за площею;

- у схилівій: переважає за площею житлова і промислова підсистеми зі співвідношенням (S_{4-10}/S_{1-3}) = 5. Ця ситуація вказує на значне переважання (квазі)еконегативних підсистем над (квазі)екопозитивними підсистемами майже в 5 разів. Це спричиняє найгірший рівень стану геосистеми з дуже низькою здатністю до саморегуляції.

Таблиця 4

Оцінки рівня стану геосистем за ознаками їх фазово-антропоізаційної стійкості

Урбанізована геосистема басейну річки	Індекс стійкості ІФАС, %	Здатність до саморегуляції	Рівень стану за класом [6]
Уди	35,3	вельми слабка (5)	незадовільний (IV)
Лопань	50,8	слабка (6)	незадовільний (IV)
Харків	42,9	вельми слабка (5)	незадовільний (IV)

В цілому, для урбанізованої геосистеми басейну Уд (без притоки Лопань) в умовах міста відзначається: домінанта площ (квазі)еконегативних підсистем над (квазі)екопозитивними підсистемами у 6,6 разів.

Оцінювання рівня стану, що відображає фазову стійкість геосистеми Уди, засвідчило, що найвищою залишковою здатністю до саморегуляції володіють вододільно-рівнинна частина морфологічно-позиційної підсистеми річки, а схилова і заплавна підсистеми характеризуються, відповідно, середньою і слабкою здатністю до саморегуляції. В цілому рівень стану геосистеми Уди в умовах міста оцінений як незадовільний із досить слабкою здатністю до саморегуляції.

Територія водозбірного басейну р. Лопань представлена міжрічковими природними територіальними комплексами (ПТК), причому площа межирічкових ПТК становить 5%, а площа долинних ПТК, які представлені місцевостями заплав, становить 83%, борова тераса площею 7% та лесовими терасами із загальною площею 5%) (Рис. 2). Співвідношення площ наступне:

– у заплаві: домінантою є полірекреаційна підсистема зі співвідношенням $(S_{4-10}/S_{1-3}) = 0,2$. Це вказує на переважання екопозитивних підсистем над еконегативними підсистемами і сприймається як середній рівень стану геосистеми заплави Лопані за ознаками фазово-антропоізаційної стійкості;

– у вододільно-рівнинній: домінантою є житлова підсистема, причому переважно громадсько-адміністративна і культурно-освітня підсистеми. Співвідношення $(S_{4-10}/S_{1-3}) = 1,3$. Тобто, (квазі)еконегативні підсистеми переважають за площею, а клас рівня стану геосистем визначено як задовільного із середньою здатністю до саморегуляції;

– у схилівій: переважає за площею житлова і промислова підсистеми, а співвідношення $(S_{4-10}/S_{1-3}) = 5$ є достатньо високим. Ця ситуація вказує на значне переважання (квазі)еконегативних підсистем над (квазі)екопозитивними підсистемами (в 5 разів), що спричиняє найгірший рівень стану геосистеми з низькою здатністю до саморегуляції.

В цілому, геосистема р. Лопань в умовах великого міста відзначається домінантою площ (квазі)еконегативних підсистем над (квазі)екопозитивними підсистемами у 1,9 разів. Її ця ситуація є найкращою з усіх геосистем, що досліджувались нами.

Розглянемо морфологічно-позиційне представлення урболандшафтною геосистеми басейну р. Харків в умовах міста (Рис. 2, 3).

– у заплаві: домінантою є полірекреаційна підсистема. Співвідношення $(S_{4-10}/S_{1-3}) = 0,4$. Це вказує на переважання екопозитивних підсистем над еконегативними підсистемами в 2,5 рази. Цьому сприяло недавнє розширення території м. Харкова за рахунок збільшення питомої площі полірекреаційної підсистеми. Це сприймається як високий рівень стану геосистеми заплави;

– у вододільно-рівнинній: домінантою є житлова підсистема. Співвідношення $(S_{4-10}/S_{1-3}) = 1,3$. Тобто, (квазі)еконегативні підсистеми переважають за площею (особливо, крім житлової, вирізняються складська, громадсько-адміністративна і культурно-освітня підсистеми), клас рівня стану геосистем визначено як задовільний із середньою здатністю до саморегуляції;

– у схилівій: переважають за площею житлова, агропромислова, промислова підсистеми зі співвідношенням $(S_{4-10}/S_{1-3}) = 5$. Ця ситуація вказує на переважання (квазі)еконегативних підсистем над (квазі)екопозитивними підсистемами. Це спричиняє найгірший рівень стану геосистеми та визначається низька здатність до саморегуляції.

В цілому, для геосистеми р. Харків в умовах міста відзначається домінантою площ (квазі)еконегативних підсистем над (квазі)екопозитивними підсистемами у 5,3 рази.

Головні висновки. У дослідженні запропоновано для м. Харкова новий підхід до аналізу проблеми зростаючого навантаження антропогенних факторів на ландшафтні територіальні структури і геосистеми через визначення антропоізаційної стійкості урболандшафтних басейнових геосистем річок Уди, Лопань та Харків з урахуванням морфологічно-позиційної стійкості цих геосистем. Насамперед, значний фактичний матеріал, сучасні моделі дослідження довели, що залишкова здатність до природної саморегуляції урболандшафтних басейнових геосистем уможливило та суттєво доповнює розуміння геоecологічної ситуації у місті. При визначенні стійкості викристалізувалась загальна неузгодженість і протиріччя між басейновою (квазі)природною та урбофункціональною структурою міської басейнової структури, що зумовлює негативні для стійкості басейнової геосистеми урболандшафтних структуротворних процесів. Мала площа природоохоронної підсистеми, недостатня площа полірекреаційної підсистеми (особливо у басейнах р. Уди і р. Харків) і значні техногенні перетворення, – все це призводить до слабкої здатності до природної саморегуляції і відновлювання у урболандшафтних басейнових геосистем усіх трьох річок мегаполісу.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження доречно використовувати для продовження визначення стійкості та надійності урбанізованих басейнових геосистем мегаполісу, для накопичення однорідної бази даних з визначеними вимірюваними параметрами та індексами, які розраховуються на основі цих датсетів, та для поповнення новими даними цифрових карт урбанізованих геосис-

тем України. Вважаємо, що проведене дослідження є важливим для розробки/уточнення методів збалансованого екологічного управління і покращення стану ландшафтних територіальних геосистем, визначення потенційних ділянок для об'єктів цивільного будівництва у місті з урахуванням отриманих результатів, відновлення природофункціональних територій з врахуванням природних чинників та екологічних обмежень.

Література

1. Уряд ухвалив рамкову Концепцію державної програми водозабезпечення до 2030 року. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів*: веб-сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/uryad-uhvalyv-ramkovu-kontseptsiyu-derzhavnoyi-programy-vodozabezpechennya-do-2030-roku> (дата звернення 06.07 2024).
2. Гродзинський М.Д. Стійкість геосистем до антропогенних навантажень: монографія. Київ: Лікей, 1995. 251 с.
3. Гродзинський М.Д. Пізнання ландшафту: місце і простір: монографія. Київ: Вид-во КДУ, 2005. 399 с.
4. Гродзинський М.Д. Ландшафтна екологія: підручник. Київ: Знання, 2014. 99 с.
5. Дмитрук О.Ю. Ландшафтно-урбанізаційні системи України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра геогр. наук: 11.00.01. Київ, 2005. 38 с.
6. Самойленко В.М., Верес К.О. Моделювання урболандшафтних басейнових геосистем: монографія. Київ: Ніка – Центр, 2007. 296 с.
7. Самойленко В.М., Діброва І.О. Антропоізація ландшафтів: підручник. Київ: Ніка-Центр, 2021. 304 с.
8. Самойленко В., Пласкальний В. Робоча шкала міри антропоізації фізико-географічних таксонів України та її верифікаційна реалізація. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Сер. Географія*. 2017. № 1(65)/2(66). С. 54–65.
9. Внукова Н. В. Науково-методологічні основи екологічної безпеки комплексу автомобіль – дорога – середовище: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 21.06.01. Харків, 2015. 36 с.
10. Francis R.A. Positioning urban rivers within urban ecology. *Urban Ecosystems*. 2012. № 15. P. 285–291.
11. Moura A.C.M. Geodesign in Parametric Modeling of urban landscape. *Cartography and Geographic Information Science*. 2015. № 42(4). P. 323–332.
12. Waldheim Ch. Landscape as Urbanism. *Princeton University Press*. 2022. 256 p.
13. Urban Landscape Ecology: Science, Policy and Practice. R.A. Francis, J.D.A. Millington, M.A. Chadwick (eds.). Taylor & Francis Ltd, 2018. 450 p.
14. Grau D. Urban Environmental Landscape: book-album. Images Publishing Group Pty Ltd, 2015. 256 p.
15. Vilanova C., Ferran J.S., Concepción E.D. Integrating landscape ecology in urban green infrastructure planning: A multi-scale approach for sustainable development. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024. № 94. p. 128248.
16. Burkhard B., Maes J. (Eds.). Mapping ecosystem services: advanced books. Pensoft Publishers, Sofia, 2017. 374 p.
17. De Groot R.S., Hein L. Concept and valuation of landscape functions at different scales. *Multifunctional Land*. (Eds.) Use, U. Mander, H. Wiggering, K. Helming. New York: Springer, Heidelberg. 2007. P. 15–36.
18. Wu J. Landscape Ecology. Encyclopedia: Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier, 2024. P. 180
19. Baudoin L., Gittins J.R. The ecological outcomes of collaborative governance in large river basins: Who is in the room and does it matter? *Journal of Environmental Management*. 2021. № 281. P. 111836.
20. Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. *Nature Geoscience*. 2018. № 12(1). P. 7–21.
21. Niu L., Guo Y., Li Y., Wang Ch., Hu Q., Fan L., Wang L., Yang N. Degradation of river ecological quality in Tibet plateau with overgrazing: A quantitative assessment using biotic integrity index improved by random forest. *Ecological Indicators*. 2021. № 120. P. 106948.
22. Кізілова Н.М., Ричак Н.Л., Халін А.А. Математичне моделювання і прогнозування динаміки ділянки русла річки Сіверський Донець// *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматичний контроль систем»*. 2019. № 43. С. 30–37.
23. Кізілова Н.М., Ричак Н.Л., Чебукін Д.С., Лукієнко М.В. Екологічна оцінка якості поверхневих вод у бездошовий період в умовах міського водозбору. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2021. № 54. С. 289–305.
24. Chidiac S, El Najjar P, Ouaini N, El Rayess Y, El Azzi D. A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2023. № 22(2). P. 349–395.
25. Xu, S., Rowntree, J., Borrelli, P., Hodbod, J., & Raven, M. R. Ecological Health Index: A Short Term Monitoring Method for Land Managers to Assess Grazing Lands Ecological Health. *Environments*. 2019. № 6(6). P. 67.
26. Harris J.H., Silveira R. Large-scale assessments of river health using an Index of Biotic Integrity with low-diversity fish communities. *Freshwater Biology*. 1999. № 41. P. 235–252.
27. Li Y., Gao L., Niu L., Zhang W., Yang N., Du J., Gao Y., Li J. Developing a statistical-weighted index of biotic integrity for large-river ecological evaluations. *Environmental Management*. 2021. № 277. P. 111382.
28. Agboola O.A., Downs C.T., O'Brien G. Macroinvertebrates as indicators of ecological conditions in the rivers of KwaZulu-Natal, South Africa. *Ecological Indicator*. 2019. № 106. P. 105465.
29. Li J., Li Yi, Qian B., Niu L., Zhang W., Cai W., Wu H., Wang P., Wang C. Development and validation of a bacteria-based index of biotic integrity for assessing the ecological status of urban rivers: a case study of Qinhuai River basin in Nanjing. China. *Environment Management*. 2017. № 196. P. 161–167.

30. Ghosh A., Maiti R. Development of new Ecological Susceptibility Index (ESI) for monitoring ecological risk of river corridor using F-AHP and AHP and its application on the Mayurakshi river of Eastern India. *Ecological Informatics*. 2021. № 63. P. 101318.
31. Zhang M., Bao Y., Xu J., Han A., Liu X., Zhang J., Tong Z. Ecological security evaluation and ecological regulation approach of East-Liao River basin based on ecological function area. *Ecological Indicators*. 2021. № 132. P. 108255.
32. Kabdrakhmanova N.K., Mussabayeva M.N., Atasoy E., Zhensikbayeva N.Zh., Kumarbekuly S. Landscape and recreational analysis of Yertis river upper part on the basis of basin approach (Kazakhstan). *GeoJournal of Tourism and Geosites*. 2019. № 27(4). P. 1392-1400.
33. Кізілова Н.М., Ричак Н.Л. Засолення річкових вод в умовах урболадшафтної геосистеми і потеплення клімату. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2021. Вип 4 (129). С. 67–74.
34. Liu Sh., Wang P., Wang Ch., Chen J., Wang X., Hu B., Yuan Q. Ecological insights into the disturbances in bacterioplankton communities due to emerging organic pollutants from different anthropogenic activities along an urban river. *Science of the Total Environment*. 2021. № 796. P. 148973.
35. Peng Y., Fang W., Krauss M., Brack W., Wang Z., Li F., Zhang X. Screening hundreds of emerging organic pollutants (EOPs) in surface water from the Yangtze River Delta: occurrence, distribution, ecological risk. *Environment Pollution*. 2018. N 241. P. 484–493.
36. Fang Z., Song Sh., He Ch., Liu Zh., Qi T., Zhang J., Li J. Evaluating the Impacts of Future Urban Expansion on Surface Runoff in an Alpine Basin by Coupling the LUSD-urban and SCS-CN Models. *Water*. 2020. N 12. P. 3405.
37. Hepinstall-Cymerman J., Coe S., Alberti M. Using Urban Landscape Trajectories to Develop a Multi-Temporal Land Cover Database to Support Ecological Modeling. *Remote Sens*. 2009. N 1. P. 1353–1379.
38. De Groot R.S., Wilson M.A., Boumans R.M. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*. 2002. N41(3). P. 393–408.
39. Zhai T., Zhang D., Zhao Ch. How to optimize ecological compensation to alleviate environmental injustice in different cities in the Yellow River Basin? A case of integrating ecosystem service supply, demand and flow. *Sustainable Cities and Society*. 2021. N 75. P. 103341.
40. Zhang D., Wang X., Qu L., Li Sh., Lin Y., Yao R., Zhou X., Li J. Land use/cover predictions incorporating ecological security for the Yangtze River Delta region, China. *Ecological Indicators*. 2020. N 119. P. 106841.
41. Su Y., Chen X., Liao J., Zhang H., Wang Ch., Ye Y., Wang Y. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed land expansions. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2016. N 19. P. 35–46.
42. Wang L., Zheng H., Chen Y., et al. Systematic review of ecosystem services flow measurement: Main concepts, methods, applications and future directions. *Ecosystem Services*. 2022. N 58. P. 101479.
43. Ричак Н.Л. Просторово-часові особливості поведінки важких металів у ґрунтових поривах міських ландшафтів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. геогр. наук: 11.00.11. Харків, 2006. 20 с.
44. Ричак Н. Л., Московкін В. М., Кузнецова В. В. Розрахунок економічного збитку від поверхневих вод атмосферного походження (на прикладі житлової підсистеми). *Вісник Харківського університету імені В. Н. Каразіна. – Серія «Геологія – Географія – Геологія – Екологія»*. 2016. № 1147. С.239-248.
45. Ричак Н.Л., Гричаний О.М. Оцінка наванження поверхневим стоком на водний об'єкт в умовах урболадшафтної геосистеми. *«Людина і довкілля. Проблеми неоекології»*. 2019. № 31. С. 104–117
46. Кізілова Н.М., Ричак Н.Л., Руднев Ю.І. Підхід системної динаміки до контролю за якістю води на урбанізованих територіях. *Системи обробки інформації*. 2019. N 4(159). С. 87–92.
47. Землекористування. *Land-use-map*: веб-сайт. URL: <https://osmlanduse.org/> (дата звернення 10.06 2024).
48. Класи землекористування/ґрунтовий покрив. *LandCoverExplorer*: веб-сайт. URL: <https://livingatlas.arcgis.com> (дата звернення 12.06 2024).
49. Ричак Н.Л., Кізілова Н.М., Майструк В.А., Макаренко О.С., Прогнімак О.С. Математичний аналіз забруднення повітря на території України з використанням даних з відкритих джерел. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 4(157). С. 20–31.
50. Кізілова Н.М., Ричак Н.Л. Імовірнісні моделі менеджменту водними ресурсами на урбанізованих територіях. *Вісник КНУ імені Т.Г. Шевченка. Серія «Фізико-математичні науки»*. 2020. N 4. С. 20–27.
51. Проект для розробки чисельних методів моделювання термо-гідро-механіко-хімічних процесів у пористих і тріщинуватих середовищах: *OpenGeoSys*: веб-сайт. URL: <https://www.opengeosys.org/> (дата звернення 16.06 2024).
52. Кізілова Н.М., Ричак Н.Л. Інформаційне супроводження системи менеджменту водними ресурсами на урбанізованих територіях. *Системи обробки інформації*. 2020. № 4(163). С. 37–47.
53. Електронні карти. *Національний атлас України*: веб-сайт. URL: https://atlas.igu.org.ua/maps_elektron.html (дата звернення 10.06.2024).
54. Bui D.H., Mucsi L. From Land Cover Map to Land Use Map: A Combined Pixel-Based and Object-Based Approach Using Multi-Temporal Landsat Data, a Random Forest Classifier, and Decision Rules. *Remote Sens*. 2021. № 13. P. 1700.

АНАЛІЗ ПЕРЕДУМОВ ВПРОВАДЖЕННЯ БІОЛОГІЧНИХ ПЕРЕХОДІВ ДЛЯ ДИКИХ ТВАРИН

Волошина Н.О.¹, Бондар К.О.¹, Мартюхін А.В.¹, Волошин О.Г.²

¹Український державний університет імені Михайла Драгоманова
вулиця Пирогова, 9, 02000, м. Київ

²Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка
вул. Гетьмана Полуботка, 53, 14013, м. Чернігів
katernyaexpert@gmail.com, voloshynalex@gmail.com

Військові дії, зміна логістичних маршрутів, знищення природоохоронних територій, міграція диких тварин потребують перегляду підходів щодо питання безпеки на автомобільних трасах через зіткнення автотранспорту із великими дикими ссавцями. Міграційні шляхи диких тварин часто пролягають на ділянках заліснених природоохоронних територій заходу України. Враховуючи заборону відвідування лісів для населення і полювання в умовах воєнного стану, втрату середовища існування (пожежі, підтоплення, мінування, обстріли, присутність людей та ін.) та міграцію тварин на території Центральної і Західної України, фіксують зростання чисельності популяції великих ссавців у областях, віддалених від лінії зіткнення у 2022–2023 рр. Зростання частоти появи диких ссавців в селітєбних територіях, агроландшафтах та на автошляхах створює серйозну проблему для безпеки дорожнього руху та життя тварин. **Метою дослідження** було проаналізувати транспортну мережу України та визначити ділянки автомобільних трас найбільш небезпечні щодо появи на них великих диких ссавців, а також оцінити найбільш прийнятні споруди для біологічних переходів тварин. **Методологія дослідження базується** на системному підході, традиційними методами аналізу і синтезу нормативно-правової бази щодо природоохоронних заходів, а також пошук екологічно обґрунтованих шляхів для пом'якшення екологічних наслідків від трансформації логістичної мережі та зростання популяції великих ссавців в лісових екосистемах. **Наукова новизна роботи** полягає в розробці автодорожніх конструкцій оптимальніших для безпечного перетину тваринами автомобільних трас. **Висновки.** Проаналізовано і визначено ділянки трас, які проходять через об'єкти Смарагдової мережі на заході держави. До них відносять: трасу М06 Київ – Чоп (ділянка № 1 в Рівненській області між селами Горбаків і Гоща протяжністю 1,5 км і № 2 в с. Калинівка – 1 км, № 4 в Закарпатській області між населеними пунктами Нижні Ворота-Сваліява – 30 км і № 3 у Львівській області між населеними пунктами Сколе-Коростів – 8,2 км) та трасу М07 (ділянки № 1 в Житомирській області біля населеного пункту Писківка – 3 км та № 2 Українка – 1,5 км, № 3 в Рівненській області біля населеного пункту Сарни – 3 км та Маюничі – 1,5 км, №4 у Волинській області біля населеного пункту Гулівка – 1 км). Найбільш перспективною для облаштування екодуків є ділянка № 3 транспортного маршруту, що пролягає через територію НПП «Сколівські Бескиди» (траса Е471 (Мукачєво – Львів), та траса М06 (Київ – Чоп)), оскільки високе різноманіття представників раритетної фауни парку (зубр, бурий ведмідь, горностай тощо, близько 50 видів ссавців) створює ризик появи тварин на автотрасі та зіткнення із транспортними засобами. Пропонується будівництво наземного комбінованого біопереходу для міграції великих ссавців та додаткове спеціального покриття чи накриття сіткою, для переходу плазунів і бехребетних. *Ключові слова:* дикі ссавці, лісові екосистеми, Смарагдова мережа, логістичні маршрути.

Analysis of the preconditions for the implementation of biological transitions for wild animals. Voloshyna N., Bondar K., Martiukhin A., Voloshyn O.

Military actions, change of logistics routes, destruction of nature conservation areas, migration of wild animals require a review of approaches to the issue of safety on highways due to the collision of motor vehicles with large wild mammals. The migration routes of wild animals often lie in the areas of forested nature conservation areas in western Ukraine. Taking into account the ban on visiting forests for the population and hunting in conditions of martial law, the loss of habitat (fires, flooding, mining, shelling, the presence of people, etc.) and the migration of animals in the territory of Central and Western Ukraine, the increase in the population of large mammals in the regions is recorded, away from the contact line in 2022–2023. The increasing frequency of the appearance of wild mammals in residential areas, agricultural landscapes and on highways creates a serious problem for road safety and animal life. **The purpose** is analyze the transport network of Ukraine and determine the sections of highways most dangerous in terms of the appearance of large wild mammals on them, as well as evaluate the most suitable structures for biological crossings of animals. **The research methodology** is based on a systematic approach, traditional methods of analysis and synthesis of the legal framework for environmental protection measures, as well as the search for environmentally sound ways to mitigate the environmental consequences of the transformation of the logistics network and the growth of the population of large mammals in forest ecosystems. **The scientific novelty** of the work consists in the development of road structures that are more optimal for the safe crossing of highways by animals. **Conclusions.** Sections of routes that pass through the objects of the Emerald network in the west of the state have been analyzed and identified. They include: highway M06 Kyiv – Chop (section No. 1 in the Rivne region between the villages of Horbakiv and Goshcha with a length of 1.5 km and No. 2 in the village of Kalynivka – 1 km, No. 4 in the Zakarpattia region between the settlements of Nizhny Vorota-Svalyava – 30 km and No. 3 in the Lviv region between the settlements of Skole-Korostiv – 8.2 km) and highway M07 (section No. 1 in the Zhytomyr region near the settlement of Piskivka – 3 km and No. 2 Ukrainka – 1.5 km, No. 3 in In the Rivne region near the village of Sarny – 3 km and Mayunich – 1.5 km, No. 4 in the Volyn region near the village of Gulivka – 1 km). Section No. 3 of the transport route, which runs through the territory of the "Skolivski Beskydy" NPP, is the most promising for the construction of eco-ducts. (route E471 (Mukachevo – Lviv) and route M06 (Kyiv – Chop)), because the high diversity of representatives of the rare fauna of the park (bison, brown bear, stoat, etc., about 50 species of mammals) creates a risk of animals appearing on the highway and collision with vehicles means It is proposed to build a land-based combined bio-crossing for the migration of large mammals and additional special covering or netting for the crossing of reptiles and vertebrates. *Key words:* wild mammals, forest ecosystems, Emerald network, logistics routes.

Постановка проблеми. Війна в Україні спричинила потужний, тривалий, місцями катастрофічний, вплив на природні екологічні системи та їх компоненти. Одним із них є неконтрольований ріст популяції окремих видів диких тварин, переважно, в лісових екосистемах та їх міграція через елемент неспокою, підвищеного шуму, заборону відвідування лісів для населення і полювання в умовах воєнного стану, втрату середовища існування (пожежі, підтоплення, мінування, обстріли, присутність людей та ін.). На окремих територіях фіксують зростання чисельності популяції великих ссавців у областях, віддалених від лінії зіткнення.

Актуальність дослідження. Стрімке зростання чисельності популяції окремих видів дичини в деяких областях призводить до почастішання фактів проникнення тварин у населені пункти, сільськогосподарські угіддя, вихід на автомобільні дороги тощо, що створює небезпеку для людини та зіткнення із транспортними засобами.

За даними зимового обліку мисливських тварин 2023 р. у областях України реєстрували найбільший приріст чисельності популяції диких тварин серед парнокопитних на деокупованих територіях і віддалених від ділянок бойового зіткнення. Наприклад, у Київській області приріст популяції кабана дикого сягав 36%, а за попередній п'ятирічний період перевищив 50%. Подібну ситуацію реєструють на Черкащині, Житомирщині, Миколаївщині та в інших областях. Приріст популяції оленів на Київщині досяг 9%, козулі – близько 5%. Позитивну тенденцію реєструють щодо збільшення популяції рідкісних і зникаючих видів тварин, занесених до Червоної книги України, зокрема, рись +57%, тетерук, 10%, видра +1 та ін. Натомість, в областях, де були тривалі та інтенсивні бойові дії, чисельність дичини зменшилася. Так, у Харківській області чисельність популяції козулі зменшилася на понад 40%, а в Чернігівській – популяція кабана дикого зменшилася на майже 1% [1].

Суттєві трансформації логістичних маршрутів в Україні (відсутність авіап перевезень, морська блокада та зміна інтенсивності залізничних і автомобільних перевезень) зумовили ситуацію збільшення інтенсивності автомобільного трафіку на окремих трасах у західних областях держави. Такі ділянки часто проходять уздовж або перетинають лісові масиви, природоохоронні території з високими показниками фауністичного біорізноманіття, де дикі тварини опиняються на автомобільній трасі та спричинюють аварійні ситуації.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Науково-практичні дослідження виконувалися відповідно до ініціативної теми кафедри екології природничого факультету Українського державного університету імені Михайла Драгоманова: «Екологічне обґрунтування збереження біологічного різноманіття при

плановій діяльності» (zareєстровано в УкрІНТЕІ 01 22U001574 від 14.02.2022)».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найчисельнішими в країнах Європи є популяції оленя благородного (*Cervus elaphus*), козулі (*Capreolus capreolus*), дикого кабана (*Sus scrofa*), в деяких країнах, зокрема Швеції – великих м'ясоїдних тварин: вовка (*Canis lupus*), ведмедя (*Ursus arctos*), рисі (*Lynx lynx*). Популяції усіх видів приурочені до існування у лісових екосистемах, водно-болотних угіддях, гірських районах, в регіонах з високою часткою природоохоронних територій. Не рідкістю є проникнення великих диких тварин до селітебних територій та розташованих поблизу агроландшафтів, що пов'язано з трофічним чинником і сезонністю вирощування сільськогосподарських культур [2, 3, 4]. Для України одним із найчисельніших і наймобільніших видів лісових ссавців є кабан дикий (*Sus scrofa*). Він володіє високою екологічною пластичністю, швидко адаптується до нових умов існування і здатен до швидкого відновлення популяції та колонізації міських і приміських районів [5]. Так, упродовж 2019–2020 років реєстрували швидке відновлення популяції кабана дикого після стрімкого зменшення його чисельності упродовж 2016–2018 рр. від спалаху зоонозної інфекції – африканської чуми свиней (АЧС) у Чернігівській області [6].

За даними досліджень у Європейських країнах показники аварійності на дорогах за участі диких тварин становлять близько 10%. Переважно, аварійні ситуації зі смертністю тварин реєстрували на автомагістралях з інтенсивністю руху понад 20 тис. транспортних засобів за день [7]. Це пов'язано із створенням транспортної інфраструктури поблизу природних екосистем і сполучних територій, спричинюючи фрагментацію ареалів видів диких тварин [5]. Тому, планування будівництва автомагістралей та автомобільних доріг потребує обґрунтування у кожному окремому випадку і передбачена в актуальних Директивах і Регламентах ЄС, керівних принципах щодо пом'якшення впливу бар'єрів на транспорту інфраструктуру. Обов'язковим є врахування розташованих поблизу дороги, або перетину нею екологічних коридорів, об'єктів природно-заповідного фонду (ПЗФ) і Смарагдової мережі, лісових масивів, шляхів міграції тварин, з визначенням оптимальних розмірів шляхів перетину (біологічні мости, підземні переходи) [7].

Водночас, на думку дослідників, при проектування біопереходів необхідно враховувати зміну ландшафтів у перспективі, пов'язану з регулюванням лісовим господарством, розорюванням земель, зміною клімату, природною сукцесією в об'єктах ПЗФ та Смарагдової мережі. Відповідно, в межах очікуваного терміну будівництва і експлуатації біологічного переходу потенційно може змінюватися модель міграційних потоків представників дикої фауни з часом [7, 8].

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Стаття приділяє увагу питанням, пов'язаним зі зміною логістичних маршрутів в Україні із початку повномасштабної війни та наслідками для зростаючої чисельності популяцій мігруючих диких ссавців.

Новизна. Активні бойові дії, зміна логістичних шляхів, знищення природоохоронних територій будуть мати віддалені наслідки для біорізноманіття, зокрема, необхідність моделювання і створення біологічних переходів на ділянках перетину автомобільних доріг з інтенсивним рухом або перетин міграційних шляхів диких ссавців задля безпеки дорожнього руху та збереження дикої фауни.

Методологічне або загальнонаукове значення. Застосовували системний підхід, традиційні методи аналізу і синтезу, було проведено бібліографічний огляд сучасних міжнародних і вітчизняних джерел інформації, нормативно-правової бази щодо пролягання автомобільних доріг через екологічну мережу України, співставлення її з маршрутами міграції ссавців. Визначення, терміни та концепції використано відповідно до міжнародної практики.

Проведені дослідження дозволяють здійснити екологічне обґрунтування, моделювання можливості створення екодуків на автошляхах та пом'якшення екологічних наслідків безпекової ситуації на дорогах в умовах військового стану.

Виклад основного матеріалу. З початком повномасштабної війни в Україні вихідні дані для процесу моделювання динаміки і регуляції популяцій диких тварин значно ускладнені, що пов'язано з воєнними діями, екологічними катастрофами (наприклад, підлив Каховської ГЕС, пожежі в НПП «Кам'янська Січ»), міграцією тварин та ін. За результатами таксації мисливських видів звірів у 2018 році в лісах Кіровоградщини, Полтавщини, Львівщини, Хмельниччини, Черкащини і Тернопільщини реєстрували стабільний приріст усіх видів дикої фауни. Найбільшу питому чисельність серед диких копитних мали козуля (74,21%), кабан дикий (13,96%) та олень благородний (5,80%), з середнім показником вилучення мисливських ресурсів – 5,99%, де найвищі показники були у Центральних і західних областях (7,44–9,71%), а найнижчі – у південних областях (до 4,17%) [9].

На фоні стабільного зростання популяції цих видів упродовж останніх десятиліть, воєнні роки забезпечили додатковий ріст їхніх популяцій. В окремих лісомисливських господарствах Східного лісового офісу Державного підприємства «Ліси України» чисельність копитних тварин зросла на 30–35%. Ситуацію пов'язують із міграцією диких тварин зі східних у центральні і західні регіони країни через воєнні дії та заборону мисливства. Тут з'являються нетипові для даних екосистем види, наприклад шакал звичайний (*Canis aureus*), ареалом поширення якого є південь України [1].

Міграція диких тварин на нові території та зміщення логістичних маршрутів в західні регіони України зумовило збільшення частоти випадків появи тварин на дорогах та створення ними аварійних ситуацій. Найближчі роки, не очікується зміни ситуації, що потребує впровадження дієвих заходів для створення безпечного дорожнього руху і захисту тварин. Сьогодні в Україні не оприлюднюються дані по завантаженості міжнародних магістралей з міркувань безпеки. Водночас, дослідження науковців показали, що міжнародний автомобільний транспортний коридор – це не тільки інфраструктурна вісь, а й територія, на яку поширюється його вплив, зі сформованою мережею розселення та соціально-економічним потенціалом [10].

Згідно статистичних даних Національної поліції України, за період 2013–2018 років на дорогах України було зафіксовано 2301 випадок автотранспортних пригод із наїздами на тварин. Водночас, не враховували тип тварин, (дика або свійська тварина) і фіксували випадки ДТП лише на обласних чи регіональних автотрасах, що дає неповну загальну картину у масштабах усієї країни. З 2019 року такий підрахунок не ведеться.

Досвід зарубіжних країн вказує на дієвий спосіб будівництва біопереходів або екодуків, шлях яких лежить через автомагістралі.

Шведські дослідники пропонують створювати безпечні проходи при будівництві доріг для з'єднання ландшафтів для проходу великих ссавців, на максимальній відстані 6 км уздовж усіх основних доріг і залізниць [11].

Грунтуючись на власних дослідженнях та математичних моделях Helldin J.O. (2022) пропонує стратегію планування, спрямовану на створення кількох малих структур переходу замість великої споруди, що може полегшити планування пом'якшення наслідків фрагментації ареалу. Агументами на користь цієї гіпотези є оптимізація типів переходів для цільових видів і окремих особин, що поєднується із вимогами до середовища існування та обмеженим соціальним втручанням. При цьому довгострокова функціональність конструкцій переходу має бути гарантована (наприклад, на природоохоронних ділянках) [7].

Публікації останніх років свідчать про відсутність вичерпних даних щодо ефективності використання біопереходів різних типів та їх відповідність вимогам різних видів тварин, умов, що забезпечують повноцінне їх використання (конкуренція, домінування, антагоністичні типи поведінкових реакцій, загроза хижацтва та ін.). Недостатній рівень післяпроектного моніторингу під час довгострокового обслуговування транспортної мережі ускладнює підтвердження функціональності біологічних переходів відповідно до національних екологічних стандартів, зокрема, забезпечення зіткнення диких тварин з автотранспортом [11, 12].

Для визначення типового біопереходу, першочергово потрібно визначити потреби в захисті тва-

ринного світу. У випадку України, доцільно розташовувати їх в межах або поблизу природоохоронних територій. Не дивлячись на те, що спорудження екодуків має відбуватися згідно пункту 9.5 ДБН В.2.3-22.2009 «Мости та труби. Основні вимоги проектування», відтермінування їх облаштування лише призведе до погіршення безпекової ситуації у місцях міграції тварин. Наприклад, в США, країні яка має розгалужену мережу побудованих біопереходів та екодуків, згідно їх статистичних даних, на дорогах щороку гинуть близько 350 тис. оленів та 21 млн. білок. Тобто кількість необхідних біопереходів все ще недостатня. В інших європейських та азіатських державах ситуація ідентична.

Проаналізувавши систему транспортних сполучень на заході України, встановлено, що два маршрути мають найчисельніше проходженням автотранспорту: 1. Траса М06 Київ – Чоп (на м. Будапешт через м. Львів, Мукачево і Ужгород); 2. Траса М07 Київ – Ковель – Ягодин (на м. Люблін). На даних маршрутах було зафіксовано декілька ділянок доріг, які охоплюють територію Смарагдової мережі. На трасі М06 в Рівненській області між містами Корець-Рівне було зафіксовано дві ділянки дороги, а саме ділянка № 1 між селами Горбаків і Гоща протяжністю 1,5 км і ділянка № 2 в с. Калинівка Рівненської області ділянка протяжністю 1 км, дві ділянки № 4 в Закарпатській області між населеними пунктами Нижні Ворота-Свалява протяжністю в 30 км та № 3 в Львівській області між населеними пунктами Сколе-Коростів протяжністю 8,2 км. На трасі М07 було виявлено дві ділянки № 1 в Житомирській області біля населеного пункту Пісківка протяжністю 3 км та № 2 в Українці протяжністю 1,5 км, дві ділянки № 3 в Рівненській області біля населеного пункту Сарни протяжністю 3 км та № 4 в Маюничі протяжністю 1,5 км, одна ділянка № 5 у Волинській області біля населеного пункту Гулівка протяжністю 1 км. Всі вище перераховані ділянки охоплюють території охоронних зон з високими показниками біорізноманіття і наявністю мігруючих видів, що може призвести до негативних наслідків, зокрема, невеликі ареали не зможуть підтримувати життєздатність популяції, фрагменти будуть настільки ізольовані один від одного, що унеможливиться обмін генетичною інформацією між популяціями [13].

Проаналізувавши кількість природоохоронних об'єктів на трасі М06 можна виділити найбільш небезпечні для тварин ділянки дороги – № 1 та № 3. На трасі М07 Київ – Ковель-Ягодин можна виділити найбільш вразливі до загибелі рідкісних тварин на автошляху – ділянку № 5.

Для трасування і проектування доріг у ділянках їх перетину з міграційними шляхами диких тварин неможливе без урахування етологічних особливостей. При проведенні інженерно-екологічних вишукувань необхідно розробляти ситуаційні схеми, на яких відображати шляхи міграції тварин [14].

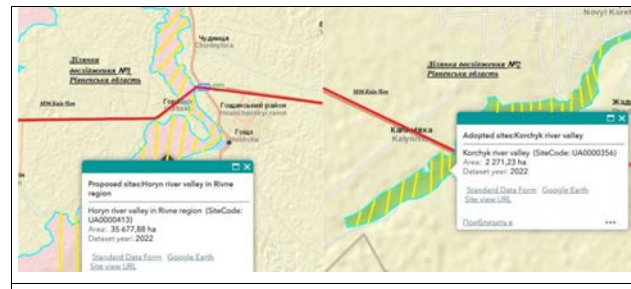


Рис. 1. Ділянки на трасі М06 Київ-Чоп № 1 та № 2 Рівненська область



Рис. 2. Ділянки на трасі М06 Київ-Чоп № 3 Львівська обл. та № 4 Закарпатська обл.

Облаштування екодуків вздовж транспортного маршруту на ділянці № 5, що пролягає через територію Національного природного парку «Сколівські Бескиди». В парку зосереджено багато видів тварин, які занесено до Червоної Книги України (зубр, бурий ведмідь, горностай тощо), загалом близько 50 видів ссавців. Через парк пролягає траса Е471 (Мукачево – Львів), та траса М06 (Київ – Чоп).

Буручи до уваги проаналізовані дані створення екодуків є доцільним в місцях перетину поживальних автомобільних трас на ділянках, що пролягають через території смарагдових об'єктів. Залежно від потреб біопереходи можуть бути різних категорій: для плазунів, безхребетних та водних видів доцільно будувати підземні переходи, подібні до арочних конструкцій; для ссавців – надземний екодук; комбіновані – наземні з додаванням спеціального покриття чи накриття сіткою, для переходу плазунів.

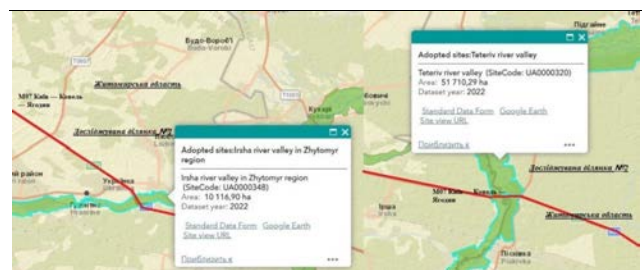


Рис. 3 Ділянки дослідження на автошляху М07 Київ-Ковель-Ягодин № 1 та № 2

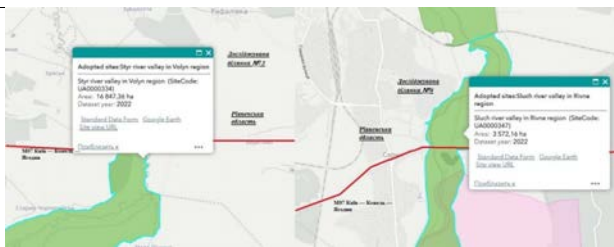


Рис. 4. Ділянки на трасі М07 Київ-Ковель-Ягодин № 3 та № 4



Рис. 5. Ділянки на трасі М07 Київ-Ковель-Ягодин № 5 Волинська обл.

Висновки і пропозиції. Отже, відсутність авіаперевезень, морська блокада та зміна інтенсивності залізничних і автомобільних перевезень зумовили трансформацію логістичних маршру-

тів, які зосереджено на заході країни. Ця територія багата на природоохоронні території з високими показниками залісненості та фауністичного різноманіття. Проаналізувавши транспортну мережу України визначено ділянки автомобільних трас найбільш небезпечні для появи великих диких ссавців на дорогах, до них відносять: трасу М06 Київ – Чоп (ділянки в Рівненській області між селами Горбаків і Гоща протяжністю 1,5 км і в с. Калинівка – 1 км, в Закарпатській області між населеними пунктами Нижні Ворота-Свалява – 30 км і у Львівській області між населеними пунктами Сколе-Коростів – 8,2 км) та трасу М07 (в Житомирській області біля населеного пункту Пісківка – 3 км та Українка – 1,5 км, в Рівненській області біля населеного пункту Сарни – 3 км та Маюничі – 1,5 км, у Волинській області біля населеного пункту Гулівка – 1 км).

Найбільш перспективною для облаштування екодуків є ділянка № 3 транспортного маршруту, що пролягає через територію НПП «Сколівські Бескиди». (траса Е471 (Мукачєво – Львів), та траса М06 (Київ – Чоп)), оскільки високе різноманіття представників раритетної фауни парку (зубр, бурий ведмідь, горностаї тощо, близько 50 видів ссавців) створює ризик появи тварин на автотрасі та зіткнення із транспортними засобами. Пропонується будівництво наземного комбінованого біопереходу для міграції великих ссавців та додаткове спеціального покриття чи накриття сіткою, для переходу плазунів і бехребетних [14].

Література

1. Державне агентство лісових ресурсів України: веб-сайт. URL: <https://forest.gov.ua/news/v-ukraini-tryvaie-shchorichnyi-zumovui-oblik-dyukh-tvaryn> (дата звернення: 29.05.2024).
2. Richter L, Balkenhol N, Raab C, Reinecke H, Meissner M, Herzog S, Isselstein J, Signer J. So close and yet so different: The importance of considering temporal dynamics to understand habitat selection. *Basic and Applied Ecology*. 2020. Vol. 43. P. 99–109. URL: <https://doi.org/10.1016/j.baae> (Last accessed: 02.02.2024).
3. Thurfjell H, Ball JP, Åhlén P-A, Kornacher P, Dettki H, Sjöberg K. Habitat use and spatial patterns of wild boar *Sus scrofa* (L.): Agricultural fields and edges. *European Journal of Wildlife Research*. 2009. Vol. 55, № 5. P. 517–523. URL: <https://doi.org/10.1007/s10344-009-0268-15> (Last accessed: 02.02.2024).
4. Milleret C, Ordiz A, Chapron G, Andreassen HP, Kindberg J, Månsson J, Tallian A, Wabakken P, Wikenros C, Zimmermann B, Swenson JE, Sand H. Habitat segregation between brown bears and gray wolves in a human-dominated landscape. *Ecology and Evolution*. 2018. Vol. 8. P. 11450–11466. URL: <https://doi.org/10.1002/ece3.4572> (Last accessed: 02.02.2024).
5. Zuberogitia I, del Real J, Torres JJ, Rodríguez L, Alonso M, Zabala J. Ungulate Vehicle Collisions in a Peri-Urban Environment: Consequences of Transportation Infrastructures Planned Assuming the Absence of Ungulates. *PLoS ONE*. 2014. Vol. 9, № 9. P. e107713. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0107713> (Last accessed: 02.02.2024).
6. Екологічні особливості поширення емергентних інфекцій в природних біоценозах України / Волошин О.Г., Волошина Н.О., Карпенко О.Ю., Дубінський Д.В., Сушко Д.Ю. *Журнал «Екологічні науки»*. – 2022. – № 1 (40). – С. 90–95. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.16> (Last accessed: 02.02.2024).
7. Helldin J.O. Are several small wildlife crossing structures better than a single large? Arguments from the perspective of large wildlife conservation. In: Santos S, Grilo C, Shilling F, Bhardwaj M, Papp CR (Eds) *Linear Infrastructure Networks with Ecological Solutions*. *Nature Conservation*. 2022. Vol. 47. P. 197–213. URL: <https://doi.org/10.3897/natureconservation.47.67979> (Last accessed: 02.02.2024).
8. Bjørneraas K, Solberg EJ, Herfindal I, Van Moorter B, Rolandsen CM, Tremblay J-P, Skarpe C, Sæther B-E, Eriksen R, Astrup R. Moose *Alces alces* habitat use at multiple temporal scales in a human-altered landscape. *Wildlife Biology*. 2017. Vol. 17, № 1. P. 44–54. URL: <https://doi.org/10.2981/10-073> (Last accessed: 02.02.2024).
9. Соболев О.М. Динаміка видового складу та використання мисливської копитної фауни Херсонської області. *О.М. Соболев. Таврійський науковий вісник*. – 2021 р. – № 118. – С. 368–376.

10. Бобрун Н.В. Принципи розвитку територій в зонах впливу міжнародних транспортних коридорів: дис. канд. архітектури. Львів, 2015. С. 32.
11. Bhardwaj M, Olsson M, Seiler A. Ungulate use of non-wildlife underpasses. *Journal of Environmental Management*. 2020. Vol 273. P. e111095. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111095> (Last accessed: 02.02.2024).
12. Sijtsma FJ, van der Veen E, van Hinsberg A, Pouwels R, Bekker R, van Dijk R, Grutters M, Klaassen R, Krijn M, Mouissie M, Wymenga E (2020) Ecological impact and cost-effectiveness of wildlife crossings in a highly fragmented landscape: A multi-method approach. *Landscape Ecology*. 2020. Vol. 35, № 7. P. 1701–1720. URL: <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01047-z> (Last accessed: 02.02.2024).
13. Матус С. А., Морозов А. В., Морозова Т. В., Рутковська І. А., Хрутьба В. О., Технології захисту навколишнього середовища. Збірник наукових праць «Дороги і мости» Київ, 2020. С.87-88
14. Мартюхін А.В., Волошина Н.О. Перспективи впровадження захисних огорожень та екодуків для безпечного пересування тварин через автодороги. *Журнал «Екологічні науки»*. – 2023. – Випуск 2 (47). – С. 173–177. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.2-47.28> (дата звернення: 02.02.2024).

ВИДОВИЙ СКЛАД ТА СТРУКТУРА ІХТІОФАУНИ РІЧКИ ГОРЕНКА (БАСЕЙН Р. ІРПІНЬ)

Причепя М.В., Коваленко Ю.О.

Інститут гідробіології Національної академії наук України
пр. Володимира Івасюка, 12, 02000, м. Київ
Prichepa1987@ukr.net

Дослідження іхтіофауни річки Горенка, правої притоки річки Ірпінь, проведені в 2023–2024 роках на п'яти станціях. Проведено первинну оцінку дослідних станцій за гідроекологічними показниками. Вміст кисню коливався від 4,9 до 7,6 мг/дм³, рН від 7,3 до 8,1, мінералізація від 160 до 290. Ширина русла становила 1,7–7,5 м, а проєктивне покриття водних рослин 25–60%. Переважаючим типом донного субстрату був пісок. Всього виявлено 19 видів риб із 7 родин. Найбільше видове багатство зареєстровано у гирловій ділянці (17 видів), яка є екоотонною зоною річка/річка (Горенка/Ірпінь). Встановлено, що у нижній течії види-домінанти – *Rutilus rutilus* (24,2–43,6%), *Cobitis taenia* (13,7–15,1%) та *Leucaspis delineatus* (15,6–48,3%). Головним чинником, що визначає розподіл видів на річці Горенка є сполучення водотоку із суміжними водоймами зокрема ставками. Загалом у структурі іхтіофауни переважали лімнофільні фітофільні види. У місцях, де спостерігалось істотне заростання русла водною рослинністю значний відсоток становили *Rhodeus amarus* (14,3%), *Scardinius erythrophthalmus* (11,4%), *Proterorhinus semilunaris* (14,3%), *Perca fluviatilis* (11,4%). У верхній течії домінуючий комплекс формували пічкур звичайний та верховка, частка яких становила 76,3 та 18,4%. У структурі іхтіофауни зареєстровані чужорідні види: *Carassius auratus*, *Perccottus glenii*, *Proterorhinus semilunaris*, *Pseudorasbora parva*, *Neogobius fluviatilis*. Їх частка становила 26,3%. Наявність трьох раритетних видів (входять до переліку Резолюції 6 Бернської конвенції) *Cobitis taenia*, *Misgurnus fossilis*, *Rhodeus amarus* підкреслює важливість річки як біологічного резервату. Їх частка становила 15,7%. Тому, існує необхідність заходів для збереження та відновлення екосистеми річки Горенка та поповнення генофонду популяцій аборигенних видів басейну річки Ірпінь. Сьогодні це є дуже актуально, оскільки значна кількість популяцій *Gobio gobio* та *Cobitis taenia* перебувають у депресивному стані через пресинг бичкових риб, зокрема у каскаді водосховищ на річці Дніпро. **Ключові слова:** річка Горенка, іхтіофауна, видове багатство, аборигенні види.

Species composition and structure of the Horenka river (Irpin river basin). Prychepa M., Kovalenko Yu.

Studies of the ichthyofauna of the Horenka River, the right tributary of the Irpin River, were conducted in 2023–2024 at five stations. An initial assessment of experimental stations was carried out according to hydro-ecological indicators. Oxygen content ranged from 4.9 to 7.6 mgO/dm³, pH from 7.3 to 8.1, mineralization from 160 to 290 mg/dm³. The width of the channel was 1.7–7.5 m, and the projective coverage of aquatic plants was 25–60%. The predominant type of bottom substrate was sand. A total of 19 species of fish from 7 families were found. The greatest species richness was registered in the mouth of the river (17 species), which is a river/river ecotone zone (Horenka/Irpin). It was established that the dominant species in the lower reaches are *Rutilus rutilus* (24.2–43.6%), *Cobitis taenia* (13.7–15.1%) and *Leucaspis delineatus* (15.6–48.3%). The main factor that determines the distribution of species on the Horenka River is the connection of the watercourse with adjacent bodies of water, particularly ponds. In general, the ichthyofauna structure was dominated by limnophilic phytophilic species. In places where there was a significant overgrowth of the riverbed with aquatic vegetation, a significant percentage was *Rhodeus amarus* (14.3%), *Scardinius erythrophthalmus* (11.4%), *Proterorhinus semilunaris* (14.3%), *Perca fluviatilis* (11.4%). In the upper reaches, the dominant complex was formed by the *Gobio gobio* and *Leucaspis delineatus*, the share of which was 76.3 and 18.4%. In the structure of the ichthyofauna, invasive species are registered: *Carassius auratus*, *Perccottus glenii*, *Proterorhinus semilunaris*, *Pseudorasbora parva*, *Neogobius fluviatilis*. Their share was 26.3%. The presence of three rare species (included in the list of Resolution 6 of the Berne Convention) *Cobitis taenia*, *Misgurnus fossilis*, *Rhodeus amarus* emphasizes the importance of the river as a biological reserve. Their share was 15.7%. Therefore, there is a need for measures to preserve and restore the ecosystem of the Horenka River and replenish the gene pool of populations of aboriginal species of the Irpin River basin. Today, this is very relevant, as a significant number of populations of *Gobio gobio* and *Cobitis taenia* are in a depressed state due to bullfish pressure, in particular in the cascade of reservoirs on the Dnipro River. **Key words:** Horenka River, ichthyofauna, species richness, aboriginal species.

Постановка проблеми. Посилення процесів урбанізації та розширення площ під сільськогосподарські угіддя сприяють антропогенному пресингу на водні екосистеми [1, 2, 3], зокрема й малі річки. Крім того істотного впливу завдала річковим біоценозам в межах України військова агресія російської федерації [4, 5, 6]. У зв'язку із дефіцитом води та зниженням біорізноманіття, водотоки є пріоритетними моделями для проведення біологічних досліджень для подальшої мінімізації шкодочинного впливу на

біоценози [7, 8], а також подальшого їх відновлення [9, 10]. Поряд з цим водотоки малих річок є місцем існування типових річкових і навіть рідкісних видів риб [11, 12] та інших тварин [13].

Актуальність дослідження. Важливість малих річок зумовлена процесами формування природних комплексів з широким ландшафтним і біологічним різноманіттям, оскільки вони є частиною екотонів між водними і болотними біоценозами [9, 14]. разом з тим, значна кількість водотоків в Україні перебуває

у незадовільному стані [3, 7]. Поряд із глобальними кліматичними змінами та воєнними діями виникають порушення екологічної рівноваги у річкових системах, але наслідки для існування в Україні та світі досліджені вкрай мало. Під час вторгнення російської федерації відбулись значні зміни у водотоках та прибережних зонах [6]. Це призвело до порушення гідрологічного режиму [4, 5] та до заболочування окремих ділянок, а також накопичення в них токсичних сполук [15]. Яскравим прикладом цього може слугувати річка Горенка, права притока річки Ірпінь. Іхтіофауна цієї річки потребує детального вивчення для розробки заходів зі збереження та відновлення екосистеми.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проводили в рамках виконання наукового проєкту № 2022.01/0077 «Розробка технологій та заходів з ревіталізації річкових систем, що постраждали внаслідок російської агресії, як складова розділу 8 Планів Управління Річковими басейнами» договору № 89/0077 від 01.03.2024. Також дослідження пов'язані з необхідністю моніторингу водно-болотних екосистем малих річок із рекомендаціями щодо заповідання окремих територій під заказники.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Річка Горенка згадувалась у дослідженнях низки авторів [3, 16], де розглядалися її гідрографічні та гідрологічні показники. Іхтіологічні дослідження здійснювали в останні десятиріччя на лівій притоці Горенки – Котурці [17, 18, 19, 20, 21, 22]. Серед зареєстрованих видів слід відзначити наявність *Parasalmo mykiss*. Існують відомості про те, що у ставку Карачун, розташованому нижче риборозплідника, можливо сформувалась її місцева популяція, дуже нечисленна, але здатна до самовідтворення [20]. Основна увага дослідників приділялась вивченню розмірно-вікової структури молоді риб [21]. Особливої уваги заслуговують дослідження структурних показників популяцій типових представників рівнинних річок [21, 22]. Щодо аналізу іхтіофауни річки Горенка здійснено фрагментарне дослідження її верхньої та частково середньої течії, де було зареєстровано 7 видів [23]. Також зроблено порівняння структурно-функціональних та фізіолого-біохімічних показників популяцій *Gobio gobio* та *Carassius auratus* із іншими репродуктивно віддаленими угрупованнями риб низки водотоків Києва [11, 24]. Слід зауважити, що у процесі вивчення іхтіофауни малих річок на урбанізованих територіях Києва встановлено наявність риб, що занесені до Червоної книги України, зокрема у р. Сирець, р. Либідь [23] та р. Почайна [25]. Це є підтвердженням того, що малі річки є своєрідними рефугіумами для відтворення та нагулу раритетної іхтіофауни.

Новизна. Описано видовий склад та структуру іхтіофауни річки Горенка в умовах повномасштабного вторгнення російської федерації.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Отримано дані стосовно видового складу риб та їх розподілу на р. Горенка після завершення активної фази бойових дій у Київській області.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження проводили в різні сезони (вересень, жовтень, листопад 2023), квітень, травень 2024 рр. Оцінку типів водотоків проводили згідно загальноприйнятих методик [26]. Під час польових досліджень використовували єдину методику відбору матеріалу та ідентичні знаряддя лову, зокрема іхтіологічні сачки. Важливо зазначити, що не застосовувались методики, які суперечать встановленим біоетичним нормам, українському законодавству чи потребують спеціальних дозволів. Для вивчення видового та кількісного складу іхтіофауни на станціях дослідження опрацьовано 573 екземплярів риб. Видовий склад визначали за загальноприйнятими методиками [27]. Українські і наукові назви і таксономічне положення визначених видів подано за Ю.В. Мовчан [27]. Для кожної станції підраховано відсоткове співвідношення видів за кількістю особин. Як додатковий метод для ідентифікації видового та кількісного складу риб використовували фотозйомку. Також проводили опитування рибалок. Вміст розчиненого у воді кисню визначали за допомогою оксиметра AZ – 8403 AZ Instrument (Тайвань). Показники: рН, мінералізацію води оцінювали за допомогою комбінованого пристрою Milwaukee, MW802 PRO pH/EC/TDS Portable Meters (США). Прозорість води визначали за диском Секкі (см). Температуру води визначали за допомогою ртутного термометра. Після видової ідентифікації всю рибу відпустили назад у їх природне середовище існування, надаючи пріоритет чутливим видам та їх збереженню в екосистемі.

Викладення основного матеріалу. Річка Горенка – права притока р. Ірпінь. Згідно проведеної інвентаризації водойм басейну річки Ірпінь визначено, що річка Горенка належить до масиву поверхневих вод Мала річка на низовині в силікатних породах UA_R_16_S_1_SI [28]. Водойма характеризується наступними параметрами: ширина заплави 8–12 м, довжина спрямлених ділянок 20%, довжина обвалованих ділянок – 3%. Річка Горенка у верхній та частково середній течії протікає природним руслом вздовж мішаного лісу, тоді як нижче за течією вона оточена приватними забудовами, приймає співставну за розміром притоку (р. Котурка) та включає каскад руслових ставів [3]. основні параметри середовища існування наведені у табл. 1.

В р. Горенка на досліджуваних станціях іхтіофауна розподілена не рівномірно. Загалом зареєстровано 19 видів риб з 7 родин (табл. 2). Більшість видів – представники фітофільного літофільного комплексу. Наявність ставків у середній течії сприяє розповсюдженню та натуралізації чужорідних видів, а зона екотону в гирлі річки підтримує існування найбільшої кількості раритетних видів (Резолюція 6

Бернської конвенції). Це підтверджує важливість річки як біологічного резервату для зазначених видів. Немалу роль відіграє у розповсюдженні видів структура макрофітів. Це перш за все стосується видів, що екологічно приурочені до існування в заростях занурених гідрофітів. На одній із ділянок представлені асоціації *Stuckenia pectinata* та *Potamogeton crispus*, які формують місце існування для цих видів.

Таблиця 1

Гідроекологічні показники досліджуваних станцій на р. Горенка

Показник	№ станцій				
	I	II	III	IV	V
Структура берега	крутий	похилий	крутий	крутий	крутий
Ширина, м	1,7–2,5	6–7,5	5–6	2,5–3	1,5–2
Глибина, м	0,2–0,5	0,2–0,6	0,3–0,5	0,1–0,4	0,2–0,4
Тип субстрату	пісок	пісок	Замулений пісок	пісок	пісок
Заростання, %	25	20–30	40–60	25–30	25
Температура води, °С	15,7–18,6	15,4–17,6	14,2–16,8	15,8–18,8	15,1–17,9
Вміст кисню, мг/дм ³	4,9–6,87	7,09–7,5	5,6–7,47	5,0–5,84	6,1–6,87
Мінералізація, мг/дм ³	160–180	180–260	248–252	190–200	288–290
Прозорість, м	До дна	До дна	До дна	До дна	До дна

Таблиця 2

Розподіл видів у р. Горенка на станціях дослідження

Вид	Категорія виду	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 3	Ст. 4	Ст. 5	Розмірно-масові показники I, см т, г		
							< l > _ < m >	l _{min} _ m _{min}	l _{max} _ m _{max}
<i>Squalius cephalus</i>	Л	1,1	–	1,9	–	–	–	–	–
<i>Rutilus rutilus</i>	Ф	43,6	24,2	–	1,3	–	10,5 9,2	7,0 2,9	17,5 44
<i>Scardinius erythrophthalmus</i>	Ф	1,7	–	11,4	–	–	6,1 2,7	4,0 1,0	7,3 6,6
<i>Alburnus alburnus</i>	Ф	4,5	4,7	–	–	–	9,3 5,1	8,8 4,3	10,4 6,4
<i>Leucaspis delineatus</i>	Ф	15,6	48,3	21,4	15	18,4	5,2 1,2	4,0 0,4	6,1 2,1
<i>Blicca bjoerkna</i>	Ф	0,5	0,5	–	–	–	–	–	–
<i>Abramis brama</i>	Ф	0,5	0,5	–	–	–	–	–	–
<i>Rhodeus amarus</i>	О	0,5	0,5	17,1	–	–	5,7 2,6	4,6 1,4	6,7 4,8
<i>Pseudorasbora parva</i>	I	–	0,5	4,3	1,3	–	–	–	–
<i>Gobio gobio</i>	Л	0,5	1,9	–	83,5	76,3	6,7 4,3	4,0 0,6	11,0 13,2
<i>Carassius auratus</i>	Ф	2,8	2,4	–	7,6	2,6	9,3 11,9	7,2 5,4	10,2 14,5
<i>Cobitis taenia</i>	Ф	15,1	13,7	11,4	1,3	–	8,9 4,2	7,0 1,9	11,5 10,3
<i>Misgurnus fossilis</i>	Ф	2,3	–	–	–	–	13,5 11,8	10,0 3,7	17,0 20,0
<i>Esox lucius</i>	Ф	0,5	–	–	–	–	–	–	–
<i>Gasterosteus aculeatus</i>	Н	–	–	–	1,3	–	–	–	–
<i>Percottus glenii</i>	Ф	0,5	–	–	–	–	10,8 15,9	5,8 3,0	15,8 49,3
<i>Perca fluviatilis</i>	Ф	7,3	1,4	11,4	–	2,6	–	–	–
<i>Neogobius fluviatilis</i>	Л	0,5	0,5	7,1	–	–	–	–	–
<i>Proterorhinus semilunaris</i>	Л	2,2	0,9	14,3	–	–	10,8 15,9	5,8 3,0	15,8 49,3
–	–	17	11	9	7	4	–	–	–

N, % – частка виду на досліджуваних станціях, у чисельнику довжина, у знаменнику маса досліджуваних видів риб, «–» вид відсутній. Категорії за вибором нерестового субстрату: Ф – фітофіль, Л – псамо-літофіль, І – індіферент, Н – нестінгофіль, О – остракофіль.

Зміна домінуючих комплексів у іхтіоценозі р. Горенка відбувається залежно від наявності ставків та шлюзів, які утворюють фрагменти річки. У нижній течії це плітка, щипавка та верховка. У середній течії яскраво виражене домінування видів, існування яких залежить від заростей водних рослин (краснопірка, тупоносий бичок західний, гірчак, окунь) (станція III) (рис. 1).

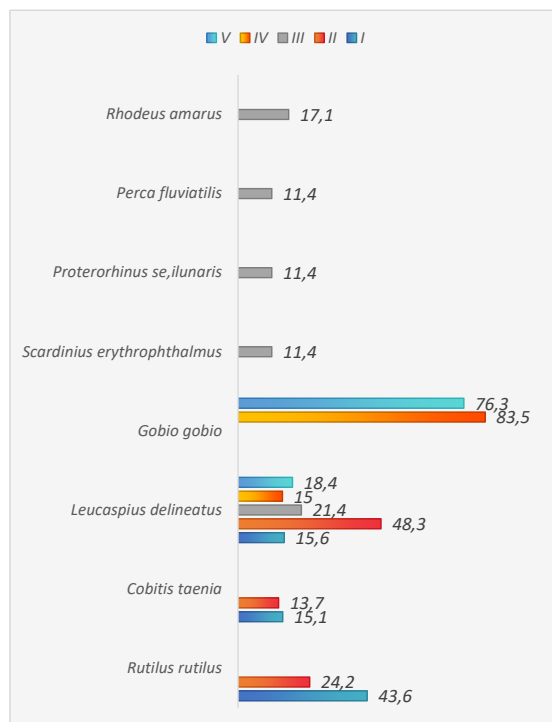


Рис. 1. Відсоток видів-домінантів на досліджуваних станціях р. Горенка

У русловому ставку, розташованому в середній течії річки Горенка, згідно з даними рибалок, мешкають такі види риб: *Cyprinus carpio*, *Silurus glanis*, *Sander lucioperca* та *Gymnocephalus cernuus*, а також інтродуковані товстолоб (вид потребує уточнення) та *Stenopharyngodon idella*. У ставку Карачун виявляли декілька особин *Micropterus dolomieu* (свідчення рибалок). Також у р. Котурка зареєстровано рідкісні види *Carassius carassius* та *Leuciscus leuciscus* [11], що не виключає їх появу в річці Горенка. У верхній течії типовими домінантами були пічкур звичайний та верховка. Верховка поширена вздовж всього русла річки, що свідчить про її адаптивні можливості в умовах фрагментації річкової системи.

Головні висновки. За результатами досліджень зареєстровано 19 видів риб. Найбільшим видовим багатством характеризувалась нижня частина (17 видів). Саме на цій ділянці виявлено найбільше раритетних видів. Нерівномірний розподіл риб у річці пов'язаний із наявністю ставків та системи шлюзів, які створюють перешкоди для міграції риб. Наявність реофільних та раритетних видів риб є свідченням того, що досліджувані ділянки на р. Горенка є біологічними резерватами для репродуктивного поповнення популяцій цих видів.

Фінансування. Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках наукового проєкту № 2022.01/0077 «Розробка технологій та заходів з ревіталізації річкових систем, що постраждали наслідок російської агресії, як складова розділу 8 Планів Управління Річковими басейнами» за договором № 89/0077 від 01.03.2024.

Література

- Halls A. S., Welcomme R. L. Dynamics of river fish populations in response to hydrological conditions: a simulation study. *River Research and Applications*. 2005. Vol. 20 (8). P. 985–1000.
- Shea C. P., Peterson J. T. An evaluation of the relative influence of habitat complexity and habitat stability on fish assemblage structure in unregulated and regulated reaches of a large southeastern warmwater stream. *Transactions of the American Fisheries Society*. 2007. Vol. 136 (4). P. 943–958.
- Романенко О.В., Арсан О.М., Кіпніс Л.С., Ситник Ю.М. Екологічні проблеми київських водойм і прилеглих територій. Київ. Наукова думка, 2015. 189 с.
- Ladyka, M., Starodubtsev, V. Reservoirs and war in Ukraine: environmental problems. *EUREKA: Life Sciences*. 2022. (6). P. 36-43.
- Afanasyev S.O. Impact of War on Hydroecosystems of Ukraine: Conclusion of the First Year of the Full-Scale Invasion of Russia (a Review). *Hydrobiol J*. 2023. 59(4). P. 3–16. doi: 10.1615/HydrobJ.v59.i4.10
- Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Гандзюра В.П., Алпатова О.М., Демчук Л.І., Хом'як І.В., Вовк В.М. Гідрохімічний статус пост-мілітарних водних екосистем с. Мошун, Київська область. *Екологічні науки*. 2023. 46 (1). С. 52–58.
- Тараріко О. Г., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л. Формування екологічно стійких агроландшафтів в умовах змін клімату. *Агроекологічний журнал*. 2013. № 4. С. 13-20.
- Verhoeven, J. T. A. Wetlands in Europe: Perspectives for restoration of a lost paradise. *Ecological Engineering*. 2014. 66. С. 6–9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.03.006>.
- Пономаренко Д.В. Структурно-функціональна цілісність екосистеми малої річки як основа її ревіталізації. *Екологічні науки*. 2023. 52 (1). С. 33–36.
- Нестеренко О. В., Шарков В.В., Журавльова О. А., Нестеров Я. С. Проблеми басейнів малих річок. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 5. С. 257–258.
- Романенко В.Д., Медовник Д.В. Видова та екологічна характеристика іхтіофауни малих річок урбанізованих територій. *Гідроб журнал*. 2017. 53 (4). С. 3–12.

12. Причепа М. В., Коваленко Ю. О., Афанасьєв С. О. Ресстрації рідкісних та внесених до Резолюції 6 Бернської конвенції видів риб басейну річки Ірпінь. Поширення раритетного біорізноманіття в Україні. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». 2024. Вип. 38. Київ, Чернівці. Друк-Арт. С. 396–401.
13. Причепа М. В., Коваленко Ю. О. Рідкісні види птахів водно-болотних та лучних угідь окремих районів Київської області. Поширення раритетного біорізноманіття в Україні. Серія: «Conservation Biology in Ukraine». 2024. Вип. 38. Київ, Чернівці. Друк-Арт. С. 361–396.
14. Бондар К.О., Волошина К.О., Місецька Н.О., Місецький А.С., Шевченко В.Г. Сучасний стан Смарагдової мережі Київщини. *Екологічні науки*. 52 (1). С. 204–217.
15. Starodubtsev V., Ladyka M., Zhofan U., Palamarchuk S., Naumovska O. Heroic defense and ecological drama in the valley of the Irpin river. *Grail of Science*. 2022. (23), 172–182.
16. Вишневецький В. І. Малі річки Києва. Наукове видання. Київ : Інтерпрес ЛТД. 2013. 84 с.
17. Abramіuk I. I., Afanasyev S. A., Gupalo Ye. A. Structural Characteristics of Ichthyoplankton of the Small Regulated River in the Kyiv Polissya. *Hydrobiological Journal*. 2018. Vol. 54, (2). P. 55–63.
18. Причепа М. В. Морфоекологічна пластичність окуневих риб за географічної ізоляції. *Науковий вісник НУБіП України. Серія Біологія, біотехнологія, екологія*. 2013. Вип. 113. С. 104–116.
19. Абрам'юк І. І. Весняний іхтіопланктон руслової частини р. Котурка. *Сучасна гідроекологія: місце наукових досліджень у вирішенні актуальних проблем* : збірник матеріалів III науково-практичної конференції для молодих вчених. (Київ. 2016). С. 7–9.
20. Абрам'юк І.І. Структура іхтіопланктону малих рівнинних річок: автореф. дис. ... канд. біол. Наук: 03.00.10. Київ, 2018. 22 с.
21. Гупало О.О. Морфобіологічна характеристика плітки річки Горенки. Мат. VII наук.-практ. конф. для молодих вчених «Біологічні дослідження – 2016»: збірник наукових праць. Житомир, 2016. С. 88–89.
22. Гупало О.О. Морфологічна мінливість та структура популяції плітки та окуня в річкових системах різного типу: автореф. дис. ... канд. біол. наук. 12.00.03 2018. 24 с.
23. Медовник Д.В. Еколого-фізіологічні особливості аборигенного та інвазивного видів риб у малих річках за різного ступеня урбанізації. *Гідробіологічний журнал*. 2019. 55 (2). С. 65–83.
24. Медовник Д.В. Еколого-фізіологічні характеристики рибного населення малих річок урбанізованих територій. Автореф. дис. ... канд. Біол. Наук. – К., 2020. – 21 с.
25. Медовник Д. В. Видовий склад іхтіофауни антропогенно трансформованої малої річки Почайна (м. Київ). *Сучасна гідроекологія: місце наукових досліджень у вирішенні актуальних проблем* : збірник матеріалів V науково-практичної конференції молодих вчених. (Київ 2018р). Київ, 2018. С. 38–40.
26. Romanenko V.D., Liashenko A.V., Afanasyev S.A., Zorina-Sakharova Y.Y. Biological indication of ecological status of the water bodies within Kiev city boundaries. *Hydrobiological Journal*. 2010. 46 (4). P. 3–24.
27. Мовчан Ю.В. Риби України (визначник довідник). Київ. 2011. 420 с.
28. Іванова Н.О., Дубняк С.С., Зоріна-Сахарова К.Є., Летицька О.М., Незбрицька І.М., Погорелова М.С., Причепа М.В., Афанасьєв С.О. Гідролого-морфологічна характеристика водних об'єктів басейну р. Ірпінь з урахуванням впливу воєнних дій. *Гідробіологічний журнал*. 2024. 60 (4). С. 85–107.

TILIA CORDATA MILL. В ПАРКОВИХ НАСАДЖЕННЯХ ПРОМИСЛОВИХ МІСТ СТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

Суслова О.П.

Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України
вул. Маршака, 50, 50089, м. Кривий Ріг
elenasuslova2901@gmail.com

В статті наведено результати дослідження *Tilia cordata* Mill. в паркових насадженнях промислових міст Покровська, Слов'янська, Новгородівки, які розташовані в північній частині Лівобережного Степу України. Визначено вік дерев, морфометричні показники стовбурів, класи бонітету деревостанів, патологічні зміни крон та стовбурів, життєвий стан дерев, розраховано відносний життєвий стан насаджень. Встановлено, що представленість *Tilia cordata* в досліджуваних міських парках степової зони України коливається від 0,5% до 8%. В насадженнях зустрічаються рослини віком від 20 до 60 років, серед яких переважають середньовікові 20–40-річні дерева. Середня висота стовбура 20-річних дерев становить 7,0–8,3 м, 60-річних – 14,0–15,4 м. Значення середнього діаметра стовбура 20-річних дерев коливається від 17,0 см до 18,5 см залежно від місцезростання. Дереву віком 60 років досягають значення показника 37,7–38,5 см. За розрахованим показником відносної висоти встановлено, що в досліджуваних парках різновікові насадження *Tilia cordata* розріджені з низькою щільністю, дерева мають більш товсті стовбури по відношенню до їхньої висоти та серед них відсутня конкуренція за сонячне світло. Визначено, що в насадженнях найпоширеніші дерева невисоких класів бонітету (II та III). До II класу віднесено 20-річні дерева *Tilia cordata* Покровського і Слов'янського парків та 30-річні – Новгородівського. До III класу віднесено більшість дерев досліджуваних парків віком від 30 до 60 років. В паркових насадженнях зустрічаються дерева з патологічними змінами стовбурів і крон, частка яких коливається від 8,6% до 13,1%. Серед визначених пошкоджень найчастіше зустрічаються морозобіни і тріщини, які розподіляються в такий спосіб: 2,9% – в Слов'янському, 3% – в Покровському та 3,1% – в Новгородівському парках. Визначено, що відносний життєвий стан насаджень *Tilia cordata* в парках Покровська і Слов'янська дорівнює 87,7 та 83,9 умовним балам, що характеризує насадження як «здорові». Насадження *Tilia cordata* в парку м. Новгородівка відповідають категорії «ослаблені» (відносний життєвий стан становить 69,0). **Ключові слова:** *Tilia cordata* Mill., морфометричні показники, клас бонітету, патологічні зміни, відносний життєвий стан.

Tilia cordata Mill. in park plantations of industrial cities of the steppe zone of Ukraine. Suslova O.

The article presents the results of the study of *Tilia cordata* Mill. in the park plantations of the industrial cities of Pokrovsk, Sloviansk, Novogradivka, located in the northern part of the Left-Bank Steppe of Ukraine. The age of trees, morphometric parameters of trunks, classes of stand bonitet, pathological changes in crowns and trunks, vital state of trees, and relative vital state of plantations were determined. It was found that the representation of *Tilia cordata* in the studied urban parks of the steppe zone of Ukraine ranges from 0.5% to 8%. Plants aged from 20 to 60 years are found in the plantations, with the predominance of medieval 20–40-year-old trees. The average trunk height of 20-year-old trees is 7.0–8.3 m, and that of 60-year-old trees is 14.0–15.4 m. The average trunk diameter of 20-year-old trees ranges from 17.0 cm to 18.5 cm, depending on the habitat. Trees aged 60 years reach a value of 37.7–38.5 cm. According to the calculated relative height index, it was found that in the studied parks, *Tilia cordata* stands of different ages are sparse with low density, trees have thicker trunks in relation to their height and there is no competition for sunlight among them. It has been determined that the most common trees in the plantations are those of low bonitet classes (II and III). Class II includes 20-year-old *Tilia cordata* trees of Pokrovskiyi and Slovianskiyi parks and 30-year-old trees of Novogradivskiyi park. The majority of trees in the studied parks aged from 30 to 60 years are classified as class III. There are trees with pathological changes in trunks and crowns in the park plantations, the share of which ranges from 8.6% to 13.1%. Among the identified damages, the most common are frost holes and cracks, which are distributed as follows: 2.9% in Slovianskiyi, 3% in Pokrovskiyi and 3.1% in Novogradivskiyi parks. It was determined that the relative vital status of *Tilia cordata* plantations in Pokrovsk and Sloviansk parks is 87.7 and 83.9 conventional points, which characterises the plantations as 'healthy'. The plantations of *Tilia cordata* in the park of Novogradivka correspond to the category of 'weakened' (relative vital status is 69.0). **Key words:** *Tilia cordata* Mill., morphometric parameters, class of bonitet, pathological changes, relative vital status.

Постановка проблеми. Сучасний процес урбанізації, кліматичні зміни (високі температуру влітку, посухи, пізньовесняні заморозки, надзвичайна сухість повітря і ґрунтів), фактори урбогенного походження (будівельні матеріали та штучні поверхні; конфігурація будівель і вулиць; штучні джерела тепла; механічне видалення дощових вод і снігу; забруднення атмосферного повітря) створюють умови для значного пришвидшення і передчасного старіння міських зелених насаджень [10]. Зазначені різнопланові чинники спричиняють зниження жит-

тєвості та декоративних якостей деревних рослин і, як наслідок, можуть призвести до збіднення біорізноманіття та погіршення якості міського середовища. Дереву відіграють важливу роль у формуванні стійких міських ландшафтів, тому їх втрата може мати негативні наслідки як для екології населених пунктів, так і для соціальної сфери. За таких обставин визначення сучасного стану деревних рослин в міських насадженнях дозволить розробити заходи щодо раціонального утримання, збереження видів та підтримки їх ролі в урбосистемах.

Актуальність дослідження. Деревні насадження, як компоненти

урбосистем, виконують низку функцій, що покращують якість життя населення. Однак, комплекс умов, в яких зростають деревні рослини, часто не відповідає їх біологічним і екологічним вимогам, що призводить до зниження їх життєвого стану та функціонування [1–3; 7; 9; 11; 16]. Моніторинг і аналіз екологічного стану видів деревних рослин в певних умовах зростання дозволить розробити наукові заходи щодо збереження біорізноманіття, визначити стратегію адаптації рослин до кліматичних змін і використовувати дендрологічні ресурси з максимальною ефективністю.

Наразі в умовах посушливого Степу негативний вплив абіотичних, біотичних та антропогенних чинників призвели до активізації процесів ослаблення та усихання деревостанів, тому визначення загального сучасного стану видів деревних рослин в урбанізованому середовищі є однією з важливих передумов успішного вирішення комплексу питань, пов'язаних з формуванням міського ландшафту і поліпшення його еколого-естетичної цінності. Виходячи з цього, дослідження життєвого стану дерев та прогнозування довговічності деревних насаджень в умовах Степу залишаються актуальними.

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 урбоєкосистем Правобережного степового Придніпров'я у зв'язку з глобальними кліматичними змінами», державний номер реєстрації 0117U00082883.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Внаслідок негативного впливу різноманітних антропогенних, абіотичних і біотичних чинників на зелені насадження, види деревних рослин слабшають і стають уразливими до пошкодження шкідниками та інфікування збудниками хвороб, втрачають декоративність і, як наслідок, погіршується їхній життєвий стан [6; 18; 19]. Багаторічний досвід створення міських насаджень свідчить, що *Tilia cordata* Mill. є одним з найвитриваліших видів в умовах урбосистем [12; 13]. Питанням визначення життєвого стану *Tilia cordata* в міських насадженнях присвячено багато наукових робіт. Проаналізовано вплив певних природно-екологічних умов Лісостепової зони України та антропогенних факторів на життєвий стан *Tilia cordata* у вуличних і паркових насадженнях в м. Харків [8]. З'ясовано ступінь пошкодження *Tilia cordata* хворобами і шкідниками залежно від умов місцезростання та урбогенного навантаження в міських насадженнях Львова, розташованого в Лісовій зоні України. Визначено, що вид не стійкий

до уражень, однак, фітосанітарний стан насаджень вулиць, парків і скверів міста за його участі оцінено як задовільний [6]. Досліджено стан *Tilia cordata* в умовах Степової зони України. За певних умов Правобережного степового Придніпров'я проаналізовано таксаційні показники стовбурів дерев виду на територіях обмеженого користування м. Кривий Ріг та визначено їхній життєвий стан в насадженнях [16]. Висвітлено результати дослідження окремих морфометричних показників *Tilia cordata* в умовах вуличних насаджень м. Дніпро і серед них виділено найчутливіші до техногенного забруднення (кількість листків на річному пагоні, скорочення площі листків) та встановлено життєвий стан дерев виду [4]. Проведено дослідження фітосанітарного стану насаджень зазначеного виду в м. Херсон, розташованого в південній частині Степової зони України і зроблено висновок, що життєвий стан *Tilia cordata* та її декоративність значно знижуються через вразливість виду до дії фітопатогенів та шкідників [5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значний науковий доробок щодо визначення сучасного стану видів деревних рослин в міських насадженнях північної частини Лівобережного Степу України [9; 14; 15], дані щодо комплексного дослідження *Tilia cordata* в промислових містах зазначеної зони відсутні. Виходячи з цього, наша робота має на меті визначення сучасного життєвого стану різновікових дерев виду за умов зростання їх в міських

паркових насадженнях.

Наукова новизна. Представлені матеріали ґрунтуються на результатах власних спостережень. Вперше для екологічних умов північної частини Лівобережного Степу України визначено життєвий стан різновікових дерев *Tilia cordata* в складі паркових насаджень промислових міст.

Матеріали та методи досліджень. Об'єктом досліджень були дерева *Tilia cordata* в паркових насадженнях Покровська, Слов'янська, Новогродівки, розташованих в промисловому регіоні північної частини Лівобережного Степу України. Обстежено 421 дерево, серед яких 71 дерево зростає в міському парку Покровська, 180 – Слов'янська, 170 – Новогродівки. Визначали вік рослин, їхню кількість, класи бонітету, таксаційні показники стовбурів (висоту, діаметр) та життєвий стан насаджень. Вік дерев визначали згідно обліковим записам міських комунальних підприємств зеленого будівництва, а також візуально відповідно до загального стану рослин та умов зростання. Висоту стовбура визначали за допомогою маятникового висотоміра Макарова (ВМ) (з точністю 0,5 м). Для вимірювання діаметра стовбура (з точністю до 0,5 см) на висоті 1,3 м використовували мірну вилку. Відносну висоту дерев розраховували як співвідношення висоти до діаметра стовбура (см/см). Життєвий стан оціню-

вали за шкалою В. А. Алексєєва, де один бал відповідає здоровим деревам, які не мають зовнішніх пошкоджень крони і стовбура; 2 – пошкодженим (ослабленим), у яких відмічено зниження облиствлення на 30%, наявність до 30% засохлих гілок та пошкодженого листя; 3 – сильно пошкодженим (сильно ослабленим) з наявністю тих же ознак до 60% та відмиранням верхівки крони; 4 – відмираючим деревам, для яких характерна зруйнована крона, густина якої менше 15–20%, понад 70% гілок, в тому числі верхньої половини сухі або всихають [1]. На основі визначених категорій життєвого стану деревних рослин розраховували індекси життєвого стану насаджень за формулою В.А. Алексєєва [1]:

$$L_n = 100 \times n_1 + 70 \times n_2 + 40 \times n_3 + 5 \times n_4 / N,$$

де L_n – відносний життєвий стан деревостану, розрахований за кількістю дерев, n_1 – кількість абсолютно здорових, n_2 – помірно ослаблених, n_3 – сильно ослаблених, n_4 – відмираючих дерев; N – загальна кількість дерев разом із сухостоєм. При значеннях показника L_n 80–100 стан деревостану може бути оцінений як здоровий, непошкоджений; в межах 50–79 вважається ослаблений; 20–49 – сильно ослаблений; при 19 і нижче – майже зруйнований. Бонітет визначали, враховуючи вік та середню висоту дерев певного віку за бонітетною шкалою, розробленою М. М. Орловим [17]. Статистичну обробку отриманих результатів проводили за допомогою програми Excel.

Викладення основного матеріалу. *Tilia cordata* Mill. популярна в озелененні населених пунктів степової зони України завдяки стійкості до забрудненого середовища, невибагливості до родючості ґрунтів, вітро-, посухо- і зимостійкості та високим декоративним якостям: щільністю добре розвиненої крони, яскравістю осіннього забарвлення листя, насиченому приємному аромату під час цвітіння.

Представленість виду в досліджуваних міських парках становить 0,5% – в Покровському, 4% – в Новгородівському, 8% – в Слов'янському. В насадженнях зустрічаються дерева віком від 20 до 60 років. В Покровському і Слов'янському парках переважають дерева вікової групи від 21 до 30 років (56% і 53% відповідно), в Новгородівському – віком 31–40 років (39,4%) (рис. 1). Найменша частка рослин в досліджуваних насадженнях представлена деревами віком 51–60 років, які розподіляються в такий спосіб: по 2% в Покровському і Новгородівському парках, 3% – в Слов'янському.

Для визначення стану *Tilia cordata* в насадженнях досліджуваних парків проаналізовано морфометричні показники стовбурів дерев віком від 20 до 60 років. Середні значення висоти стовбура розподіляються в такий спосіб: 7,0–8,3 м у 20-річних дерев, 14,0–15,4 м – у найстаріших віком 60 років (табл. 1). Значення середнього діаметра стовбура 20-річних дерев коливається від 17,0 см в насадженнях парку Покровська до 18,5 см – Слов'янська. Дерева віком 60.

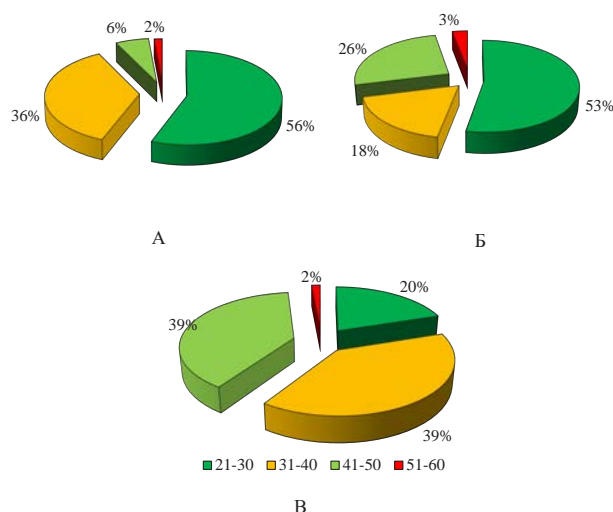


Рис. 1. Розподіл дерев *Tilia cordata* Mill. за віковими групами в паркових насадженнях промислових міст степової зони України: А – м. Покровськ, Б – м. Слов'янськ, В – м. Новгородівка

років досягають значення показника від 37,7 см – в парку Слов'янська до 38,5 см – в парках Покровська та Новгородівки. При порівнянні даних, отриманих в досліджуваних паркових насадженнях встановлено, що різниця в значеннях середньої висоти та діаметра стовбура за умов зростання дерев в різних міських умовах статистично не достовірна, оскільки $t_{\text{емп}}$ в усіх випадках не перевищує табличний (2,1) при рівні значущості $p=0,05$. Це свідчить про однорідність природно-екологічних умов і антропогенної завантаженості на рослини в паркових насадженнях трьох промислових міст.

За отриманими даними розраховано відносну висоту дерев з врахуванням їхнього віку. Показник відрізняється залежно від віку дерев та їхнього місцезростання (див. табл. 1). Так, найменшу відносну висоту 40-річних дерев *Tilia cordata* визначено в насадженнях Слов'янського парку, яка становить 36,0 см/см; максимального значення показник набуває в Покровському – 47,9 см/см. Незважаючи на різноманітність отриманих значень показника, всі вони характеризують різновікові насадження *Tilia cordata* в трьох досліджуваних парках як розріджені з низькою щільністю, дерева мають більш товсті стовпи по відношенню до їхньої висоти та серед них відсутня конкуренція за сонячне світло.

Для визначення відповідності умов зростання вимогам рослин враховували бонітет дерев віком з інтервалом у 10 років (див. табл. 1). За отриманими результатами лише 20-річні дерева Новгородівського парку відповідають високому класу бонітету (I). Найпоширеніші в трьох досліджуваних насадженнях дерева невисоких класів бонітету (II та III). До II класу віднесено 20-річні дерева *Tilia cordata* Покровського і Слов'янського парків та 30-річні – Новгородівського. До III класу віднесено більшість

Таблиця 1
Морфометричні показники стовбурів *Tilia cordata* Mill. в паркових насадженнях промислових міст північної частини Лівобережного Степу України

Вік, роки	Висота, м	Діаметр стовбура, см	Бонітет, клас	Відносна висота, см/см
	M ± m			
м. Покровськ				
20	7,5 ± 1,06	17,0 ± 2,04	II	44,1
30	9,0 ± 1,17	21,8 ± 1,25	III	41,3
40	12,4 ± 2,85	25,9 ± 3,17	III	47,9
50	14,0 ± 1,63	30,1 ± 2,88	III	46,5
60	15,4 ± 2,30	38,5 ± 7,42	III	40,0
м. Слов'янськ				
20	7,0 ± 0,52	18,5 ± 1,32	II	37,8
30	8,6 ± 1,27	21,0 ± 3,50	III	41,0
40	10,3 ± 1,44	28,6 ± 2,61	III	36,0
50	13,7 ± 1,79	33,1 ± 4,07	III	41,2
60	14,6 ± 2,03	37,7 ± 3,92	III	38,7
м. Новогродівка				
20	8,3 ± 1,54	18,0 ± 2,04	I	46,1
30	10,5 ± 3,02	25,7 ± 4,28	II	40,9
40	12,0 ± 2,91	31,6 ± 5,43	III	38,0
50	13,3 ± 1,98	35,1 ± 3,17	III	37,9
60	14,0 ± 3,10	38,5 ± 2,86	III	36,7

дерев трьох паркових насаджень віком від 30 до 60 років. Отже, зі збільшенням віку рослин клас бонітету насаджень *Tilia cordata* в міських парках степової зони України знижується.

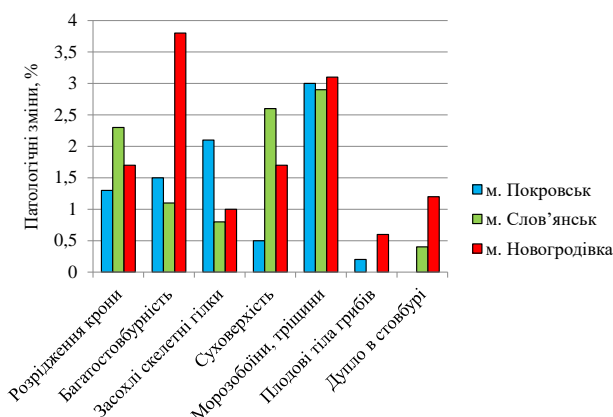


Рис. 2. Патологічні зміни крон і стовбурів *Tilia cordata* Mill. в паркових насадженнях промислових міст північної частини Лівобережного Степу України (%)

Дослідження патологічних змін форми крон та стовбурів дерев відіграють ключову роль в загальній оцінці життєвого стану дерев, оскільки вони впливають на стійкість рослин і, як наслідок, на довговічність насаджень. В паркових насадженнях визначено дерева з різноманітними пошкодженнями та ураженнями, серед яких розрідження крони, багатостовбурність, засохлі скелетні гілки, суховерхість, морозобоїни і тріщини, плодові тіла грибів та дупла в стовбурах (рис. 2). Найбільшу кількість пошкоджених дерев *Tilia cordata* виявлено в міському парку Новогродівки – 13,1% від всіх досліджуваних дерев виду, найменшу – в парковому насадженні Покровська – 8,6%. Серед визначених пошкоджень в досліджуваних парках найчастіше зустрічаються морозобоїни і тріщини, які розподіляються в такий

Таблиця 2
Розподіл дерев *Tilia cordata* Mill. за віком та життєвим станом в паркових насадженнях промислових міст північної частини Лівобережного Степу України (%)

Життєвий стан	Вікові групи дерев, роки				Разом (%)	Відносний життєвий стан
	21–30	31–40	41–50	51–60		
м. Покровськ						
здорові	38,0	14,0	6,0	1,5	59,5	87,7
ослаблені	18,0	22,5	0	0	40,5	
Разом, %	56,0	36,5	6,0	1,5	100,00	
м. Слов'янськ						
здорові	48,0	6,1	6,4	2,0	62,5	83,9
ослаблені	4,5	9,5	8,2	1,0	23,2	
сильно ослаблені	0	1,4	10,0	0	11,4	
відмираючі	0,5	1,0	1,4	0	2,9	
Разом, %	53,0	18,0	26,0	3,0	100,00	
м. Новогродівка						
здорові	12,0	17,0	10,5	0	39,5	69,0
ослаблені	8,0	9,4	15,0	0	32,4	
сильно ослаблені	0	10,0	4,6	1,0	15,6	
відмираючі	0	3,0	9,0	0,5	12,5	
Разом, %	20,0	39,4	39,1	1,5	100,00	

спосіб: 2,9% – в Слов'янському, 3% – в Покровському та 3,1% – в Новогродівському. На досліджуваних деревах в парку Покровська відсутні дупла в стовбурах, в Слов'янському – плодові тіла грибів. Крім того, окремі дерева можуть бути водночас пошкоджені механічно, мати суховерхість, дупла, а рослини з сухими гілками переважно уражені патогенними грибами.

Для найбільш ефективного виконання деревами своїх функцій важливим є їхній життєвий стан. Сучасна напружена екологічна ситуація в промислових містах послаблює деревні рослини і призводить до втрачання ними декоративності й життєздатності задовго до досягнення граничної межі їхнього існування [9]. В паркових насадженнях за умов промислових міст Степу України серед дерев *Tilia cordata* найпоширенішими за життєвим станом виявились здорові рослини, частка яких становить 62,5% – в Слов'янському, 59,5% – в Покровському і 39,5% – в Новогродівському парках (табл. 2). Також в насадженнях присутня значна частка ослаблених дерев, що розподіляються в такий спосіб: 40,5% – в Покровському, 32,4% – в Новогродівському і 23,2% – в Слов'янському парках. В парку Покровська відсутні сильно ослаблені та відмираючі дерева в усіх вікових групах, що може свідчити про своєчасне видалення з насаджень таких рослин та проведення планових санітарних рубок, часткової чистки всихаючих рослин і гілок. В досліджуваних парках зростають сильно ослаблені дерева, найбільшу кількість яких визначено серед дерев віком 41–50 років в Слов'янському (10%) та Новогродівському (9%). Відмираючі дерева зустрічаються серед дерев, починаючи з 30-річного віку, частка їх становить загалом для всіх вікових груп 2,9% – в Слов'янському та 12,5% – в Новогродівському парках. Слід зазначити, що незважаючи на присутність в насадженнях ослаблених та відмираючих дерев, розрахований індекс відносного життєвого стану *Tilia cordata* в парках Покровська і Слов'янська високий і становить 87,7 та 83,9 умовних балів та характеризує насадження як

«здорові». Відносний життєвий стан *Tilia cordata* у 69,0 умовних балів в парку м. Новогродівка дає підставу віднести насадження до категорії «ослаблені».

Головні висновки:

1. Представленість *Tilia cordata* в досліджуваних міських парках степової зони України коливається від 0,5% до 8%. В насадженнях зустрічаються рослини віком від 20 до 60 років, серед яких переважають середньовікові 20–40-річні дерева.

2. Середня висота стовбура 20-річних дерев становить 7,0–8,3 м, 60-річних – 14,0–15,4 м. Значення середнього діаметра стовбура 20-річних дерев коливається від 17,0 см до 18,5 см залежно від місцезростання. Дерева віком 60 років досягають значення показника 37,7–38,5 см. За розрахованим показником відносної висоти встановлено, що в трьох досліджуваних парках різновікові насадження *Tilia cordata* розріджені з низькою щільністю, дерева мають більш товсті стовпи по відношенню до їхньої висоти та серед них відсутня конкуренція за сонячне світло.

3. Визначено, що в паркових насадженнях найпоширеніші дерева невисоких класів бонітету (II та III). До II класу віднесено 20-річні дерева *Tilia cordata* Покровського і Слов'янського парків та 30-річні – Новогродівського. До III класу віднесено більшість дерев досліджуваних парків віком від 30 до 60 років.

4. В паркових насадженнях визначено дерева з патологічними змінами стовбурів і крон, частка яких коливається від 8,6% до 13,1%. Серед визначених пошкоджень найчастіше зустрічаються морозобоїни і тріщини, які розподіляються в такий спосіб: 2,9% – в Слов'янському, 3% – в Покровському та 3,1% – в Новогродівському парках.

5. Визначено, що відносний життєвий стан насаджень *Tilia cordata* в парках Покровська і Слов'янська дорівнює 87,7 та 83,9 умовним балам, що характеризує насадження як «здорові». Насадження *Tilia cordata* в парку м. Новогродівка відповідають категорії «ослаблені» (відносний життєвий стан становить 69,0).

Література

1. Бессонова В. П., Іванченко О. Є. Оцінка видового різноманіття та життєвого стану придорожніх насаджень проспекту С. Нігояна м. Дніпро. *Питання біоіндикації та екології*. 2019. Вип. 24(1). С. 36–56.
2. Бессонова В. П., Іванченко О. Є. Видове різноманіття та життєвий стан деревних рослин у насадженнях проспекту Івана Мазепи м. Дніпро. *Питання біоіндикації та екології*. 2019. Вип. 24(2). С. 101–125.
3. Бессонова В. П., Пономарьова О. А., Іванченко О. Є. Видове різноманіття та життєвий стан деревних насаджень вздовж автотраси південного напрямку м. Дніпропетровськ. *Питання біоіндикації та екології*. 2014. Вип. 19(2). С. 64–84.
4. Бессонова В. П., Чонгова А. С. Морфометричні показники деревних рослин в індикації забруднення довкілля. *Екологічні науки*. 2023. 1(46). С. 102–108. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.18>
5. Бойко Т. О. Фітосанітарний стан зелених насаджень міста Херсон. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2020. 30(4). С. 67–72. <https://doi.org/10.36930/40300412>
6. Карпін Н. І. Фітопатогени та шкідники видів роду *Tilia* L. в умовах міста Львова. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. 26(4). С. 76–82. <https://doi.org/10.15421/40260412>
7. Кияк В. Г. Життєвість (віталітет) як інтегральний показник стану популяції рослин. *Біологічні студії*. 2014. 8(3–4). С. 273–284.
8. Коленкіна М. С. Стан липи дрібнолистої (*Tilia cordata* Mill.) в зелених насадженнях міста Харков (за даними весняного обстеження). *Науковий вісник НЛТУ України*. 2020. 30(5). С. 25–30. <https://doi.org/10.36930/40300504>

9. Коршиков І. І., Суслowa О. П., Петрушкевич Ю. М. Деревні рослини в умовах промислових міст Степу. Одеса: Гельветика. 2020. 456 с.
10. Курницька М. П. Екологічні аспекти зростання деревних рослин в урбанізованому середовищі. *Науковий вісник НЛТУ*. 2011. 21(7). С. 55–58.
11. Кучерявий В. П. Урбоекологія. Львів: Світ, 1999. 360 с.
12. Олексійченко Н. О., Совакова М. О., Соваков О. В., Китаєв О. І., Слюсар С. І. Види роду *Tilia* L. в насадженнях м. Києва. Київ: ТСП КОМПРЕНТ, 2013. 246 с.
13. Сильчук О. І., Чумак П. Я., Вигера С. М., Ковальчук В. П., Лісовий М. М., Дмитрієва О. Є. Липа серцелиста (*Tilia cordata* Mill.) і її інвазійний фітофаг міль-строкатка (*Phyllonorycter issikii* Kumata). *Агроекологічний журнал*. 2016. № 2. С. 134–138.
14. Суслowa О. П. Сучасний стан деревних паркових насаджень м. Слов'янськ. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. 28(5). С. 57–60. <https://doi.org/10.15421/40280512>
15. Суслowa О. П. Паркові насадження м. Покровськ: видове різноманіття та репрезентативність видів. *Рослини та урбанізація. Матеріали VIII міжнародної науково-практичної конференції*. 2019. С. 125–127.
16. Чипиляк Т. Ф., Лещенюк О. М. Оцінка життєвого стану деревних рослин у насадженнях обмеженого користування м. Кривий Ріг. *Природозаповідна справа та захист лісу. Серія «Лісівництво та декоративне садівництво»*. 2017. № 278. С. 105–113.
17. Яловенко А. С. Життєвий стан деревних насаджень парку ім. Т. Г. Шевченка м. Запоріжжя. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. 2011. 19(1). С. 143–149.
18. Khavaninzadeh A. R., Veroustraete F., Buytaert J. A. N., Samson R. Leaf injury symptoms of *Tilia* sp. as an indicator of urban habitat quality. *Ecological indicators*. 2014. № 41. P. 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.01.014>
19. Vainio E. J., Velmala S. M., Salo P., Huhtinen S., Müller, M. M. Defoliation of *Tilia cordata* trees associated with *Apiognomonina errabunda* infection in Finland. *Silva Fennica*. 2017. 51(4), 7749. <https://doi.org/10.14214/sf.7749>

РОЗРОБКА СИСТЕМОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА «ЗБЕРІГАННЯ РІДИННИХ ВІДХОДІВ – ДОВКІЛЛЯ» З КОНТРОЛЮ РІВНЯ БЕЗПЕКИ

Козуля Т.В., Сакун А.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

tatiana.kozulia@khp.edu.ua, antonina.sakun@khp.edu.ua

На сьогодні проблемними залишаються питання щодо ситуації зберігання хімічних рідинних відходів стосовно їх трансформації у часі в накопичувачах, невизначеності щодо їх поведінки в середовищах довкілля. Тому важливим є контроль ситуації на територіях зберігання очищених стоків виробництва. За відсутності постійного моніторингу запропоновано запровадити систему спостереження на основі моделювання системного об'єкта дослідження «стан рідинних відходів – процеси очищення рідинних відходів – фактори небезпеки – екосистеми довкілля». Встановлення особливостей змін у екологічному стані територій, прилеглих до місць накопичення очищених стоків виробництва, відбувається безперервно завдяки комп'ютерному моделюванню ситуації у вигляді графічної когнітивної моделі. Це дозволить уникнути екологічних ризиків для природно-техногенних територій при наявності оперативної інформації прогнозування поведінки негативних факторів впливу на довкілля та встановлення чинників подолання негативних наслідків їх дії.

Метою роботи є розробка комплексного рішення екологічної задачі контролю рівня безпеки на території зберігання хімічних рідинних відходів завдяки впровадженню в моніторингову систему модельного експерименту ситуації «стан рідинних відходів – екосистеми довкілля». Для досягнення поставленої мети в роботі використано комплексне поєднання теоретичних засад системології дослідження та когнітивне моделювання. Надані модельні описи ситуації враховують не тільки контрольовані системи, але й процеси зміни в їх стані, вважаючи об'єктом контролю складну систему виду «відходи → процеси взаємодії надходжень зі складовими екосистем → стан екосистем». Використано інформаційно-програмне забезпечення для реалізації модельних процесів аналітичних і прогнозних оцінок статички і динаміки взаємодії систем накопичення стоків та екосистем.

Отримані практичні результати реалізації пропозиції на прикладі моделювання та прогнозування станів рідинних відходів коксохімічного підприємства (КХП) фенольного заводу м. Торецьк за проектом науково-виробничого підприємства (НВП) «Інкор і Ко». *Ключові слова:* екологічна небезпека, хімічні рідинні відходи, системологія дослідження, графічні моделі, когнітивна карта, трансформація, інформаційно-програмне забезпечення.

Systemological model “liquid waste storage – environment” development for safety level control. Kozulia T., Sakun A.

Today liquid chemical waste storing still deals with problems while there are transformations in accumulator tanks and uncertain behaviour in the environment. So situation monitoring is very important at storage territories of industrial liquid wastes. Because of continuous monitoring absence we propose to implement monitoring system based on modelling of system research object «liquid waste state – liquid waste purification process – danger factors – environment ecosystems». The graphical cognitive model computationally models the situation in places close to industrial liquid waste accumulation and continuously identifies traits of territories ecological state changes. This allows to avoid ecological risks for natural-anthropogenic territories with available rapid forecasting information of negative environment influence factors behaviour and to determine forces to overcome negative consequences.

The aim is development of ecological problem complex solution for chemical liquid waste storage territory safety level control through implementing situation modelling experiment «liquid waste state–environment ecosystems» into monitoring system. The paper fully merges theoretical systemology research basis and cognitive modelling to achieve its aim. The given situation model descriptions account both controlled systems and their state change processes for controlled object of complicated system «wastes → ecosystem components and intake interaction processes → ecosystem state». Information software was used to implement model processes of analytical and forecast estimates of liquid waste and ecosystem interaction statics and dynamics.

Obtained practical results were proposed for implementation based on modelling and forecasting liquid waste state from by-product coke plant of phenol plant in Toretsk according to scientific production establishment «Incor and Co». *Key words:* ecological danger, chemical liquid waste, systemology research, graphical model, cognitive map, transformation, information software.

Постановка проблеми. Недотримання вимог екологічної безпеки у сфері виробництва пов'язано з застосуванням адміністративної та кримінальної відповідальності до суб'єктів господарської діяльності, які не забезпечують знешкодження відходів, що утворюються в результаті його діяльності. Науково-виробниче об'єднання ТОВ «Інкор та Ко» КХП «Фенольний

завод» – підприємство хімічної галузі, яке переробляло побічні продукти коксування кам'яного вугілля. Завод займався фенольною та нафталіновою сировиною, входив до «Метінвесту» і продавав 60% продукції на експорт. Остання юридична назва цього підприємства – ТОВ «НВО «Інкор та Ко» за даними Єдиного державного реєстру юридичних осіб, ФОП та громад-

ських формувань, з 1 грудня 2020 року ліквідована в результаті реорганізації; її правонаступник – ПрАТ «Авдіївський коксохімічний завод». Зараз у прифронтовому Торецьку промислові відстійники з мільйоном тонн відходів перебувають за декілька кілометрів від лінії розмежування [1, 2]. Шламовідстійники фенольного заводу 4-го класу небезпеки із 400 тисячами тонн карбонатної пульпи побудовані за технологією захисту ізолюючими матеріалами, щоб токсичні відходи не просочувалися в ґрунт. Упродовж 2014–2017 років тут були активні бойові дії, сюди прилітали снаряди та міни. Зафіксовано попадання у греблі цих відстійників. Дамби екстрено ремонтували. З того часу ніхто не перевіряв герметичність ізоляційного шару на дні та укосах шламовідстійників, моніторинг територій відсутній [2].

Актуальність дослідження. Для утилізації рідинних токсичних відходів за допомогою переробки, потрібно комплексне дослідження балансу всіх компонентів, що наповнюють конкретний шламовідстійник. Системного та всебічного вивчення стану довкілля на прифронтових територіях немає. У такому разі набувають актуальності системні підходи прийняття рішень, пов'язаних з теорією моделювання, інформації і методами прогнозування. Пропонується при вирішенні завдань екобезпеки у ситуації невизначеності, відсутності постійної інформованості щодо стану небезпечних об'єктів застосувати теоретичні засади системології досліджень і когнітивного підходу вивчення складноструктурованих об'єктів. Таким чином, визначення ризик-факторів відбувається відповідно до системного уявлення виду «об'єкт (система) – навколишнє природне середовище (НПС)» [3–5].

У межах системології ураховується комплексний характер дослідження завдяки взаємній узгодженості структури та субстанції системи при її взаємодії із середовищем. Будову моделі об'єкта «система – навколишнє середовище» визначають як кооперацію систем станів і процесів на основі системного аналізу й синтезу або навпаки – системний аналіз і синтез на основі моделювання шляхом конструювання складних об'єктів, що пов'язано з детермінованим конкретним цільовим призначенням об'єкта дослідження або цільовим завданням із очікуваними результатами. Отже, інтерпретована в термінах конкретної науки системологія дозволяє розгляд об'єкта дослідження при моделюванні з різних позицій без втрати його цілісної й сутнісної змістовності як в статичній, так і динамічній щодо процесів. При відсутності моніторингової інформації це дозволить отримати зв'язок фіксованих явищ з цілісним уявленням про ситуацію.

Для комплексного вирішення питань поведінки з рідинними відходами пропонується використати графічне моделювання когнітивного підходу, що дозволяє навіть за невизначеністю вхідних даних мати відповіді щодо стану системи, її розвиток і прогноз стосовно факторів змін системи [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналітичний огляд стану поведінки з хімічними рідинними відходами на даний час показав, що переважачим напрямом досліджень, прийнятих рішень є безпосереднє звернення до системи самих відходів і можливості зниження їх токсичності без порушення питань поведінки їх в екосистемах при надходженні в певні середовища, дії на певні складові довкілля за часом [7–10].

Зроблено висновок, що завдяки математичній теорії систем долається фрагментарність знань про об'єкт дослідження, а його поведінка контролюється зовнішніми та внутрішніми процесами та сприяє пошуку нових шляхів вирішення наукових і практичних завдань. Системологічний підхід визначається застосуванням знань міждисциплінарного змісту, що сприяє розв'язанню складних екологічних задач на рівні «стан – процес» [11–14].

Комплексне рішення завдань при дослідженні системних об'єктів виду «система дослідна – навколишнє середовище» загалом визначається при імітаційному моделюванні з застосуванням графічних моделей. Присутність невизначеності в інформаційному забезпеченні долається за рахунок використання когнітивного підходу [15–19].

Метою роботи є удосконалення контролю та управління безпекою процесів утилізації і зберігання рідинних відходів на прикладі виробництва коксохімічної продукції на основі комплексного поєднання системологічного моделювання складних об'єктів і когнітивного підходу розв'язку задач в умовах складноструктурованої ситуації. У роботі досліджені такі задачі:

- 1) аналіз існуючого проектного рішення з утилізації рідинних відходів коксохімічного виробництва, оцінка відповідності поведінки з очищеними стоками вимогам екологічної безпеки;
- 2) впровадження модельного експерименту ситуації «стан рідинних відходів – екосистема довкілля» на основі комплексного поєднання теоретичних засад системології дослідження та когнітивного моделювання, що дозволяє працювати з слабкоструктурованими системами і в умовах невизначеності стану природно-техногенних об'єктів;
- 3) застосування інформаційно-програмного забезпечення для реалізації системи контролю рівня екологічної безпеки процесу утилізації рідинних небезпечних хімічних відходів, у тому числі коксохімічних виробництв.

Новизна. Вирішення проблемних завдань екологічної безпеки в умовах недостатньої моніторингової інформованості завдяки поєднанню засобів моделювання об'єкта дослідження як складноструктурованої системи та когнітивного підходу з визначення та прогнозування стану таких систем.

Результати дослідження та обговорення. Для очищення стічних вод на підприємствах передбачені такі організаційно-технічні рішення:

– очищення стічних вод на заводських очисних спорудах;

– подвійне очищення стічних вод – на заводських, а потім на міських очисних спорудах з подальшим скидом у водойми;

– безперервне очищення промислових вод і розчинів на локальних очисних спорудах протягом певного часу з передачею на регенерацію для повернення в оборот; за умови її неможливості – усереднення та зберігання утилізованих певним чином рідинних відходів в шламонакопичувачах [20, 21].

Одним з хімічних засобів обробки рідинних відходів є нейтралізація стоків коксохімічних, гальванічних та інших виробництв, де застосовуються кислоти та луги. Нейтралізація здійснюється шляхом змішування кислих стічних вод з лугами, додаванням до стічних вод реагентів (вапно, карбонати кальцію та магнію, аміак тощо) або фільтруванням через нейтралізуючі матеріали (вапно, доломіт, магнезит, крейда, вапняк та ін.).

Так, на підприємстві фенольний завод ТОВ «НВО «Інкор та Ко» завдяки застосуванню нейтралізації кислих стоків були створені умови ліквідації

шламонакопичувача 1-ї черги. Нейтралізація стоків здійснюється в шламонакопичувачі 2-ї черги [22]. Шлам реагує із сірчаною кислотою, що входить до складу кислих стоків і нейтралізує останні. Після 3 годин витримки починається операція засипки траншеї з нейтралізованими стоками одночасно з розробкою нової траншеї. У кінці чергового циклу за допомогою бульдозера згідно з планом вирівнюють поверхню шламонакопичувача 2-ї черги, а потім виконується наступний цикл.

Перебіг реакцій за участю сірчаної кислоти, фенолів не є остаточним і досконалим засобом запобігання екологічних ризиків, тому необхідною є автоматизація контролю безпеки та запровадження інформаційних технологій оперативного пошуку ефективних технологічних рішень.

У ході досліджень за початковими даними вхідних параметрів відповідно до структурованого інформаційно-методичного забезпечення (ІМЗ) аналізу з оцінки системних об'єктів з метою управління їх якістю для оперативної підтримки прийняття рішень (ППР) запропоновано алгоритм реалізації ІМЗ. У структурі дослідження передбачено викори-

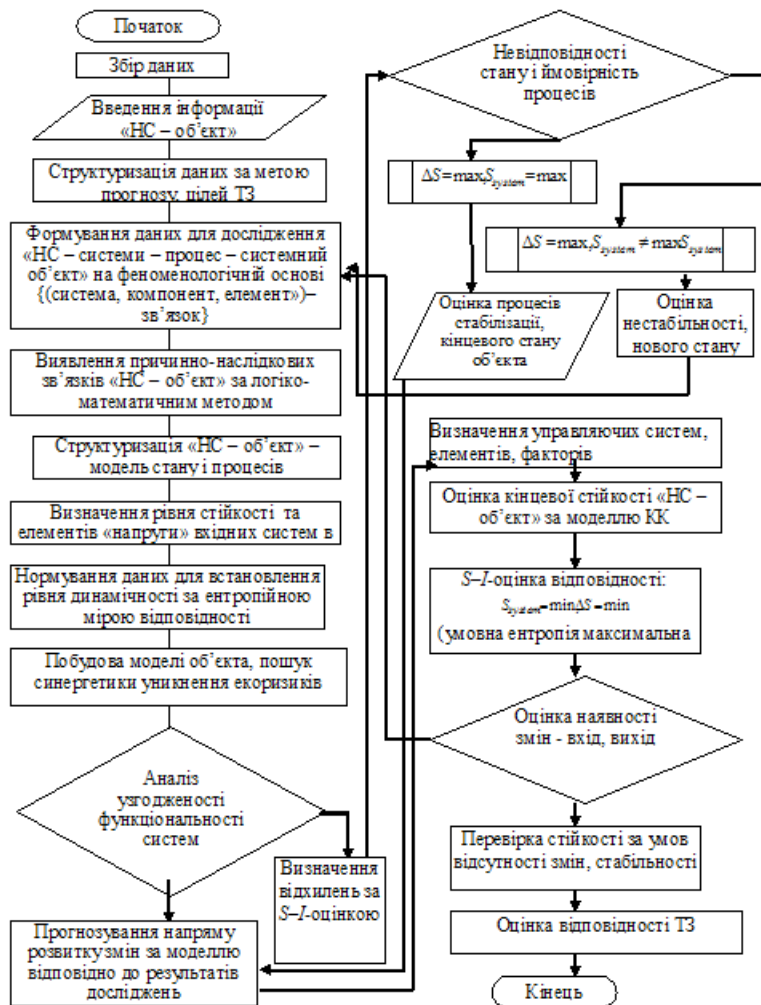


Рис. 1. Схема алгоритму з комплексного аналізу стану системного об'єкта

стання моделі складової «система – процес – об’єкт», встановлення її стану відповідно до побудованої графічної моделі – когнітивної карти (КК), встановлення неконтрольованих процесів через ентропійне навантаження на систему як імовірність змін на вході і виході параметрів стану ($S_{system}, \Delta S$) (рис. 1).

Складові аналітично-обчислювальні операції ІМЗ проводяться для оцінки відповідності для будь-якої системи. У межах аналізу системного об’єкта і для стаціонарних, і для динамічних умов стан описується певною функцією, зміни якої вказують на наближення до певної точки гомеостатичних відносин з НС, встановивши фактори вагомості у дестабілізації ситуації в системі «об’єкт – НПС» і «система об’єкта – внутрішнє об’єктне середовище». Взаємодія між системами як множина X і множина Y у відносно вимог до простору їх існування $X \times Y$ реалізується на множині можливих пар U при $a \in X$ для тих $y \in Y_a$ за умови $(a, y) \in U$, умовна ентропія визначається рівнянням

$$S(y|a) = \log_2 N(Y_a), \quad (1)$$

де $N(Y_a)$ – число елементів множини Y_a .

Інформація про стан системи в x відносно даних про y має вигляд

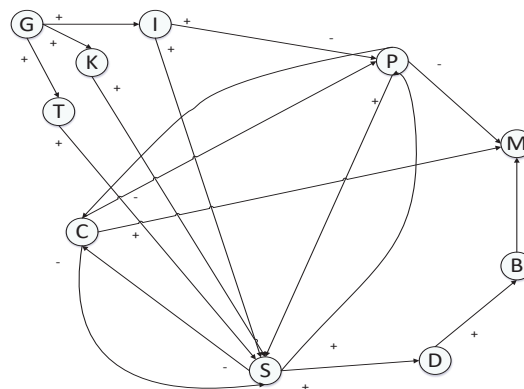
$$I(x:y) = S(y) - S(y|x). \quad (2)$$

Математична формалізація вхідної інформації для аналізу та досліджень динамічних і статичних систем і процесів, що відбуваються в них, реалізовані відповідно до алгоритмічної схеми ІМЗ (див. рис. 1) [23].

Для моделювання та аналізу характеру хімічного забруднення екосистем довкілля при недостатній герметичності шламонакопичувачів рідинних коксохімічних відходів розроблена когнітивна карта G1 (рис. 2). Це дозволить надати опис загального стану «система рідинних відходів – міграція хімічних речовин між компонентами НПС – вплив відходів на елементи екосистем» на основі зміни значень вершин за імпульсним режимом:

$$x(k) = x(0) + p(0)(E + A + A^2 + \dots + A^{k-1}), \quad (3)$$

де $x(0)$ – вектор значень вершин орграфу до додання системі початкового імпульсу; $p(0)$ – вектор величин початкових змін значень вершин (початковий імпульс); $x(k)$ – вектор значень вершин після k кроків застосування імпульсу відповідного значення і напрямку дії; A – матриця суміжності вершин, складена з вагових коефіцієнтів орграфу, для системи з N вершин при $x(k) \in R^N, p(0) \in R^N, A$ – матриця розміру $N \times N$.



P – рівень забруднення повітря; M – рівень здоров’я населення; C – стан аграрних культур; S – рівень забруднення ґрунту; D – рівень забруднення ґрунтових вод; B – рівень забруднення підземних вод; G – токсичність рідинних відходів; I – розчин сірчаної кислоти; K – розчин сульфату амонію; T – розчин інших солей

Рис. 2. Когнітивна карта G1 «Вплив рідинних відходів на об’єкти довкілля»

Для визначення стану в системі «рідинні відходи – об’єкти НПС» розглядається матриця суміжності орграфу ($P, M, C, S, D, B, G, I, K, T$) знакової когнітивної карти, до якої застосовують імпульсний режим [15–19]:

$$= \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Тенденцію змін в системі розглянуто відповідно до відгуків в елементах навколишньої середовища за результатами прогнозування на 3 роки. Імпульсний режим проводять за умови, що всі імпульси, які активізують вершини, дорівнюють одиницям. Розрахунки проведені в MathCad13 (рис. 3):

$$A^2 = \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 2 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & -1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad A^3 = \begin{pmatrix} 2 & -3 & -3 & 3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 2 & -3 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & -3 & -3 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & -1 & -4 & 1 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & -3 & -2 & 3 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & -1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & -1 & 2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Розрахунки матриць A^2, A^3

амонію та кальцію, вуглекислого газу навантаження на навколишнє середовище знижується в середньому на 15% за оцінкою роботи з когнітивною моделлю.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані позитивні результати застосування технології комп'ютерного моделювання

ситуації «система рідинних відходів – вплив відходів на елементи екосистем» та надання до нього програмного додатка для автоматизації контролю за результатами нейтралізації реакційно-активних складових рідинних відходів на шламонакопичувачах у місті Торецьк можуть бути поширені у виробничій практиці коксохімічних підприємств.

Література

1. Три бомби в одну точку: ВС РФ ударили ФАБ-500 по фенольному заводу в Нью-Йорку. URL : <https://focus.ua/voennye-novosti/657072-tri-bomby-v-odnu-tochku-vs-rf-udarili-fab-500-po-fenolnomu-zavodu-v-nyu-yorke-video>
2. ООО НПО ИНКОР И КО. Прісна вода Донеччини – під загрозою отруєння відходами з відстійників. URL: <https://freeradio.com.ua/ru/presnaia-voda-donetchyny-pod-uhrozoi-otravleniya-otkhodami-uz-otstoinykov-kak-ee-zashchyschait/>
3. Fuenmayor R., López-Garay H. The Scene for Interpretive Systemology. *Systems Practice*. Vol. 4. № 5, 1991. P. 1–17. URL : http://conocimientolibre.cenditel.gob.ve/files/2014/09/fuenmayor_garay_scene.pdf
4. Kozulia T., Kozulia M., Didmanidze I. Comprehensive study of the systemic formation «object–environment» safety state. *Technogenic and Ecological Safety*. 7(1/2020), P. 3–12.
5. Kozulia Tatiana, Kozulia Mariia. Methodical bases of information support for complex analysis of system objects difficult / weakly structured. *Modern Problems Of Computer Science And IT-Education : collective monograph* / [editorial board K. Melnyk, O. Shmatko]. Vienna : Premier Publishing s.r.o., 2020. P 43–64.
6. Gorelova G.V. Cognitive modelling as the instrument in the course of knowledge of large system. *International Journal "Information Theories and Applications"*, 2011. Vol. 18. № 2. 3. 172–182. URL : <http://www.ithea.org/fis/IJITA%202.pdf>
7. Галкіна О.П., Дегтяр М.В. Технології очищення фенольних стічних вод. *Екологічні науки* № 1(24). Т. 2. С. 32–36.
8. ReDrop™ Wastewater Solutions. A liquid waste partnership that offers you solid advantages. URL: <https://www.reworldwaste.com/what-we-do/wastewater-treatment>
9. Czekala W., Drozdowski J., Łabiak P. Modern Technologies for Waste Management: A Review. *Applied Sciences*. 2023. 13(15). 8847. 14 p. URL : <https://doi.org/10.3390/app13158847>.
10. Хавікова К.Є., Іванченко А. В. Впровадження технології геотекстильних контейнерів geotube на коксохімічних підприємствах. *Вісник ХНТУ. Інженерні науки*. 2023. № 2(85). С. 99–105. URL : <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.13>
11. Nikiforova A. A. The systems approach. *Encyclopedia of Knowledge Organization (IEKO)*. 2022. 25 p. URL : https://www.researchgate.net/publication/359209423_The_systems_approach.
12. Jenyns D. SYSTEMology: Create time, reduce errors and scale your profits with proven business systems. Kindle Edition. 2020. 219 p. URL : <https://www.amazon.com/SYSTEMology-Create-profits-business-systems-ebook/dp/B08CDY993G>
13. Ramakrishna Y., Srivastava B. Strategies for Environmentally Responsible Supply Chain and Production Management. IGI Global USA, 2024. 309 p. DOI: 10.4018/979-8-3693-0669-7
14. Kozulia, T.V., Kozulia, M.M. Using the systemological basis and information entropy function in the study at uncertainty conditions of system-structured objects. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*. 2022. №3-139. P. 118–127. URL: <https://vant.kipt.kharkov.ua/TABFRAME.html>
15. Gorelova G. V. Cognitive Modeling of Complex Systems: State and Prospects. *System Analysis in Engineering and Control*. SAEC 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol 442. pp 212–224. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98832-6_19
16. Firsova A., Gorelova G., Makarova E. L., Makarova E. A., Chernyshova G. Simulation Cognitive Modeling Approach to the Regional Sustainable Complex System Development for Improving Quality of Life. *Mathematics*. 2023. № 11, 4369. 22 p. URL: <https://doi.org/10.3390/math11204369>
17. Gorelova G. Scenario cognitive modeling of development trends of the complexity system “youth, labor market, quality of life”. *System research and information technologies*. 2021. № 1. P. 103–120 DOI: <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.1.09>
18. An Introduction to Cognitive Information Processing Theory, Research, and Practice. Technical Report. 2020. №. 62. 35 p. URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED616571.pdf>
19. Zolotukhina E. B., Krasnikovaa S. A., Medvedkovaa Irina V., Trudaevab T. A., Bushinaa K. S. Cognitive approach in the implementation of local geodynamic monitoring. *Procedia Computer Science*. 2021. Vol. 190. P. 863–868. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.06.100>
20. Chemical Waste, Sustainable Practices, Waste Disposal. May 30, 2023. URL: <https://thirdview.info/2023/05/30/5-strategies-for-reducing-the-release-of-chemical-wastes-from-your-business/>
21. Hussain Ch. M., Paulraj M. S., Nuzhat S. Source reduction and waste minimization–concept, context, and its benefits. *Source Reduction and Waste Minimization*, 2022. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824320-6.00001-0>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128243206000010?via%3Dihub>
22. Оцінка впливу на довкілля (ОВНС) місць видалення відходів ТОВ НВО «Інкор та Ко». – К. : Міністерство екології України, 2003. – 300 с.
23. Козуля Т.В., Козуля М. М. Інформаційно-методичні основи підтримки прийняття рішень для комплексного дослідження системних об'єктів : монографія. Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – 231 с. URL : <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79823>

ОЦІНКА ВПЛИВУ ГІРНИЧО-ВИДОБУВНОЇ ГАЛУЗІ НА ДОВКІЛЛЯ: СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г., Ігнатюк Р.М.
Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

org_vvm@ztu.edu.ua, kgt_shvi@ztu.edu.ua, rig@ztu.edu.ua, krrkp_irm@ztu.edu.ua

Стаття розглядає основні особливості вдосконалення системи управління відходами за рахунок запровадження екологічно-ефективних схем утилізації промислових відходів. Аналізуючи дані щодо кількості родовищ з видобування корисних копалин Житомирської області, велика частка площ земельних ділянок, зайнятих гірничо-добувними підприємствами належить підприємствам з виробництвом будівельних матеріалів, промислові відходи яких можуть бути безпечно утилізовані. Серед мінеральних відходів, що відносяться до IV класу небезпеки найбільшу частку складають ті, що пов'язані з розробленням кар'єрів – 96 тис. тон, далі відходи переробної промисловості – 60 тис. тон. Крім того, в Житомирській області є понад 1500 суб'єктів господарської діяльності, які займаються обробкою природного каменю, які продукують близько 180 тис. т відходів у вигляді буту, околу, штибу і шламу. Більшість з промислових відходів нерудної будівельної сировини можуть використовуватися у будівництві для виробництва бетону, цегли, бруківки та асфальту. Крім того, відходи можуть використовуватися для облаштування територій, ландшафтного дизайну, здійснення біофільтрації та ін. Проте, не всі гірничо-видобувні підприємства утилізують відходи. Велика частина підприємств працює на застарілому обладнанні, що призводить до утворення значних об'ємів відходів та не дає можливості здійснення екологічно-ефективного виробництва. Проведений аналіз особливостей утворення відходів промисловості та системи їх управління на гірничо-видобувних підприємствах дозволяє виділити негативні фактори впливу на довкілля, серед яких найбільш гострим є зайнятість значних земельних площ під відходи та відсутність підприємств, що здійснюють оброблення, переробку та утилізацію відходів. Саме тому, вирішення питань щодо налагодження ефективної системи управління відходами гірничо-видобувних підприємств є актуальною науково-практичною задачею та потребує невідкладного вирішення. *Ключові слова:* кам'яний шлам, управління відходами, раціональне використання, утилізація відходів, оцінка впливу на довкілля.

Assessment of the impact of the mining industry on the environment: the waste management system. Melnyk-Shamrai V., Shamrai V., Patseva I., Ihnatiuk R.

The article examines the main features of the improvement of the waste management system due to the introduction of ecologically effective industrial waste disposal schemes. Analyzing the data on the number of mineral deposits in the Zhytomyr region, a large share of land occupied by mining enterprises belongs to enterprises producing construction materials, whose industrial waste can be safely disposed of. Among the mineral waste belonging to the IV hazard class, the largest share is those related to the development of quarries – 96 thousand tons, followed by processing industry waste – 60 thousand tons. In addition, in the Zhytomyr region there are more than 1,500 economic entities engaged in the processing of natural stone, which produce about 180,000 tons of waste in the form of rubble stone, mining slab and sludge. Most of the industrial waste of non-mineral construction raw materials can be used in construction for the production of concrete, bricks, paving stones and asphalt. In addition, waste can be used for landscaping, landscape design, biofiltration, etc. However, not all mining enterprises dispose of waste. A large part of the enterprises work on outdated equipment, which leads to the formation of significant volumes of waste and does not provide an opportunity to carry out ecologically efficient production. The analysis of the features of industrial waste production and the system of their management at mining enterprises allows us to identify negative factors of environmental impact, among which the occupation of large land areas for waste and the absence of enterprises engaged in processing, processing and disposal of waste are the most acute. That is why solving issues related to the establishment of an effective waste management system of mining enterprises is an urgent scientific and practical task and requires an urgent solution. *Key words:* stone sludge, waste management, rational use, waste disposal, environmental impact assessment.

Постановка проблеми. Відповідно до європейського підходу в 2017 році було прийнято закон України «Про оцінку впливу на довкілля» [1]. Особливість даного законопроекту полягала в тому, що держава більш зацікавленіше підійшла до регулювання господарської діяльності вже на стадії погодження планової діяльності. Це дало можливість імплементувати в законодавство України європейські норми екологічного законодавства [2–4] та виконати зобов'язання щодо Угоди про асоціацію з ЄС [5]. Так, стаття 3 Закону України [1] передбачає понад 115 видів діяльності, для яких має здійснюватися процедура оцінки впливу на довкілля.

Виключенням не є види діяльності, що пов'язані з видобуванням корисних копалин. Так, обов'язкове здійснення оцінки впливу на довкілля передбачено для наступних видів планованої діяльності та об'єктів [1, 6]:

1) кар'єри та видобування корисних копалин відкритим способом, їх перероблення чи збагачення на місці на площі понад 25 гектарів;

2) інше видобування корисних копалин, крім корисних копалин місцевого значення, які видобуваються землевласниками чи землекористувачами в межах наданих їм земельних ділянок з відповідним цільовим використанням (сюди відноситься, у тому

числі, видобування нафти та природного газу у територіальному морі України);

3) видобування нафти та природного газу на континентальному шельфі;

4) видобування піску і гравію на землях водного фонду;

5) розширення та зміни, включаючи перегляд або оновлення умов провадження планованої діяльності, встановлених (затверджених) рішенням про провадження планованої діяльності або подовження строків її провадження, реконструкцію, технічне переоснащення, капітальний ремонт, перепрофілювання діяльності та об'єктів.

Гірничо-видобувна галузь чинить негативний вплив на всі компоненти навколишнього природного середовища. В результаті проведення гірничо-видобувних робіт можуть виникати такі негативні явища для довкілля, як: ерозія, провали, втрата біорізноманіття, забруднення ґрунтів, ґрунтових і поверхневих вод хімічними речовинами, що викидаються під час гірничих процесів. Саме тому, проведення процедури оцінки впливу на довкілля є дуже важливим та надзвичайно корисним як для самих гірничих підприємств, так і для стану навколишнього природного середовища.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Наукова публікація виконана в рамках господарсько-договірної наукової теми «Оцінка радіоактивного забруднення відходів кам'янообробного та каменевидобувного виробництва» (номер державної реєстрації № 0124U002809) та проекту молодих вчених «Розробка технології переробки відходів гірничого виробництва в будівельній індустрії» (номер державної реєстрації № 0124U000398).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Враховуючи інтенсивний вплив гірничо-видобувної галузі на довкілля, наслідки видобування корисних копалин можуть мати локальний, регіональний та глобальний масштаб. В працях [19–21] розглядаються шляхи щодо підвищення рівня екологічної безпеки технологічних процесів під час видобутку корисних копалин, що є дуже важливим в умовах формування сталого розвитку держави.

Основний вплив під час видобування корисних копалин зазнає земна поверхня, що призводить до зміни структури і погіршення якості, або взагалі зникнення родючого шару; до зміни форм рельєфу, ландшафтних порушень; до загибелі або деградації рослинного та тваринного світу [7–9]. В роботах [10–14], значну увагу приділено питанню відновленню порушених земель внаслідок видобування корисних копалин – шляхом проведення рекультивацийних заходів. Рекультивация порушених земель є обов'язковою складовою охорони та відновлення земельних ресурсів. Перспективним напрямком використання рекультивованих земель є їх подальше використання в для рекреаційних цілей [15, 16].

Вплив гірничо-видобувних робіт проявляється і на інші компоненти довкілля [9, 17, 22]. Так, при видобуванні корисних копалин повітряне середовище зазнає забруднення газоподібними речовинами та мінеральним пилом, що утворюється при проведенні вибухових робіт, експлуатації транспортних засобів, пиловидалення із породних відвалів тощо. Вплив гірничого підприємства на водний басейн виражений у таких факторах [18]: зміна водного режиму окремої території, забруднення води та засмічення води.

Вплив гірничих розробок на рослинний світ проявляється в знищенні трав'яного покриття, дерев та чагарників, а також забрудненні поверхні глиною, шламом, мастильними і іншими матеріалами. Основними порушеннями, що виникають для представників тваринного світу є: руйнування місць існування, вплив інтродукованих видів, втрата, скорочення або погіршення кормової бази [7–9].

Під час діяльності гірничо-видобувних підприємств утворюється значна кількість мінерально-сировинних відходів [23]. В наукових працях [24–27] розглядаються шляхи різні шляхи щодо використання відходів гірничо-видобувних підприємств в якості вторинної сировини. Відходи гірничого виробництва – невикористані продукти видобутку і переробки мінеральної сировини, що виділяються з маси видобутої корисної копалини в процесах розробки родовищ, збагачення і хімікометалургійної переробки [29]. Під час здійснення різних етапів видобування корисної копалини утворюється значна кількість відходів. Під впливом процесів, що відбуваються в біосфері, ці відходи можуть змінюватися і потрапляти у ґрунт, воду та повітря, що призводить до забруднення довкілля та чинить негативний вплив на здоров'я людей.

Відповідно до Закону України «Про управління відходами» [28] впроваджується ієрархія управління відходами, пріоритетними напрямками якої є запобігання утворенню відходів, їхнє повторне використання та відновлення (рециклінг), і лише потім – видалення, у т.ч. захоронення на полігонах, які відповідають вимогам екологічної безпеки. Існуючі методи екологічного управління відходами на гірничодобувних підприємствах є недосконалими та не відповідають європейським нормам. Тому, перед гірничо-видобувними підприємствами з'являється необхідність розроблення системи управління відходами, яка відображає чіткий розподіл компетенцій, повноважень, обов'язків та функцій між всіма учасниками системи управління відходами.

Саме тому, оцінка утворення відходів та розробка системи їх ефективного використання є актуальним для нашої держави. Адже, гірничо-видобувна промисловість є однією з провідних галузей, що формує економіку.

Метою статті є аналіз обсягів утворення відходів при видобуванні корисних копалин, а також пошук

шляхів щодо екологічного управління відходами. Об'єктом досліджень є відходи гірничо-добувних підприємств. Предмет досліджень – обсяги утворення відходів гірничо-добувних підприємств в Житомирській області.

Новизна отриманих матеріалів полягає в тому, що отримано теоретичні відомості щодо обсягів та видів відходів, розробки пропозицій щодо повторного використання відходів гірничо-видобувних підприємств. Результати дослідження можуть бути використані для запровадження сучасних екологічно-ефективних систем управління відходами при видобуванні корисних копалин.

Методика досліджень. Дослідження проводилися шляхом збирання інформації з статистичних щорічників щодо вивчення обсягів утворення відходів, їх видового складу, опрацювання літературних джерел, інтернет-ресурсів та розробки пропозицій щодо повторного використання відходів гірничо-видобувних підприємств.

Виклад основного матеріалу. Житомирська область характеризується значним потенціалом для розвитку видобувної галузі. Так, надра області містять поклади розсипного ільменіту, комплексних апатит-ільменітових руд, самоцвітів, кварцитів, облицювального каменю, каолінів, мінеральної сировини для виробництва різних будівельних матеріалів, бурого вугілля, торфу, пірофіліту [7, 30]. Такі запаси корисних копалин Житомирщини (рис. 1) дають можливість реалізовувати перспективний напрямок гірничо-видобувного виробництва, щоб забезпечити сталий розвиток економіки України високоякісними будівельними матеріалами та іншими видами мінерально-сировинних ресурсів.

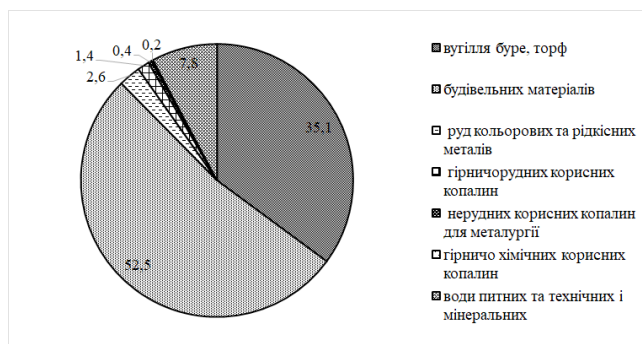


Рис. 1. Мінерально-сировинна база Житомирської області по питомій структурі розвіданих корисних копалин

Джерело: на основі результатів [32]

Аналізуючи кількість родовищ та ділянок щодо видобування різних видів корисних копалин в області нараховується понад – 500, основна частка

яких припадає на родовища та ділянки щодо виробництва будівельних матеріалів та облицювального каменю. Загальна площа земельних ділянок, які зайняті такими гірничо-видобувними підприємствами та об'єктами їх промислової інфраструктури становить приблизно 2336 га.

В результаті великої зосередженості гірничих і каменепереробних підприємств в області спостерігається поступове накопичення твердих мінеральних відходів від переробки природного каменю типу габро, граніту та шламу, після розпилу та шліфування кам'яних блоків, а також забруднення земель шламо-муловідами від переробки природного каменю.

Відходи гірничо-видобувних підприємств умовно можна поділити за формою та розмірами [25]:

– негабаритні блоки, бут, щебінь, тобто шматки каменю неправильної форми розмірами 5–70 мм (щебінь), більше 70 мм (бут) і більше 400 мм (блоки);

– окіл (бій), тобто малоформатні плити каменю товщиною 5–50 мм з колотими і пиляними краями неправильної форми, що мають термооброблену, поліровану або пиляну поверхню, вони є відходами розпилювання і окантування плит;

– обапіл, тобто відходи пасерування і розпилювання блоків, що мають неправильну форму з однією обробленою плоскою поверхнею з лінійними розмірами, які зіставні з розмірами блоків;

– штиб і шлам, тобто дрібнодисперсні відходи каменю, утворені в результаті здійснення процесів різання та шліфування, розмірами більше 0,5 мм (штиб) і менше 0,5 мм (шлам).

Більшість з цих відходів можуть застосовуються в будівництві для фундаментів; внутрішнього та зовнішнього облицювання; виробництва асфальту, бетону, цегли, бруківки, плитки; засоби для здійснення біофільтрації; декоративне застосування для ландшафтного дизайну чи оздоблення окремих територій.

Проте, не всі гірничо-видобувні підприємства використовують відходи виробництва як вторинний ресурс. Окремі, каменепереробні підприємства області впроваджуються сучасні лінії (виробництво Італії, КНР), що розраховані на обробку та повторного використання відходів. Також, варто відмітити, що частина підприємств працює з технологічно застарілим обладнанням, що призводить до утворення значної маси відходів та не дає можливості здійснення екологічно безпечного виробництва.

Найбільші обсяги відходів накопичуються у видобувній (вугільні терикони, відвали порожньої породи) і переробній промисловості (металургія, хімічна промисловість) [25]. Тому питання утилізації відходів гірничих підприємств наразі стоїть досить гостро (рис. 2).

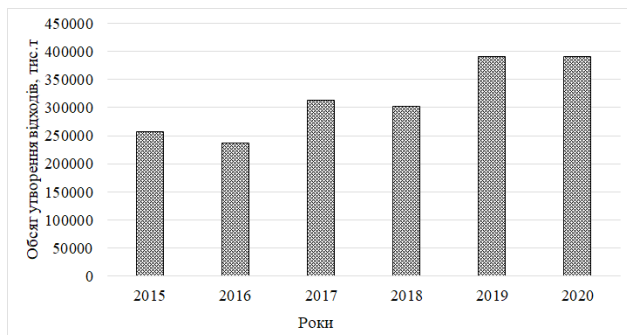


Рис. 2. Щорічні тенденції утворення відходів I–IV класу в результаті роботи гірничо-добувних підприємств та розроблення кар'єрів (2015–2020 рр.)

Джерело: на основі результатів [25]

Усі мінеральні відходи, які утворилися в області у 2021 році відносяться до IV класу небезпеки: мінеральні відходи будівництва та знесення об'єктів, у т. ч. змішані будівельні відходи – 2 тис. 290,2 т.; інші мінеральні відходи – 106 тис. 142,2 т. У 2020 році обсяги відходів, які утворилися в добувній промисловості, пов'язаної з розробленням кар'єрів склали 96 тис. 182 тони. В переробній промисловості найбільші обсяги відходів утворюються при виробництві іншої не металевої мінеральної продукції – 60 тис. 598,9 тони [32].

Серед найбільших суб'єктів господарювання в добувній промисловості та розробленні кар'єрів, які є основними накопичувачами відходів – ТОВ «Межиріченський ГЗК», Філія Іршанський ГЗК ДП «ОГХК», ТОВ «ОМКАР», ПАТ «Коростенський кар'єр», ТДВ «Коростенський щебзавод», ПАТ «Ушицький комбінат будівельних матеріалів», ДП «Овруцький щебзавод», ТОВ «Бехівський гранітний кар'єр» та інші [32]. Проте, в Житомирській області є понад 1500 суб'єктів господарської діяльності, які займаються обробкою природного каменю, що призводить до того, що за рік утворюється понад 180 тис. т. відходів (пульпа, шлам, бут). За класом небезпеки переважно утворюються відходи четвертої категорії.

Аналізуючи особливості утворення відходів та управління ними на гірничо-видобувних підприємствах можна виділити такі негативні фактори для довкілля:

- відсутність підприємств, що здійснюють оброблення, переробку та утилізацію відходів галузі;
- використання застарілого технологічного обладнання;
- зайнятість значних земельних площ під відходи;
- низька комунікація між державними та міськими органами влади щодо реалізації планів в сфері управління відходами на відповідних територіях;
- відсутність достовірної інформації щодо обсягу утворення відходів.

Саме тому, вирішення питання налагодження системи управління відходами гірничо-видобувних підприємств є актуальним та потребує вирішення. Адже, завдяки налагодженню системи управління відходами на підприємствах, буде можливість здійснювати повторне ресурсозберігаюче використання мінерально-ресурсної сировини в інших галузях господарства, що дасть можливість заощадити фінансові витрати та зберегти довкілля.

Головні висновки. Для вирішення проблеми екологічного управління відходами гірничої промисловості необхідно проаналізувати обсяги утворення відходів при видобуванні та переробці корисних копалин. Крім того, розроблені пропозиції щодо повторного використання відходів гірничого виробництва можуть бути використані для запровадження сучасних екологічно-ефективних систем управління відходами при видобуванні корисних копалин. Основою для вдосконалення системи управління відходами має стати зарубіжний досвід з питань поводження з промисловими відходами. Запровадження екологічно-ефективних технологій переробки відходів промисловості, дозволить покращити екологічну ситуацію промислових підприємств. Отже, належне управління відходами гірничої промисловості слугуватиме базою для їх раціонального та екологічно-безпечного використання в якості вторинної сировини.

Література

1. Закону України «Про оцінку впливу на довкілля». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text> (дата звернення: 15.09.2024).
2. Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля (Орхуська Конвенція). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_015#Text (дата звернення: 15.09.2024).
3. Конвенція про оцінку впливу на навколишнє середовище у транскордонному контексті. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_272#Text (дата звернення: 15.09.2024).
4. Директива Європейського парламенту і ради 2011/92/ЄС «Про оцінювання впливу деяких публічних і приватних проєктів на довкілля». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_022-11#Text (дата звернення: 15.09.2024).
5. Угода про асоціацію між Україною та ЄС. URL: <https://mof.gov.ua/uk/vikonannja-ugodi-pro-asociaciju> (дата звернення: 15.09.2024).
6. Пацева І.Г., Мельник–Шамрай В.В. Лук'янова В.В. Оцінка впливу на довкілля: навчальний посібник. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. 168 с.
7. Бажан В.В., Мельник–Шамрай В.В. Оцінка впливу видобування корисних копалин на довкілля. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 13–17 травня 2024 року. Житомир : «Житомирська політехніка», 2024. С. 191.

8. Бакка М.Т., Гуменюк І.Л., Редчиць В.С. Екологія гірничого виробництва: Навчальний посібник. Житомир: ЖДТУ, 2004. 307 с.
9. Костюк, В. С., Стащенко, К. А. Вплив видобування корисних копалин у Житомирській області на стан природного середовища. VIII Міжнародна науково–практична конференція «Актуальні проблеми сучасної науки та освіти», 2023. С. 5–8.
10. Лісова Т.В. Рекультивация земель як основний захід їх відновлення. *Право і суспільство*. 2017. № 5, ч. 1. С. 119–125.
11. Веремеєнко С.І., Саврасих Л.Д. Екологічний стан земель порушених територій Житомирської області. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*. 2016. № 2(1). С. 25–31.
12. Шомко О. М. Дослідження фізико–хімічних та агрохімічних властивостей ґрунту рекультивованих територій порушених видобутком ільменіту. *Scientific Progress & Innovations*. 2024. № 27 (1). С. 74–81.
13. Shomko O., Davydova I. Assessment of forest vegetation potential of reclaimed areas after ilmenite mining using the remote earth sensing method. *Scientific journal «Environmental Problems»*. Volume 9, Number 1. 2024. С. 14–20.
14. Шомко О.М., Давидова І.В. Study of the soil condition of reclaimed areas after ilmenite mining in Zhytomyr Polissia. *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки. 2024. №1. С. 356–363.
15. Хороша О. І., Субін–Кожевнікова А. С., Куленко О. В. Аналіз основних факторів впливу та вимог при формуванні рекреаційних просторів на рекультивованих територіях. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2021. № 2. С. 73–80.
16. Шомко О.М. Давидова І.В. Перспективи рекреаційної рекультивациі земель порушених внаслідок видобутку ільменіту. *Науково–практичний журнал «Екологічні науки»*. 2024. № 1(52), Том 1. С. 114–119.
17. Добровольська С. В. Перспективи промислової розробки анадольського рідкоземельного родовища та прогнозування впливу видобутку корисних копалин на довкілля. Матеріали VI Всеукраїнської науково–практичної Інтернет–конференції Харківського національного педагогічного університету ім. Г.С. Сковороди (28 лютого – 1 березня 2023 р., м. Харків) / за заг. ред. Муромцевої Ю. І. Харків: ХНПУ ім.Г.С.Сковороди, 2023. С. 287–291.
18. Распутна, Т. А. Дослідження закономірностей впливу гірничих розробок на водний басейн. *Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки»*. 2011. № 3(58). С. 184–188. [https://doi.org/10.26642/tn-2011-3\(58\)-184-188](https://doi.org/10.26642/tn-2011-3(58)-184-188)
19. Шатрова О.О. Екологічна безпека територій розробки родовищ бурштину. *Науково–практичний журнал «Екологічні науки»*. 2019. № 3 (26). С. 169–172.
20. Turuchko I.I., Borodina N.A., Hubar I.V. Підвищення екологічної безпеки в районах видобутку корисних копалин. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія: Геоекологія та охорона праці. 2002. № 7. С. 124–127.
21. Дзюба А.С., Павличенко А.В. Шляхи підвищення рівня екологічної безпеки відкритої розробки родовищ корисних копалин. Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути [зб. наук. пр.]: матеріали IV міжнародної науковопрактичної інтернет–конференції (Київ, 15 травня 2020 р.). Київ, 2020. С. 315–319.
22. Yermakov V., Lunova O., Gorobey M. Man–caused pollution of the environment with coal dust as a result of operation and closure of coal mines. *Journal of Geology, Geography and Geocology*. 2020. Vol. 29 (4). pp. 693–700.
23. Копач П.І., Чілій Д.В. Аналіз процесів відходоутворення на виробництвах гірничо–металургійного регіону. *Екологія і природокористування*. 2012. Вип. 15. С. 118–132.
24. Палій О., Пацева І., Кірейцева Г., Циганенко–Дзюбенко І. Використання відходів гірничо–видобувної галузі, як альтернативної сировини у будівництві. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. № 1. С. 27–35 <https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-4>
25. Шамрай В.І., Мельник–Шамрай В.В., Темченко А.Г., Махно А.М., Ігнатюк Р.М. Дослідження якісних властивостей відходів каменевидобування та каменеобробки з метою їх використання як сировини для виготовлення геополімерного бетону. *Технічна інженерія*. 2023. Вип. 1(91). С. 385–397. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-1\(91\)-385-397](https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-385-397)
26. Shamrai V., Melnyk–Shamrai V., Leonets I., Korobiichuk V., Lutsenko S. Quality index control for building products made of natural facing stone. *Mining of Mineral Deposits*. 2023. Vol. 17(3). P. 12–21. <https://doi.org/10.33271/mining17.03.012>
27. Іськов С. С., Леонєць І. В. Використання шламу каменеобробних підприємств як домішок у керамічних виробках. *Технічна інженерія*. 2023. Вип. 1(91). С.361–365.
28. Закону України «Про управління відходами». URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 15.09.2024).
29. Відходи гірничого виробництва. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%96%D0%B4%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B8_%D0%B3%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%B0 (дата звернення: 15.09.2024).
30. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Житомирської області у 2021 році. URL: <https://mep.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Regionalna-dopovid-Zhytomyrska-ODA-2021.pdf> (дата звернення: 15.09.2024).
31. Регіональний план управління відходами на території Житомирської області до 2030 року ТОМ–І URL: <https://oda.zht.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/Tom-1.-Rozdil-I-ta-II-UZAGALNENNYA.pdf> (дата звернення: 15.09.2024).

УДК 628.4.043:628.477:544.022.524:502]

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.27>

УПРАВЛІННЯ УТИЛІЗАЦІЄЮ ПРОМИСЛОВИМИ ВІДХОДАМИ НА ПІДПРИЄМСТВІ ВИГОТОВЛЕННЯ ХІМІЧНИХ ВОЛОКОН

Василенко О.М., Овдіюк О.М., Сапронов Р.С.

Житомирський державний університет імені Івана Франка

вул. Велика Бердичівська, 40, 10008, м. Житомир

o.vasyliisa@gmail.com, 7992750@gmail.com, roman.sapronov@fps.com

У статті досліджено сучасні підходи до управління утилізацією промислових відходів на підприємствах з виробництва хімічних волокон. Розглянуто основні проблеми, що забезпечують у процесі утилізації відходів, зокрема, зберігання небезпечних хімічних сполук та їх вплив на навколишнє середовище. Проаналізовано існуючі методи переробки відходів та запропоновано інноваційні технологічні рішення для зменшення негативного екологічного впливу виробничих процесів. У статті акцентується увага на необхідності впровадження ефективних екологічних стратегій для забезпечення сталого розвитку підприємства.

У роботі приділено увагу сучасним підходам до управління утилізацією промислових відходів на підприємствах, що спеціалізуються на виробництві хімічних волокон. Проаналізовано проблеми зберігання небезпечних хімічних сполук, їх впливу на навколишнє середовище, а також аналізу існуючих методів переробки відходів.

Значну увагу присвячено ролі полімерних відходів, які складають значну частину промислового сміття, та можливостям їх вторинної переробки як перспективного джерела сировини. Підкреслюється необхідність впровадження ефективних екологічних стратегій для досягнення сталого розвитку підприємств. Також у статті підкреслено важливість розвитку інфраструктури для збору та переробки полімерних відходів.

Запропоновані підходи, засновані на принципах циркулярної економіки, можуть бути інтегровані в різні галузі промисловості для зменшення споживання первинних ресурсів та підвищення екологічної ефективності. Дослідження дає практичні рекомендації щодо впровадження безвідходних технологій та інноваційних методів рециклінгу відходів, які сприяють оптимізації виробничих процесів та підвищенню конкурентоспроможності. *Ключові слова:* утилізація відходів, хімічні волокна, промислові відходи, екологічна безпека, сталий розвиток, технології переробки, управління відходами.

Management of industrial waste disposal at the chemical fiber manufacturing enterprise. Vasylenko O., Ovdiuk O., Sapronov R.

The article examines modern approaches to the management of industrial waste disposal at enterprises producing chemical fibers. The main problems that ensure the process of waste disposal, in particular, the storage of dangerous chemical compounds and their impact on the environment, are considered. The existing methods of waste processing were analyzed and innovative technological solutions were proposed to reduce the negative environmental impact of production processes. The article emphasizes the need to implement effective environmental strategies to ensure the sustainable development of the enterprise.

The work pays attention to modern approaches to the management of industrial waste disposal at enterprises specializing in the production of chemical fibers. The problems of storing dangerous chemical compounds, their impact on the environment, as well as the analysis of existing methods of waste processing are analyzed.

Considerable attention is devoted to the role of polymer waste, which makes up a significant part of industrial waste, and the possibilities of their secondary processing as a promising source of raw materials. The need to implement effective environmental strategies to achieve sustainable development of enterprises is emphasized. The article also emphasizes the importance of infrastructure development for the collection and processing of polymer waste.

The proposed approaches based on the principles of the circular economy can be integrated into various industries to reduce the consumption of primary resources and increase environmental efficiency. The study provides practical recommendations for the implementation of zero-waste technologies and innovative methods of waste recycling, which contribute to the optimization of production processes and increased competitiveness. *Key words:* waste disposal, chemical fibers, industrial waste, environmental safety, sustainable development, processing technologies, waste management.

В сучасних умовах індустріалізації та глобалізації питання утилізації промислових відходів набуває все більшої актуальності. Особливо це стосується підприємств хімічної промисловості, зокрема виробництва хімічних волокон, які виробляють значну кількість відходів, що можуть мати шкідливий вплив на довкілля та здоров'я населення. Відходи, що залишаються в процесі виробництва хімічних волокон, створюють небезпечні хімічні сполуки, які вимагають особливу увагу під час їх утилізації та переробки [1].

На сьогоднішній день управління утилізацією промислових відходів на підприємствах хімічної про-

мисловості залишається недостатньо ефективним, що призводить до забруднення довкілля, підвищення ризиків для здоров'я людей та зниження екологічного стану регіонів. Також існують проблеми зі зберіганням і транспортуванням відходів, що може спричинити додаткові екологічні катастрофи. Водночас, питання управління утилізацією промислових відходів напряму пов'язане із стратегією сталого розвитку підприємства, оптимізацією виробничих процесів і зниженням витрат на екологічні заходи.

Сучасні тенденції до сталого розвитку та впровадження принципів циркулярної економіки роблять

питання ефективного управління відходами актуальними як для екології, так і для економічної стабільності підприємств. Розробка нових підходів до утилізації та переробки промислових відходів дозволяє не тільки мінімізувати їх вплив на навколишнє середовище, а й знизити витрати на екологічні заходи, оптимізувати виробничі процеси та підвищити конкурентоспроможність підприємства [2].

Полімерні відходи на сьогодні становлять приблизно 15% від загального обсягу побутового сміття, що еквівалентно близько 20 кг на рік на одну людину. За останнє десятиліття щорічне зростання обсягів виробництва та споживання пластиків становить 10–15%, і, за прогнозами, ця тенденція продовжуватиметься [3].

Однак полімерні відходи слід розглядати не тільки як джерело забруднення, а й як перспективне джерело вторинної сировини. В цьому контексті списку наукових завдань є розробка безвідхідних технологій, створення біологічно розкладних полімерів, а також удосконалення методів рециклінгу полімерних матеріалів та виготовлення композиційних полімерів на основі вторинної сировини.

Враховуючи збільшення обсягів виробництва хімічних волокон і посилення екологічних вимог на державному та міжнародному рівнях, актуальність дослідження, спрямованого на розробку ефективних методів управління утилізацією промислових вихідних речовин, є надзвичайно високою.

Таким чином, надзвичайно необхідним є комплексний підхід до вирішення проблеми управління утилізацією промислових відходів на підприємствах з виробництва хімічних волокон. Вперше в цій галузі розроблено інноваційні методи оптимізації процесів утилізації з урахуванням специфіки відходів, які утворюють небезпечні хімічні сполуки, що включають впровадження ефективних методів рециклінгу та повторного використання відходів у виробничих процесах для зниження собівартості виробництва та зменшення обсягу відходів.

Розробка рекомендацій щодо впровадження безвідхідних технологій та використання полімерних матеріалів вторинної сировини у виробництві хімічних волокон, що дозволяють забезпечити перехід до стратегії сталого розвитку підприємств.

Таким чином, дослідження розробки нових технологій управління відходами на підприємствах хімічної промисловості, що мають на меті як економічну ефективність, так і екологічну безпеку [4].

Дослідження проблеми управління утилізацією промислових відходів на підприємствах виробництва хімічних волокон має важливе методологічне та загальнонаукове значення, адже запропоновані підходи до управління відходами можуть бути застосовані для розробки універсальних екологічно стійких рішень у хімічній промисловості, які сприяють ідеальному розвитку наявних виробничих процесів і зменшують негативний вплив на них [5].

По-друге, дослідження формує основу для міждисциплінарного підходу, що об'єднує екологічну інженерію, технології переробки відходів, хімічну технологію та економіку. Це дозволяє отримати результати не тільки в хімічній промисловості, але й на інших підприємствах, які мають такі ж проблеми з управлінням відходами.

Крім того, розроблені методи та технології можуть бути інтегровані в концепцію циркулярної економіки, що дає можливість використовувати відходи як ресурс і зменшувати споживання у первинних ресурсах. Це робить дослідження релевантним не тільки з точки зору виробничої ефективності, але й з точки зору.

Загальнонаукове значення має значення у формуванні нових підходів до проблем зумовлення відходами через використання сучасних технологій переробки, зниження екологічних ризиків та підвищення ефективності виробничих процесів на основі сталого розвитку.

Розрізняють три основні джерела утворення полімерних відходів [6]:

Відходи синтезу: Це виробничі відходи, які утворюються під час технологічного процесу отримання полімерів. До них відносяться відходи чищення реакторів, розсипу, а також партії матеріалів з нестандартними параметрами тощо. Умови утворення таких відходів та їх склад відомі, тому вони зазвичай можуть бути легко перероблені для виробництва корисних продуктів.

Відходи переробки: Це технологічні відходи, які утворюються під час переробки полімерних матеріалів в виробі. Це можуть бути браковані вироби, злитки з сумішей полімерів, які утворюються при чищенні переробних машин і агрегатів. Такі відходи зазвичай однорідні за складом, і для них існують технології виробництва виробів.

Відходи споживання: Це різноманітні полімерні вироби, які були в експлуатації. Такі відходи можуть бути однорідні за складом або комбінованими (комбінація декількох полімерів або полімерів з іншими матеріалами). Залежно від умов експлуатації може відбуватися зміна властивостей полімерних матеріалів (деструкція, старіння) та їх забруднення.

Особливістю відходів полімерних матеріалів є їхнє надзвичайне витривале ставлення до агресивних середовищ, а процеси їх природного розкладу протікають дуже повільно. Темп та спосіб деградації полімерів у природних умовах залежать від ряду факторів, включаючи наявність світла, доступ кисню, рівень вологості, температуру, кислотність тощо.

Виготовлення пакувальних матеріалів породжує велику кількість відходів, яка змінюється залежно від рівня життя населення та сезонних коливань. На полігонах, де захоронення відбулось недавно, під впливом дощу полімерні відходи можуть виходити на поверхню. Це стає можливим через те, що полімери не поглинають вологу так, як побутові або

харчові відходи, і тому не забезпечують достатньої щільності. У результаті полімерні відходи виходять на поверхню полігону й під дією сонячних променів лишаються там, поки не утвориться новий шар відходів або не буде відбито новий шар ґрунту.

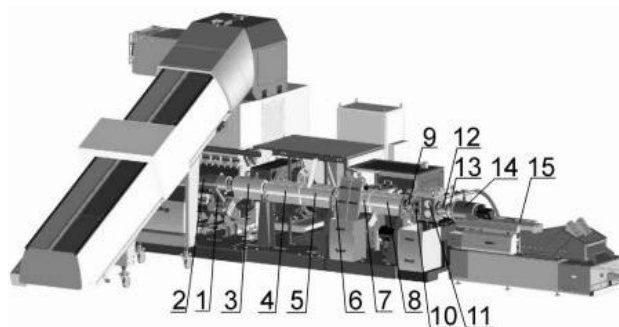
Одним із серйозних недоліків полімерних матеріалів є те, що, на відміну від природних матеріалів, вони не розкладаються досить швидко під впливом чинників довкілля, таких як світло, тепло, атмосферні гази та мікроорганізми, і продовжують існувати у вигляді полімерних відходів протягом багатьох років, завдаючи шкоду навколишньому середовищу.

Швидке збільшення обсягів виробництва полімерних матеріалів призводить до зростання їхньої частки у відходах. Полімерні відходи в основному відкладаються на сміттєзвалищах, часто непланових, в лісових зонах, недалеко від населених пунктів, на полях. Частина цих відходів спалюють на сміттєзвалищах, у дворах та на сміттєспалювальних заводах, що призводить до викиду в атмосферу токсичних речовин (фтористий і хлористий водень, фосген, ціаніди, а також діоксини, які мають канцерогенний вплив).

Основним методом використання відходів пластмас є їх утилізація, що передбачає повторне використання матеріалів. Відмінністю утилізації є те, що вона дозволяє отримати додатковий обсяг корисних продуктів для різних галузей економіки та уникає повторного забруднення довкілля. Однак лише невелика частина всіх полімерних відходів фактично піддається переробці. Це пов'язано з труднощами підготовки сировини, такими як збір, сортування, поділ та очищення, а також з відсутністю спеціалізованого обладнання для переробки.

Вторинна переробка полімерних матеріалів представляє собою раціональний метод утилізації полімерних відходів, оскільки переробка використаної сировини дозволяє зменшити потребу в новому виробництві полімерів. Цей підхід допомагає уникнути викиду шкідливих речовин в навколишнє середовище і зменшити енерговитрати, необхідні для виготовлення нових полімерів. Сам процес переробки відбувається наступним чином.

Полімерні відходи завантажуються вручну на конвеєр і переміщуються для подальшого подрібнення (рис. 1). На конвеєрі встановлено металодетектор для запобігання потрапляння металу в дробарку. У разі виявлення металу металодетектор подає сигнал, і конвеєр зупиняється.



1	Дозатор шнековий регульований	9	Перехідник без фільтру
2	Екструдер, втягування.	10	Блок зворотної промивки (опція)
3	Зона 1 екструдера	11	Блок фільтру
4	Зона 2 екструдера	12	Перехідник, гануляція
5	Зона 3 екструдера	13	Гранулююча головка
6	Перехідник, екструдер з системою дегазації (опція)	14	Ділянка охолодження
7	Екструдер з системою дегазації, зона 1 (опція)	15	Водяна ванна
8	Екструдер з системою дегазації, зона 2 (опція)		

Рис. 1. Будова технологічного обладнання для переробки полімерів

Полімерні відходи спочатку потрапляють у завантажувальну шахту, де проходить процес подрібнення. Система подрібнення включає вал з встановленими на ньому ножами для подрібнення. Подрібнений матеріал надходить у дозуючий шнек з екструдером, який проходить через три зони екструдера.

Далі розплав переміщується в зони екструдера з системою дегазації, де відбувається видалення газів з розплаву, і потрапляє до блоку фільтрів, який з'єднаний з гранулятором. У камері гранулятора відбувається процес формування полімерних гранул, які потім охолоджуються водою та висушуються повітрям на віброситі. Готові гранули переміщуються до бункера для подальшого фасування в поліпропіленові мішки по 25 кг або в м'які контейнери.

При прийнятті рішення щодо створення об'єктів утилізації полімерних відходів важливо враховувати ієрархію методів поводження з відходами, визначену Рамковою Директивою ЄС «Про відходи» [7].

Пріоритет 1: Найперше необхідно впроваджувати управлінські рішення, спрямовані на попередження

та/або мінімізацію утворення відходів. Реалізація таких заходів сприятиме зменшенню обсягу відходів, які потрібно буде утилізувати.

Пріоритет 2: Другим пріоритетом є підготовка відходів до повторного використання. Для полімерних відходів це означає можливість повторного використання виробів, які більше не виконують свою первісну функцію.

Пріоритет 3: Третій пріоритет полягає у переробці відходів без використання їх енергетичного потенціалу. Для полімерних відходів це означає виготовлення з них вторинної сировини для повторного використання. Формально це відноситься до пріоритету № 3, але з точки зору ієрархії методів поводження з відходами такі рішення близькі до пріоритету № 2 і повинні мати найвищий пріоритет серед методів утилізації.

Пріоритет 4: Четвертим пріоритетом є утилізація відходів з орієнтацією на використання їх енергетичного потенціалу, що включає спалювання, хоча цим цей пріоритет не обмежується.

Пріоритет 5: Останній пріоритет в ієрархії методів поводження з відходами – це їх захоронення. Оскільки захоронення не є методом утилізації, в даній роботі цей метод не розглядається.

Різні технології утилізації відходів мають різні вимоги до якості сировини (відходів). При оцінці якості слід враховувати:

– Однорідність відходів за складом: Відсутність домішок інших полімерів або мінімальна їх частка.

– Чистота відходів: Відсутність забруднень або низький ступінь забрудненості.

– Фізико-хімічні властивості: Відходи повинні мати характеристики, близькі до первинного матеріалу.

– Чим вищу якість мають відходи, тим більше можливостей для їх утилізації та менші витрати на підготовку відходів до перероблення.

Для вторинного використання полімерних відходів необхідно забезпечувати високу якість вихідної сировини або застосовувати технологічні методи для їх підготовки, орієнтовані на підвищення якості (вилучення домішок, забруднень тощо).

Методи, такі як спалювання, можуть бути застосовані для полімерних відходів найнижчої якості.

Запровадження будь-яких технологічних рішень з утилізації полімерних відходів повинне ґрунтуватися на відповідному техніко-економічному обґрунтуванні.

На сьогоднішній день в Україні сфера утилізації полімерних відходів мало розвинена. Незважаючи на велику кількість полімерних відходів, перетворення їх на сировину для подальшої переробки здійснюється обмеженою кількістю підприємств.

Головною метою є розробка продукції, яка в майбутньому буде легше перероблятися або повторно використовуватися. Це також сприятиме роздільному збиранню відходів, що дозволить класифікувати

сировину за якістю. Завдяки екологічному податку будуть створюватися нові інфраструктури для збору та переробки упаковки. Якщо ситуація з надходженням сировини стабілізується, стануть доступними для впровадження інші методи утилізації полімерів, такі як хімічна, термічна та вторинна переробка, які мають більш широкий і ефективний спектр застосування.

На основі проведеного аналізу, можна зробити кілька важливих висновків щодо утилізації полімерних відходів:

1. Необхідність якісної сировини: Для ефективної утилізації полімерних відходів потрібна сировина високої якості. Це означає, що відходи повинні бути однорідними за складом, чистими та мати фізико-хімічні властивості, близькі до первинного матеріалу. Висока якість відходів збільшує можливості для їх утилізації та знижує витрати на підготовку до перероблення.

2. Важливість техніко-економічного обґрунтування: Запровадження будь-яких технологічних рішень з утилізації полімерних відходів повинне базуватися на детальному техніко-економічному обґрунтуванні, що враховує всі аспекти, включаючи витрати, можливості ринку та екологічні переваги.

3. Розвиток інфраструктури: В Україні сфера утилізації полімерних відходів ще мало розвинена. Необхідно створювати нові інфраструктури для збору та переробки полімерних відходів. Це можна досягти за рахунок екологічного податку та стимулювання роздільного збирання відходів.

4. Підтримка інноваційних підходів: Важливо розробляти продукцію, яка в майбутньому буде легше перероблятися або повторно використовуватися. Це сприятиме зниженню обсягів відходів і підвищенню ефективності їх утилізації.

5. Різноманітність методів утилізації: Якщо стабілізується надходження сировини, можна буде застосовувати різні методи утилізації полімерів, такі як хімічна, термічна та вторинна переробка, що забезпечить більш широкий та ефективний спектр застосування.

Отже, враховуючи вищеперераховані особливості утилізації відходів в галузі виготовлення хімічних волокон, побудуємо модель ефективного управління утилізацією відходів (рис. 2). Основними ключовими елементами даної моделі є визначення типів відходів, застосування методів утилізації промислових відходів і відповідно кореляції їх щодо конкретного визначеного виду відходів. Наступним кроком є дотримання основних принципів управління відходами на підприємстві, з дотриманням законодавчого поля в частині регулювання утилізації відходів [8]. Варто зазначити, що застосування сучасних технологій та дотримання екологічних стандартів дозволить досягнути ефекту мінімального негативного впливу виробництва на довкілля та забезпечить безпеку для здоров'я людей.

Отже, для покращення ситуації з утилізацією полімерних відходів в Україні необхідні комплексні заходи, які включають як розвиток інфраструктури, так і впровадження передових технологічних рішень.

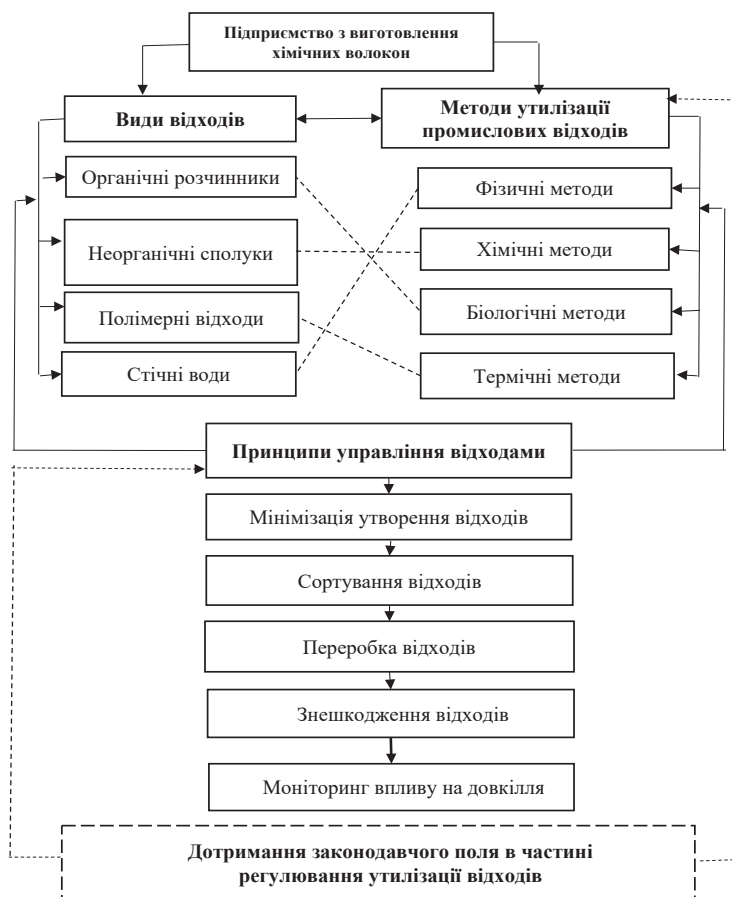


Рис. 2. Модель ефективного управління утилізацією відходів на промислових підприємствах з виготовлення хімічних волокон
Джерело: власні дослідження.

Література

1. Войціховська А., Кравченко О., Мелень-Забрамна О., Панькевич М. Крайні європейські практики управління відходами: посібник / за заг. ред. О. Кравченко. Львів: Видавництво «Компанія «Манускрипт»», 2019. 64 с.
2. Довбня О. В. Циркулярна економіка та управління відходами в промисловості. Харків: Видавництво ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2020. 312 с.
3. Харченко, А. В., Сагайдак, І. В. Удосконалення системи переробки твердих побутових відходів в Україні. *Науковий журнал*. 2020. № 4. С. 123-130.
4. Ляшенко І. П. Екологічна безпека хімічної промисловості: проблеми та рішення. *Екологічні науки*. 2019. № 5. С. 45.
5. Касимов А. М., Удалов І. В., Сталінська І. В. Розробка ефективних технологій утилізації відходів підприємств енергетики та хімічної промисловості. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Геологія. Географія. Екологія"*. 2014. Вип. 41. С. 133-139.
6. Гутиря М. В., Романчук В. О. Утилізація промислових відходів: сучасні підходи та методи. Київ: Екологічна академія, 2020. 256 с.
7. DIRECTIVE 2008/98/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. URL: <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=CELEX:32008L0098> (дата звернення: 20.09.2024).
8. Закон України «Про управління відходами». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20>. (дата звернення: 20.09.2024).

МОДЕЛЬ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ НА ПРИКЛАДІ СУПЕРМАРКЕТІВ

Горбачова О.С., Павлюх Л.І., Якименко Г.М.

Національний авіаційний університет

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

olena.horbachovaa@gmail.com, lenyo@ukr.net, iakymenkoann@gmail.com

Швидкі темпи урбанізації в Україні супроводжуються значним зростанням обсягів відходів, особливо в містах. Це створює серйозні екологічні та соціальні проблеми, які негативно впливають на якість життя населення та довкілля. Стаття присвячена комплексному аналізу актуальних проблем управління відходами в українських містах та пошуку шляхів їх вирішення. Особливу увагу приділено проблемі органічних відходів, зокрема відходів харчової промисловості та супермаркетів. Їхнє нерациональне захоронення призводить до забруднення ґрунтових вод, виділення шкідливих газів та втрати цінних органічних ресурсів. Розглянуто і систематизовано існуючі методи утилізації органічних відходів та обґрунтовано ефективність компостування як одного з найкращих способів їх переробки.

Стаття також розглядає економічні аспекти запровадження системи поводження з органічними відходами на основі компостування. Проведено розрахунок економічної ефективності такого підходу, який демонструє його доцільність як для муніципалітетів, так і для бізнесу. Крім того, автори підкреслюють важливість залучення громадськості до процесу сортування та компостування відходів, що сприяє підвищенню екологічної свідомості населення та формуванню культури відповідального споживання.

Результати проведеного дослідження можуть бути використані для розробки ефективних стратегій управління відходами в містах. Запропоновані рекомендації стосуються таких аспектів, як: Створення інфраструктури для збору та переробки органічних відходів, розробка програм стимулювання сортування та компостування, залучення бізнесу до процесу управління відходами, проведення інформаційно-просвітницької роботи.

Реалізація запропонованих заходів дозволить не лише вирішити проблему органічних відходів, але й сприяти сталого розвитку України. *Ключові слова:* управління відходами, сталий розвиток, переробка, розумні міста, компостування.

A model for effective waste management in supermarkets. Horbachova O., Pavliukh L., Iakymenko G.

The rapid pace of urbanization in Ukraine is accompanied by a significant increase in the volume of waste, especially in cities. This creates serious environmental and social problems that negatively affect the quality of life of the population and the environment. The article is devoted to a comprehensive analysis of the current problems of waste management in Ukrainian cities and the search for ways to solve them. Special attention is paid to the problem of organic waste, in particular food industry and supermarket waste. Their irrational burial leads to groundwater pollution, release of harmful gases and loss of valuable organic resources. The existing methods of disposal of organic waste are reviewed and systematized, and the effectiveness of composting as one of the best methods of their processing is substantiated.

The article also considers the economic aspects of introducing a system of organic waste management based on composting. The calculation of the economic efficiency of such an approach was carried out, which demonstrates its feasibility both for municipalities and for business. In addition, the authors emphasize the importance of involving the public in the process of sorting and composting waste, which contributes to increasing the environmental awareness of the population and the formation of a culture of responsible consumption.

The results of the research can be used to develop effective waste management strategies in Ukrainian cities. The proposed recommendations relate to such aspects as: Creation of infrastructure for collection and processing of organic waste, development of incentive programs for sorting and composting, involvement of business in the waste management process, conducting information and educational work. *Key words:* waste management, sustainable development, recycling, smart cities, composting.

Постановка проблеми. Супермаркети є одними з найбільших джерел відходів у світі. Щороку вони генерують мільйони тонн відходів, включаючи харчові відходи, пакувальні матеріали та відходи від ремонту та будівництва. Ці відходи становлять значну загрозу для навколишнього середовища, оскільки вони сприяють зміні клімату, забрудненню повітря та води та втраті біорізноманіття. Існує необхідність розробки комплексного підходу, який охоплюватиме всі етапи життєвого циклу продукту – від виробництва до утилізації.

Актуальність дослідження. Поводження з відходами є однією з найважливіших екологічних проблем сучасності. Щороку у світі утворюється вели-

чезна кількість відходів, які негативно впливають на навколишнє середовище.

У Україні ця проблема є особливо актуальною. За даними Державної служби статистики України, у 2022 році в Україні було утворено 37,5 млн тонн відходів, з яких лише 9,8 млн тонн було перероблено. Основна частина відходів (27,7 млн тонн) була захоронена на звалищах, що негативно впливає на довкілля.

За даними ЮНЕП, у світі щороку утворюється близько 2,01 млрд тонн твердих побутових відходів (ТПВ). Цей обсяг постійно зростає, і до 2030 року він може досягти 2,5 млрд тонн.

За даними Всесвітнього банку, у 2020 році в Україні утворилося близько 11,4 млн тонн ТПВ. Це становить близько 0,55 кг на душу населення на день [1].

Раніше харчові відходи вважалися проблемою виключно в багатих країнах, оскільки споживачі купували більше, ніж могли з'їсти, але дослідження показали, що значні харчові відходи зараз є скрізь. Дані, що відрізняють їстівні харчові відходи від неїстівних частин, таких як кістки та мушлі, були доступні лише для країн з високим рівнем доходу. В ООН зазначили, що країни з низьким рівнем доходу, ймовірно, витрачають набагато менше їстівних продуктів.

ООН закликала країни взяти на себе зобов'язання боротися з відходами та скоротити їх вдвічі до 2030 року, оскільки надлишок відходів також впливає на стан біорізноманіття та забруднення у світі. Крім того, надмірне харчування є причиною 8–10% викидів парникових газів.

«Якби харчові відходи були країною, це було б третє за величиною джерело викидів парникових газів на планеті», – підсумували автори дослідження [2].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження спрямоване на вирішення поточних проблем управління відходами, сприяння екологічній обізнаності та заохочення до відповідального споживання. Вивчаючи вплив сортування відходів на стан навколишнього середовища та збереження ресурсів, це дослідження сприяє досягненню ширших цілей сталого розвитку та екологічної модернізації. Дослідження спрямовані на розробку практичних рекомендацій щодо впровадження сучасних технологій, які дозволять оптимізувати процеси збору, переробки та утилізації відходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останні роки було проведено ряд досліджень, присвячених поводженню з відходами.

У статті «Екологічні аспекти утилізації органічних відходів» О. Т. Мазурак Описано результати досліджень шляхів екологічної утилізації органічних відходів. Представлено процеси, які призводять до утворення надтоксичних забруднювальних речовин (низки діоксинів і фуранів, важких металів) та шляхи емісії цих небезпечних поллютантів у довкілля. Виділено основні джерела надходження діоксинів у навколишнє середовище: термічна утилізація відходів; процеси виробництва хлорорганічних сполук; біогенні процеси під час компостування відходів; тривале зберігання відходів хлорорганічної природи у сховищах і звалищах. Виділено низку методів зниження рівня забруднення навколишнього середовища та механізми мінімізації впливу токсикантів [3].

Згідно статті «Екологічне управління харчовими відходами в супермаркетах» Ідіано Д'Адамо, в 2017, глобальні ППО з ланцюга постачання та систем управління відходами внесли 9,3 Гт CO₂ еквівалента, що становить приблизно половину річних викидів парникових газів (ПГ) від світового виробництва продуктів харчування системи (Zhu et al., 2023b). Індекс харчових втрат ФАО залишився відносно стабільний між 2016 (13%) і 2020 (13,3%), хоча з значні географічні відмінності: країни Африки на південь

від Сахари повідомили про найбільші втрати – 21,4%; тоді як Європа та Північна Америка повідомили про найменші втрати – 9,9% (FAO, 2023) [4].

Згідно статті «Управління харчовими відходами: огляд ділової практики роздрібних торговців та її наслідки для стійкої вартості» Луїза Меннінг, харчові відходи є глобальною проблемою, яка однозначно пов'язана з продовольчою безпекою та управлінням ресурсами (FAO, 2017) і має значні екологічні, соціальні та економічні наслідки (Kowalska and Manning, 2020). За оцінками, більше третини всієї їжі, виробленої в усьому світі, викидається (Gustavsson та ін., 2011). Організація Об'єднаних Націй визнала цю проблему в Цілі сталого розвитку (ЦСР) 12 «Забезпечення моделей сталого споживання та виробництва». Ця ціль включає конкретну мету (12.3): до 2030 року вдвічі скоротити глобальні харчові відходи на душу населення на рівні роздрібною торгівлі та споживачів і зменшити втрати їжі вздовж ланцюгів виробництва та постачання [5].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.

– Відсутність комплексного підходу: Більшість існуючих досліджень та практик фокусуються на окремих аспектах управління відходами.

– Відсутність економічних стимулів: Недостатньо розроблені економічні механізми, які б стимулювали супермаркети та інші зацікавлені сторони до впровадження екологічних практик.

– Недостатня інформованість споживачів: Споживачі часто не мають достатньої інформації про те, як правильно сортувати відходи та чому це важливо.

– Відсутність єдиних стандартів та нормативів: Не існує єдиних стандартів та нормативів для управління відходами в супермаркетах, що ускладнює впровадження ефективних практик.

Новизна дослідження полягає в інтегрованому підході до вирішення складної проблеми управління відходами в супермаркетах. На відміну від попередніх досліджень, які часто фокусувалися на окремих аспектах цієї проблеми (наприклад, сортуванні, переробці чи компостуванні), це дослідження пропонує комплексне рішення, яке охоплює весь життєвий цикл відходів, від їх утворення до утилізації. Використання електронного компостера дозволяє автоматизувати процес компостування, забезпечуючи більш точний контроль над умовами компостування (температура, вологість, аерація) та прискорюючи процес розкладання органічних речовин. Це є новим кроком у розвитку систем управління відходами в супермаркетах, де традиційно застосовувалися більш ручні та менш ефективні методи.

Методологічне або загальнонаукове значення цього дослідження полягає в тому, що воно пропонує нові підходи та інструменти для вирішення актуальної проблеми управління відходами. Це дослідження може сприяти розвитку кількох наукових галузей і мати широкий спектр застосувань.

Ось деякі аспекти методологічного та загальнонаукового значення:

– Системний підхід: Дослідження демонструє важливість системного підходу до вирішення складних проблем, таких як управління відходами.

– Розробка нових інструментів та моделей: Дослідження може призвести до розробки нових інструментів для оцінки ефективності систем управління відходами, нових моделей для прогнозування обсягів відходів та розробки оптимальних стратегій управління.

– Впровадження інноваційних технологій: Використання нових технологій, таких як електронні компостери, системи автоматичного сортування відходів та мобільні додатки, може сприяти розвитку технологій в галузі управління відходами.

– Створення бази для подальших досліджень: Результати дослідження можуть стати основою для подальших досліджень в цій галузі.

Виклад основного матеріалу. Органічні відходи становлять значну частину відходів, що утворюються в процесі життєдіяльності людини. Вони швидко розкладаються і виділяють метан, парниковий газ, який є більш потужним за вуглекислий газ.

Досліди про утилізацію органічних відходів проводяться з метою розробки ефективних методів утилізації цих відходів. Органічні відходи становлять значну частину відходів, що утворюються в процесі життєдіяльності людини. Вони швидко розкладаються і виділяють метан, парниковий газ, який є більш потужним за вуглекислий газ (табл. 1).

Як видно з таблиці, компостування є найбільш ефективним методом утилізації відходів. Цей метод дозволяє використовувати відходи як добрива, що сприяє відновленню родючості ґрунту. Крім того, компостування дозволяє зменшити викиди парникових газів і є економічно ефективним.

Дослідження ефективності утилізації органічних відходів в електронному компостері: в компостер закладалися різні види органічних відходів, включаючи овочі, фрукти, хлібні відходи, м'ясо та рибу. Відходи компостувалися при різних температурах та часі. У результаті дослідження було встановлено, що вага органічних відходів зменшується в залежності від температури та часу утилізації (табл. 2).

Як видно з таблиці, при температурі 80 °C вага органічних відходів зменшується в 1,5–5 разів за 1–4 години. При температурі 120 °C вага органічних відходів зменшується в 2–9 разів за 1–4 години. При температурі 150 °C вага органічних відходів зменшується в 3–12 разів за 1–4 години. Також було встановлено, що при утилізації овочів окремо вага відходів зменшується в 1,5–2 рази швидше, ніж при утилізації овочів разом з іншими харчовими відходами.

Електронний компостер є ефективним способом утилізації органічних відходів. При правильному використанні вага органічних відходів може зменшитися в кілька разів за короткий час.

Для підвищення ефективності утилізації органічних відходів в електронному компостері рекомендується:

– Подрібнювати органічні відходи перед закладанням у компостер.

– Регулярно перемішувати органічні відходи в компостері.

– При необхідності вносити в компостер додаткові поживні речовини.

Термокомпостування – це процес розкладання органічних речовин за допомогою високих температур. Овочі та м'ясо – це два різних типи органічних речовин, які мають різні властивості, які впливають на швидкість їх термокомпостування.

Овочі містять більше вологи, ніж інші харчові відходи. Волога сприяє процесам бродіння та гниття, які є основними етапами термокомпостування. Таким чином, утилізація овочів окремо має проходити швидше, ніж утилізація овочів разом з іншими харчовими відходами, які містять менше вологи. Окрім того, овочі містять більше легкозасвоюваних поживних речовин, ніж інші харчові відходи. Ці поживні речовини необхідні для росту мікроорганізмів, які беруть участь у процесі термокомпостування. Таким чином, утилізація овочів окремо забезпечує більше поживних речовин для мікроорганізмів, що також сприяє більш швидкому компостуванню.

Нарешті, овочі містять менше жирів і олій, ніж інші харчові відходи. Жири і олії можуть ускладнювати процес компостування, оскільки вони можуть

Таблиця 1

Аналіз різних методів утилізації

Метод утилізації	Ефективність	Переваги	Недоліки
Компостування	Висока	Використання відходів як добрива, Зменшення викидів парникових газів, Економічна ефективність	Необхідність спеціального обладнання і контролю, Неможливість утилізації деяких видів відходів
Спалювання	Середня	Зменшення обсягу відходів, Знищення шкідливих речовин	Виділення шкідливих речовин в атмосферу, Витрати на паливо
Механічна переробка	Низька	Використання відходів як сировини для виробництва нових продуктів	Витрати на обладнання і транспортування, Відходи, які не підлягають переробці, все одно утилізуються на полігонах
Біогазове виробництво	Низька	Виробництво біогазу, який може бути використаний як паливо	Витрати на обладнання і транспортування, Відходи, які не підлягають біогазовому виробництву, все одно утилізуються на полігонах

утворювати плівку, яка перешкоджає доступу повітря до органічних речовин. Таким чином, утилізація овочів окремо допомагає уникнути цих проблем, що також сприяє більш швидкому компостуванню.

Економічні аспекти утилізації органічних відходів

Органічні відходи становлять значну частину відходів, що утворюються в процесі життєдіяльності людини. Вони швидко розкладаються і виділяють метан, парниковий газ, який є більш потужним за вуглекислий газ.

Утилізація органічних відходів має ряд економічних переваг, зокрема:

– Зменшення витрат на захоронення відходів. Захоронення органічних відходів на звалищах є найбільш поширеним методом утилізації. Однак цей метод є дорогим і пов'язаним з негативним впливом на навколишнє середовище. Впровадження альтернативних методів утилізації, таких як компостування або біогазове виробництво, може призвести до зниження витрат на захоронення відходів.

– Отримання цінних продуктів. При утилізації органічних відходів можна отримати цінні продукти, такі як компост, біогаз, біодобрива та інші. Ці продукти можуть бути використані в різних галузях економіки, наприклад, у сільському господарстві, енергетиці та будівництві.

Таблиця 2

Зменшення ваги органічних відходів в залежності від температури та часу утилізації

Вид відходів	Температура, °С	Час, години	Зменшення ваги, разів
Овочі	80	1	1,5
Овочі	80	2	3
Овочі	80	4	5
Овочі та інші харчові відходи	80	1	2
Овочі та інші харчові відходи	80	2	4
Овочі та інші харчові відходи	80	4	6
Овочі	120	1	2
Овочі	120	2	4
Овочі	120	4	6
Овочі та інші харчові відходи	120	1	3
Овочі та інші харчові відходи	120	2	6
Овочі та інші харчові відходи	120	4	9
Овочі	150	1	3
Овочі	150	2	6
Овочі	150	4	9
Овочі та інші харчові відходи	150	1	4
Овочі та інші харчові відходи	150	2	8
Овочі та інші харчові відходи	150	4	12

– Створення нових робочих місць. Розвиток галузі утилізації органічних відходів може призвести до створення нових робочих місць.

Для того, щоб утилізація органічних відходів була економічно ефективною, необхідно враховувати всі фактори, що впливають на її вартість.

Громадська відповідальність у сфері поводження з відходами – це відповідальність кожного громадянина за правильне поводження з відходами. Громадська відповідальність включає в себе такі аспекти, як:

– Зменшення обсягу відходів. Кожен громадянин може внести свій вклад у зменшення обсягу відходів, зменшуючи споживання товарів і послуг, які виробляють багато відходів. Наприклад, можна купувати продукти в біорозкладній упаковці, використовувати багаторазові сумки для покупок, ремонтувати пошкоджені речі замість того, щоб купувати нові.

– Правильне сортування відходів. Правильне сортування відходів дозволяє переробити більше відходів і зменшити кількість відходів, що захоронюються на звалищах. Кожен громадянин повинен знати, як сортувати відходи, і дотримуватися встановлених правил.

– Участь у заходах з поводження з відходами. Громадяни можуть брати участь у заходах з поводження з відходами, таких як волонтерська робота на звалищах або сортувальних станціях. Це дозволяє внести свій вклад у чистоту навколишнього середовища.

Алгоритм системи поводження з відходами в супермаркетах:

Крок 1: Побудувати раціональну систему логістики товарів

(не провокувати утворення відходів завдяки правильно побудованій системі управління. Коротко про: аналіз календарної потреби у вихідних продуктах для виготовлення готової їжі, локальні закупівлі, раціональна логістика, мінімальний час зберігання продукції на складі, не закуповувати дуже великі партії продукції коли не знаємо попиту).

Крок 2: Уникати утворення відходів

(слідкуватим за термінами придатності товарів та вчасно їх «позбуватись» через розпродажі, соціальні заходи для незахищених верств населення, повернення виробнику)

Крок 3: Підвищувати рівень екологічної свідомості працівників

(пояснити персоналу, чому важливо зменшувати кількість відходів. Треба зробити ряд публікацій, навчальний курс, головне – робити інформаційні компанії неодноразово, а закріплювати таку думку на рівні «базової»)

Крок 4: Зробити управління відходами повноцінною складовою системи інтегрованого менеджменту компанії

Крок 5: Достатньою мірою сортувати відходи (ввести сортування, окрім стандартного поділу на картон, дерево, макулатуру, пластик, металобрухт,

обов'язково відділяти 2–3 види органічних відходів – необроблені, готова їжа, гниль. Поставити біля внутрішніх кав'ярень збірники для стаканчиків)

Крок 6: Знаходити раціональні шляхи використання відходів

(цілі фрукти та овочі, які непридатні для вжитку людиною, потрібно передати (платно чи безплатно як соціальний проект) на харчування тваринам, гниль – передати на компостування, різні види пластику – залежно від маркування. Використану каву та чай з фудкортів – на виробництво добрив або винахідникам на окуляри. Косметику – проводити майстер-класи з візажистом. Ліки – передати за місяць до виходу терміну швидкій, як соціальний проект. Алкоголь та преміальні товари: зробити розіграш цінних подарунків для постійних покупців. Чистий маркетинг, який потребує креативу, комунікацій та інвестицій часу)

Крок 7: Заохочувати покупців

Крок 8: Заохочувати персонал

Найбільш ефективними заходами щодо зменшення відходів є:

- Зменшення кількості упаковки. Цей захід дозволяє зменшити кількість відходів, що утворюються при виробництві, транспортуванні та використанні товарів.

- Впровадження роздільного збору відходів. Цей захід дозволяє переробити більше відходів і зменшити кількість відходів, що захоронюються на звалищах.

- Розробка та впровадження нових методів утилізації відходів. Цей захід дозволяє зменшити негативний вплив відходів на навколишнє середовище.

На ефективність цих заходів впливають такі фактори:

- Політика супермаркетів. Супермаркети повинні мати чітку політику щодо поводження з відходами, яка включає в себе цілі, завдання та заходи щодо зменшення відходів.

- Обізнаність споживачів. Співробітники супермаркетів повинні бути обізнані про важливість поводження з відходами, а споживачі повинні бути інформовані про те, як вони можуть допомогти зменшити кількість відходів.

- Технологічні можливості. Супермаркети повинні мати доступ до сучасних технологій, які дозволяють зменшувати кількість відходів.

Для підвищення ефективності цих заходів можна вжити таких заходів:

- Розширити список товарів, які продаються без упаковки.

- Впровадити більш ефективну систему роздільного збору відходів.

- Розробити та впровадити нові методи утилізації відходів, які дозволяють отримувати цінні продукти.

- Проводити інформаційно-просвітницькі кампанії, спрямовані на підвищення обізнаності споживачів про важливість поводження з відходами.

Впровадження цих заходів дозволить супермаркетам зменшити кількість відходів, які вони генерують,

і зробити свій внесок у захист навколишнього середовища.

Розрахунки ефективності впровадження даної системи

Наразі в Україні немає даних про розповсюдження відходів у супермаркетах, але масштаби проблеми добре ілюструють дані європейських країн. Зокрема, у Великобританії сектор роздрібної торгівлі продуктами харчування є найбільшим споживачем пластикової упаковки. Щороку супермаркети постачають на ринок понад 800 тис. тонн споживчої пластикової упаковки із загального обсягу 1,5 млн. Тонн [6].

ReFED каже, що з цих 5 мільйонів тонн відходів продуктових магазинів близько 30% викинутої їжі потрапляє прямо на звалище. Трохи більше 18% компостується, більше 19% йде на пожертвування, а 17,5% перетворюється на корм для тварин. Менша кількість (4,9%) піддається анаеробному перетравленню, що означає, що їжа розкладалася в безкисневому середовищі з метою створення іншого продукту, наприклад біогазу. Ще 4,3% спалюється для виробництва енергії на сміттєспалювальних заводах [7].

Роздрібні торговці наразі мають майже 5 мільйонів тонн надлишків продовольства. Пропонується система електронних компостерів, що дозволяє зменшити відходи в 4 рази. Щоб визначити потенційне скорочення відходів, ми ділимо загальний надлишок їжі на 4:

Зменшені відходи = 5 000 000 тонн / 4 = 1 250 000 тонн

У разі ефективного впровадження система електронних компостерів може потенційно скоротити надлишки їжі, які створюють роздрібні торговці продуктами харчування, на 1 250 000 тонн. Це означає значне зменшення харчових відходів і може мати кілька позитивних наслідків:

- Переваги для навколишнього середовища: зменшення харчових відходів допомагає зберегти такі ресурси, як вода та земля, а також зменшує викиди парникових газів, пов'язані з виробництвом та утилізацією їжі.

- Економічні переваги: скорочуючи кількість відходів, роздрібні продавці продуктових магазинів можуть потенційно заощадити на витратах на утилізацію та потенційно отримати дохід від компосту.

- Соціальні вигоди: компостування може сприяти утворенню багатого поживними речовинами ґрунту, що може принести користь сільському господарству та виробництву продуктів харчування.

Зменшення відходів у чотири рази означало б скорочення поточного обсягу відходів на 75%.

Головні висновки. Супермаркети є значним джерелом відходів, які негативно впливають на навколишнє середовище. Для вдосконалення системи поводження з відходами в супермаркетах необхідно впроваджувати ефективні заходи щодо зменшення кількості відходів, їх переробки та утилізації.

Запровадження обов'язкового сортування відходів у супермаркетах є важливим кроком у напрямку зменшення кількості відходів, що генеруються

в Україні. Для успішного впровадження цього заходу необхідно провести низку заходів, таких як інформування підприємств-операторів і споживачів, розробка системи стимулювання та забезпечення належного рівня підготовки підприємств-операторів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати цього дослідження мають широкий спектр потенційних застосувань та можуть сприяти значним змінам в галузі управління відходами (рис. 1).

Ось деякі з ключових перспектив використання:

На рівні супермаркетів:

– Оптимізація процесів: Результати дослідження дозволять супермаркетам розробити більш ефективні системи управління відходами, що призведе до зниження витрат та покращення екологічних показників.

– Впровадження нових технологій: Супермаркети зможуть впроваджувати інноваційні технології, такі як електронні компостери, системи автоматичного сортування відходів та мобільні додатки для споживачів.

– Співпраця з постачальниками: Результати дослідження можуть стимулювати супермаркети до співпраці з постачальниками для розробки упаковки, яка легше піддається переробці або компостуванню.

– Інформування споживачів: Супермаркети зможуть використовувати результати дослідження для розробки інформаційних кампаній, спрямованих на підвищення обізнаності споживачів щодо важливості правильного сортування відходів.

На рівні держави та муніципалітетів:

– Розробка політики: Результати дослідження можуть бути використані для розробки та вдосконалення державної політики в галузі управління відходами, зокрема, для стимулювання переходу на циркулярну економіку.

– Створення нормативно-правової бази: На основі результатів дослідження можуть бути розроблені нові нормативи та стандарти в галузі управління відходами, які будуть сприяти впровадженню більш ефективних практик.

На рівні наукової спільноти:

– Подальші дослідження: Результати дослідження можуть стати основою для подальших досліджень в цій галузі, а також для розробки нових наукових теорій та гіпотез.

– Співпраця між науковцями: Дослідження може стимулювати співпрацю між науковцями з різних галузей для вирішення складних проблем, пов'язаних з управлінням відходами.

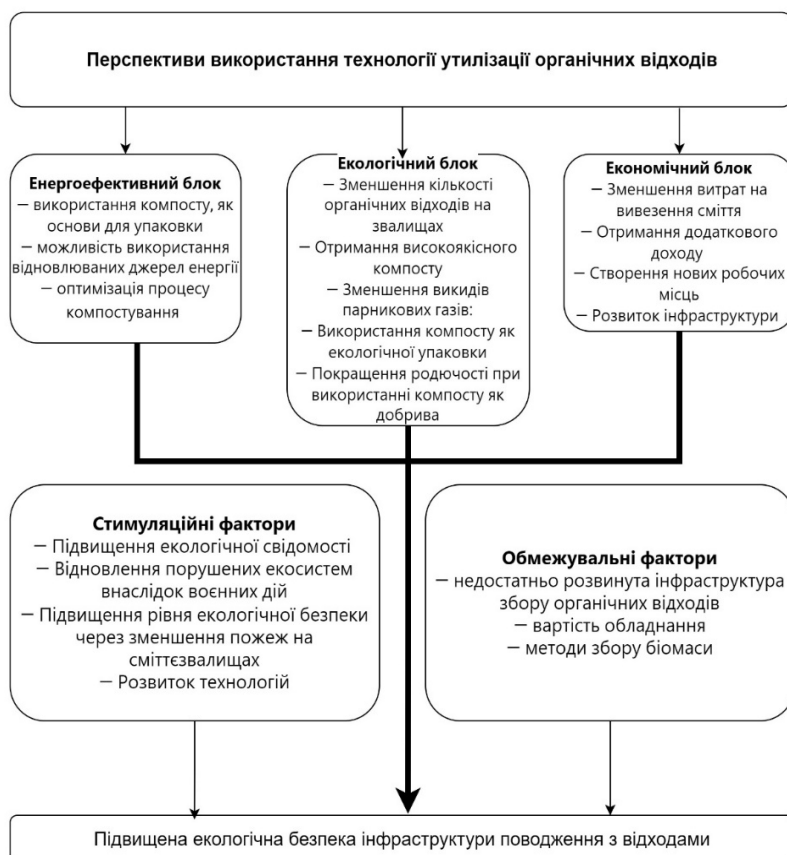


Рис. 1. Перспективи використання технології утилізації органічних відходів

Література

1. Аналіз стану поводження з побутовими відходами в Україні за 2022 рік. *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*: веб-сайт. URL: <https://mtu.gov.ua/news/34323.html> (дата звернення: 5 червня 2023 р.).
2. Харчові відходи: загальна кількість викинутих 900 мільйонів тонн. *BBC*: веб-сайт. URL: <https://www.bbc.com/news/science-environment-56271385> (дата звернення: 14 березня 2024 р.).
3. Мазурак О., Мазурак А., Качмар Н., Лусак Г. Екологічні аспекти утилізації органічних відходів. *Scientific Bulletin of UNFU*, 2017, 27(4), 100-102 с.
4. Idiano D., Simona D., Massimo G., Constantinos P. Great Britain. Sustainable food waste management in supermarkets. *Sustainable Production and Consumption*. 2023. Vol. 43. P. 204-216 с.
5. Iona Yuelu Huang, Louise Manning, Katy L. James, Vasilis Grigoriadis Food waste management: A review of retailers' business practices and their implications for sustainable value. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 285.
6. Nearly 1m tonnes every year: supermarkets shamed for plastic packaging. *The Guardian* : веб-сайт. URL: <https://www.theguardian.com/environment/2018/jan/17/nearly-1m-tonnes-every-year-supermarkets-shamed-for-plastic-packaging>, (дата звернення: 15 червня 2024р.).
7. How supermarkets and grocery stores contribute to food waste. *ONE 5C*: веб-сайт. URL: <https://one5c.com/food-waste-supermarkets-136944209/>, (дата звернення: 8 квітня 2024 р.).

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОВЕДЕННЯ СОРТУВАЛЬНИХ АНАЛІЗІВ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ В УКРАЇНІ ТА АВСТРІЇ

Ілляш О.Е.¹, Серга Т.М.¹, Бредун В.І.¹, Чепурко Ю.В.², Максютя Н.С.¹

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
пр. Першотравневий, 24, 36011, м. Полтава

²Філія дочірньої компанії «УКРГАЗВИДОБУВАННЯ»

Національної акціонерної компанії «Нафтогаз України» УПГТК
вул. Польова, 6, 39420, с. Базиливіщина, Полтавський район, Полтавська область
iloks2504@gmail.com, tetjanaserga@gmail.com,
bvi37h@gmail.com, juliakorzh2003@gmail.com, mns7000@yahoo.com

Дана робота присвячена вирішенню одного із найбільш важливих завдань для України в рамках її євроінтеграції – розбудові дієвої системи управління побутовими відходами, починаючи з рівня місцевих територіальних громад до рівня регіонів й держави. Реалізація даного завдання здійснено у декілька етапів, першим з яких є вивчення досвіду європейських країн у цьому напрямку, проведення власних досліджень й накопичення відповідної бази даних про морфологічний (компонентний) склад побутових відходів з виявленням переважаючих видів потенційної вторинної сировини. Для цієї мети авторами даної роботи здійснено детальний аналіз методологічних підходів до проведення сортувальних аналізів побутових відходів, що використовуються в Європі, зокрема європейської специфікації й окремих рекомендацій «Methodology for the Analysis of Solid Waste» (SWA-Tool) й «Sorting catalogue» (Annex I) та окремих положень методології Австрії «Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen», а також «Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу побутових відходів», що були діючими в Україні з 2010 року й нових Методичних рекомендацій, введених у дію з 03.05.2024 року. Проведений аналітичний огляд існуючих методологій, а також проведена серія власних досліджень (сортувальних аналізів) компонентного складу твердих побутових відходів на території обраної Котелевської громади Полтавської області, й отримання відповідного практичного досвіду дозволили виконати порівняльний аналіз українських Методичних рекомендацій з європейськими методологіями за кожним з їх 20-ти правил. В ході аналізу були визначені сильні й слабкі сторони української методології, що сприяють або обмежують застосування правил європейської методології в умовах України, та на їх основі сформувані рекомендації щодо можливості адаптації на даний час в українських умовах окремих правил європейської методології. *Ключові слова:* тверді побутові відходи, морфологічний (компонентний) склад побутових відходів, сортувальний аналіз відходів, методичні рекомендації з визначення складу відходів.

Comparative analysis of methodological approaches to sorting household waste in Ukraine and Austria. Illiash O., Serga T., Bredun V., Chepurko Yu., Maksyuta N.

This paper is dedicated to solving one of the most important issues for Ukraine within the framework of its European integration – the development of an effective household waste management system, starting from the level of local communities to the level of regions and the state. The implementation of this task has been carried out in several stages, the first of which is to study the experience of European countries in this area, conduct its research and accumulate a relevant database on the morphological (component) composition of household waste with the identification of the most common types of potential secondary raw materials. For this purpose, the authors of this paper have carried out a detailed analysis of methodological approaches to sorting analyses of household waste used in Europe, in particular, the European specification and certain recommendations “Methodology for the Analysis of Solid Waste” (SWA-Tool) and “Sorting catalogue” (Annex I) and certain statements of the Austrian methodology “Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen”, as well as the “Methodological Recommendations for Determining the Morphological Composition of Household Waste”, which have been in force in Ukraine since 2010, and the new Methodological Recommendations, which came into operation on 03. 05.2024. The analytical review of existing methodologies, as well as a series of own studies (sorting analyses) of the component composition of solid waste in the selected Kotelevska community of Poltava region, and the relevant practical experience, allowed to perform a comparative analysis of the Ukrainian Methodological Recommendations with European methodologies for each of its 20 rules. The analysis identified the strengths and weaknesses of the Ukrainian methodology that promote or limit the application of the European methodology rules in Ukraine, and on its basis, formulated recommendations on the possibility of adapting certain rules of the European methodology to the Ukrainian conditions. *Key words:* municipal solid waste, morphological (component) composition of municipal waste, sorting analysis of waste, methodological recommendations for determining the composition of waste.

Постановка проблеми. Проблема відходів в Україні вирізняється особливою масштабністю і значимістю як внаслідок домінування в економіці країни ресурсоемних багатовідхідних технологій, так і через відсутність протягом тривалого часу ефективних управлінських рішень у даній сфері.

Зокрема, домінуючим способом поводження з побутовими відходами залишається їх вивезення та захоплення на полігонах та сміттєзвалищах. Крім того, відсутність системи перероблення (у тому числі ефективної системи роздільного збирання) побутових відходів призводить до втрати значних обсягів

ресурсоцінних матеріалів, що містяться у відходах, які потенційно можуть бути введені у господарський обіг. Тому на національному рівні в Україні визначено, що одним із пріоритетів є розвиток роздільного збирання та перероблення відходів, із задіянням європейського досвіду у цій сфері задля підвищення ефективності використання природних ресурсів і переходу до циркулярної економіки [1].

Актуальність дослідження. На місцевому рівні, тобто на рівні територіальних громад, проблеми, пов'язані з утворенням, збиранням, обробленням й захороненням побутових відходів, мають найбільшу актуальність й схожу специфіку, що характерна для кожного регіону України [2, 3]. Відповідно розбудова дієвої системи управління побутовими відходами (ПВ) на місцевих рівнях потребує наявності даних щодо компонентного (морфологічного) складу побутових відходів з виявленням переважаючих видів потенційної вторинної сировини [4, 5].

Для цієї мети з 2023 року розпочалося співробітництво між University of Natural Resources and Life Sciences (Vienna, Австрія) та Національним університетом «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна), головним завданням якого є виконання протягом 2023–2024 років науково-дослідної роботи з визначення компонентного складу побутових відходів та їх ресурсного потенціалу задля подальшого вибору необхідної інфраструктури збирання, перевезення та оброблення побутових відходів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження авторів даної роботи щодо вивчення складу твердих побутових відходів та удосконалення методологічних підходів до проведення їх сортувальних аналізів були розпочаті з 2016 року на стадії розроблення «Субрегіональної стратегії поводження з твердими побутовими відходами для Полтавської області» [2]. Базові результати були використані при створенні Стратегія розвитку Полтавської області 2021–2027 [6].

Насьогодні дослідження авторів роботи, що продовжуються в партнерстві з європейськими колегами, стали частиною наукової складової, що покладена в основу проєкту «Регіонального плану управління відходами у Полтавській області до 2030 року» [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі відомих в Україні літературних, інформаційних джерел та наукових статей за останні десять років був проведений огляд результатів опублікованих досліджень, спрямованих на визначення компонентного складу побутових відходів та проведення сортувальних аналізів [3, 4, 5, 7, 12]. Окрема увага була приділена збору, систематизації та аналізу відомих результатів досліджень компонентного складу ПВ в містах України [7] та окремо в громадах Полтавської області [3, 4, 5].

Важливо моментом є те, що від достовірності даних про склад побутових відходів значно залежить

раціональність вибору управлінських рішень щодо поводження з відходами на місцевому рівні. Саме тому питання пошуку й вибору загальноприйнятого методу компонентного аналізу твердих відходів має все більшу актуальність.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Дослідження, присвячені компонентному складу твердих побутових відходів, на результатах яких ґрунтується дана стаття, проводилися декількома етапами.

Першочергово був виконаний збір й аналіз існуючих даних щодо складу побутових залишкових відходів, які утворюються в населених пунктах України та Австрії з різною соціально-демографічною специфікою.

Наступним етапом даної роботи було проведення серії сортувальних аналізів твердих побутових відходів на території обраної Котелевської громади Полтавської області протягом 2023–2024 років. Сортувальні аналізи здійснювалися із урахуванням методичних рекомендацій України [8, 9] та окремих положень «Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaysen» (Австрія) [10].

Отримані результати даних етапів робіт виявили необхідність перегляду та розширення класифікаційних категорій компонентів побутових відходів для отримання більш об'єктивних даних про їх склад. Крім того, при проведенні сортувальних аналізів згідно українських Методичних рекомендацій [8, 9] була виявлена недостатність регламентованих правил щодо підготовки до самої процедури сортувальних аналізів.

Таким чином, результати перших етапів проведених досліджень засвідчили необхідність здійснення перегляду й удосконалення української методики з визначення морфологічного (компонентного) складу твердих побутових відходів, з точки зору:

- встановлення чітких правил щодо планування процедури проведення сортувальних аналізів;
- уточнення переліку обов'язкових компонентів, що повинні відокремлюватись із загальної маси побутових відходів і які будуть більш об'єктивно представляти типовий сучасний компонентний склад побутових відходів.

Новизна даної роботи полягає:

- в оприлюдненні даних про компонентний (морфологічний) склад побутових відходів, характерний для населених пунктів України селищного типу, що отримані на основі проведених натурних досліджень (сортувальних аналізів) побутових відходів в усі чотири сезони року із урахуванням положень європейських [10, 11] та українських Методичних рекомендацій [8, 9];
- у розробці рекомендацій для умов України щодо необхідності застосування чітких стандартизованих правил та відповідного здійснення уніфікації методології сортувальних аналізів побутових

відходів, а також розширення переліку компонент, за яким необхідно проводити сортувальні аналізи, що забезпечить більшу об'єктивність отриманих даних сортувальних аналізів.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Однією з головних результативних складових даної роботи є проведений аналіз методологічних підходів до сортувальних аналізів побутових відходів, що виконуються в Європі, зокрема в Австрії згідно «Methodology for the Analysis of Solid Waste» (SWA-Tool) [11] та «Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaysen» [10], та в Україні згідно [8, 9], зокрема в практичній площині шляхом проведення тестових сортувальних аналізів змішаних побутових відходів в умовах селища Котельва Полтавської області у чотири сезони року. Одержані результати даного аналізу дали можливість зробити перші висновки й сформувані рекомендації для умов України щодо необхідності здійснення уніфікації методології сортувальних аналізів побутових відходів, які можуть бути основою розробки українських «Настанов з планування та проведення сортувальних аналізів побутових відходів».

Виклад основного матеріалу. Результати систематизації та аналізу даних щодо компонентного складу побутових відходів, які утворюються в населених пунктах України, свідчать про епізодичність та не системність досліджень даного напрямку. Відповідно дані про склад побутових відходів мають значний діапазон коливань вмісту у загальній масі за більшістю компонентів [7], а саме: органічних відходів – 27–65%, паперу і картону – 2,5–14,3%, полімерів – 9,4–29,4%, скла – 6,3–14,3%, текстилю – 0,3–10,2%, залишку ПВ – 2,9–32%.

Виділеними факторами, що можуть впливати на коливання складу побутових відходів, є наступні:

- характеристики типовості громад (муніципалітетів): демографічні показники громади, структура забудови й житлового фонду, специфіка соціально-побутової та промислово-господарської сфери, існуюча система збору побутових відходів тощо;

- сезонна залежність утворення органічних відходів і відходів садівництва, що складають значний відсоток від загальної маси побутових відходів, та відсутність застосування сталої практики їх відокремленого збирання;

- ретельність вибору для даного дослідження репрезентативних контейнерних майданчиків, розташованих на території муніципалітету з типовим для нього видом благоустрою житлового фонду;

- наявність розташування в зоні дослідження соціально-адміністративних будівель чи торговельних установ, для який характерно утворення значної кількості відходів різноманітних пакувальних матеріалів, що призводить до зростання частки відходів паперу, полімерів, скла тощо;

- врахування при виборі періоду досліджень складу побутових відходів: господарської специфіки

та сезонних традицій ведення домогосподарства, характерних для певного муніципалітету, планованих масових подій чи традиційних свят, кліматичні характеристики місцевості;

- наявність або відсутність поблизу досліджуваних ділянок пунктів приймання вторинної сировини, окремо розташованих контейнерів для певних фракцій вторсировини (скло, пластик, папір) та наявність організованих площадок для відокремленого збирання «зелених» відходів (садівництва) та ремонтно-будівельних відходів.

Дослідження морфологічного складу ПВ (сортувальні аналізи) згідно Методичних рекомендацій, що були діючими з 2010 року [8], здійснювалися з відділенням 10 обов'язкових компонентів: 1) харчові відходи (овочі, фрукти, відходи садівництва тощо); 2) папір та картон; 3) полімери (пластик, пластмаси); 4) скло; 5) чорні метали; 6) кольорові метали; 7) текстиль; 8) дерево; 9) небезпечні відходи (батареї, сухі та електролітичні акумулятори, тара від розчинників, фарб, ртутні лампи, телевізійні кінескопи тощо); 10) кістки, шкіра, гума) та 11 компонента – залишку ПВ після вилучення компонентів (дрібне будівельне сміття, каміння, вуличний змет тощо). Згідно нових Методичних рекомендацій, що введені в дію з 03.05.2024 року [9] з переліку 10 обов'язкових компонентів були відокремлені 3 види відходів: 1) комбінована упаковка (упаковка, яка може містити в собі різні поєднання, наприклад, картон та метали); 2) відходи електричного та електронного обладнання (телефони, комп'ютери, телевізори, холодильники, праски, радіопристрої тощо); 3) відходи батарей та акумуляторів (пальчикові, автомобільні тощо). Таким чином, на сьогодні в Україні рекомендується здійснювати сортувальні аналізи за для визначення складу побутових відходів за 14 компонентами [9].

В ході досліджень виявлено, що в українських рекомендаціях [8, 9] не визначені вимоги щодо необхідного розміру вибірки (кількості проб), які повинні підлягати дослідженню, в залежності від типу населеного пункту (типу соціально-демографічної стратифікації), для якого здійснюються дані дослідження, та в залежності від цілей самих досліджень. На думку авторів даної роботи, саме це є основною причиною суттєвої розбіжності даних вмісту окремих компонентів у загальній масі ПВ [4, 5, 7].

Для подальшого удосконалення українських Методичних рекомендацій з визначення складу побутових відходів [9] логічним є вивчення та врахування європейського досвіду проведення сортувальних аналізів, зокрема європейської специфікації й окремих рекомендацій «Methodology for the Analysis of Solid Waste» (SWA-Tool) та «Sorting catalogue» (Annex I) [11], та положень методології Австрії «Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaysen» [10].

Важливо, що австрійські Методичні рекомендації [10] були розроблені на основі європейської [11]

як методологія, яка може використовуватись як на міжрегіональному рівні (загальнонаціональний), так й на регіональному рівні (адміністративний округ або район). Дані Методичні рекомендації містять 20 правил, якими встановлюються мінімальні вимоги, що необхідно враховувати та дотримуватися при плануванні, реалізації аналізів сортування залишкових відходів та оцінці їх результатів.

В рамках співробітництва між University of Natural Resources and Life Sciences (Vienna, Австрія) та Національним університетом «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна) й сумісного виконання науково-дослідної роботи з тематики «Дослідження складу твердих побутових відходів та їх ресурсного потенціалу» було проведено аналіз кожного з 20 правил Методичних рекомендацій [10] з точки зору можливості їх застосування для планування й проведення сортувальних аналізів в умовах України та надані відповідні рекомендації щодо їх адаптації в законодавство України.

Перший практичний досвід застосування окремих положень Методичних рекомендацій [10] в умовах України був отриманий в ході проведення сортувальних аналізів побутових відходів в Котелевській громаді Полтавської області у період 2023–2024 роки, зокрема враховувався додаток до [10] «Каталог сортування та список призначень», згідно якого сортувальні аналізи залишкових побутових відходів здійснюються за 15 обов'язковими групами компонентів, з яких рекомендовано відокремлювати ще 9 підгруп першої категорії.

Проведення вище зазначених етапів досліджень дало можливість виділити сильні й слабкі сторони, що сприяють або обмежують застосуванню кожного із 20-ти правил австрійських Методичних рекомендацій [10] при проведенні сортувальних аналізів побутових відходів в умовах України.

Сильні сторони, що аналізувалися, акцентують увагу на можливостях повного або переважного дотримання даного правила при здійсненні українськими дослідниками сортувальних аналізів змішаних твердих побутових відходів на контейнерних майданчиках.

Слабкі сторони – це виділення існуючих проблемних питань, які не дозволяють застосувати дане правило у повній мірі в умовах сортувальних аналізів, виходячи із специфіки збирання побутових відходів в Україні.

Результати порівняльного аналізу головних положень «Методичних рекомендацій щодо проведення сортування залишкових відходів» («Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen») Австрії [10] та «Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу побутових відходів» України [9] відображені в таблиці 1.

Головні висновки. Отримані результати на кожному з етапів дослідження та ознайомлення із досвідом Австрії щодо процедури проведення сор-

тувальних аналізів побутових відходів дозволили сформулювати наступні рекомендації:

1. **Розширити перелік компонентів** твердих побутових відходів, за яким необхідно проводити сортувальні аналізи, враховуючи оновлену класифікацію в п.8 Методичних рекомендацій 2024 року [9], а саме, додатково здійснювати відокремлення із загальної маси відходів:

- органіки (відходів садівництва, відходів від обслуговування зелених насаджень), що дозволить планувати окрему підсистему збирання й обліку даних ресурсоцінних відходів;

- різних видів пластику: пластикової тари, пластикового легкого упакування, іншого пластику й пластмас, що передбачає подальше планування відповідних технологічних циклів (потужностей) з їх перероблення;

- різних видів відходів скла: скляної тари (за кольоровою ознакою) та іншого скла (побутового, будівельно-ремонтного), які є цінною вторинною сировиною, що мають різні техніко-економічні показники при передачі на перероблення;

- засобів гігієни, вміст яких постійно збільшується, вони мають високу вологість, є санітарно небезпечними, що необхідно враховувати при виборі подальших технологічних рішень.

2. **Здійснити уніфікацію методології** планування та проведення сортувальних аналізів побутових відходів, враховуючи наступні першочергові правила європейських методологій SWA-Tool [11] й «Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen» [10]:

- *повинні бути визначені чіткі цілі*, за для яких потрібно здійснити сортувальні аналізи змішаних побутових відходів. Дані цілі повинні бути максимально коректно адаптовані до відповідних інформаційних потреб (наприклад, оцінка потенціалу відходів, моніторинг реалізації «Місцевих планів управління відходами», порівняльний аналіз систем збирання побутових відходів тощо) та початкових соціально-економічних і демографічних умов в громадах (згідно Правилу № 2);

- в залежності від цілей сортування необхідне *визначення оптимального розміру вибірки* (кількості проб) побутових відходів, яка дозволить забезпечити необхідний рівень довірчого інтервалу отриманих осереднених результатів сортування (згідно Правилу № 1). Прикладом може слугувати методика фахівців University of Natural Resources and Life Sciences (Vienna), яка застосовується при плануванні сортувальних аналізів в Австрії;

- сортувальні аналізи слід планувати й проводити з *урахуванням соціально-економічної стратегії*, тобто на рівні громад (муніципалітетів) щонайменше на трьох рівнях (міському, селищному та сільському), якщо на досліджуваних територіях існують чіткі відмінності щодо щільності населення, розмірів домогосподарств, структури забудови та

житлового фонду, демографічних показників, специфіки промислово-господарської та соціально-побутової сфери. За необхідності, туристичні муніципалітети (незалежно від поділу на міські та сільські райони) можуть бути визначені як додатковий рівень (згідно Правила № 3);

– обов'язково при плануванні аналізу сортування слід враховувати сезонну стратифікацію: щонайменше два й рекомендовано чотири сезони (згідно українських Методичних рекомендацій [9]). При плануванні аналізу слід уникати часових періодів з кліматичними коливаннями, що є нетиповими для періоду року в даній місцевості, святкових періодів або одноразових соціально-культурних подій. Незалежно від кількості врахованих сезонів рекомендується проводити аналізи принаймні наприкінці зими (березень/квітень) або наприкінці літа

(вересень/жовтень). Якщо можна довести, що немає значної сезонної різниці між циклами аналізу (на основі попередніх аналізів), допускається проведення одного циклу аналізу (згідно Правила № 4).

Перспективи використання результатів дослідження. Результати даних досліджень можуть бути покладені в основу розроблення й застосування чітких стандартизованих правил планування й проведення сортувальних аналізів для визначення компонентного (морфологічного) складу побутових відходів та подальшої можливості створення українських «Настанов з планування та проведення сортувальних аналізів побутових відходів», враховуючи досвід європейського та австрійського методологічних підходів «Methodology for the Analysis of Solid Waste» (SWA-Tool) [11] й «Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen» [10].

Таблиця 1

Порівняння головних положень Методичних рекомендації з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів Австрії та України

Методичні рекомендації Австрії «Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranalysen» [10]	Ступінь відповідності Методичних рекомендацій Австрії та України	Методичні рекомендації з визначення морфологічного складу побутових відходів, Україна [9]
Правило 1: Рівень довіри	ЧВ	р. II, п. 4, пп.4; р. III, п. 10, пп.5
Правило 2: Слідчі питання	ЧВ	р. I, п. 4, 5, 6
Правило 3: Регіональна стратифікація	ВВ	---
Правило 4: Сезонна стратифікація	ПВ	р. I, п. 7
Правило 5: Максимальна кількість страт	ЧВ	р. II, п. 2; р. III, п. 2
Правило 6: Поділ населення	ЧВ	---
Правило 7: Рівень доступу для відбору проб	ЧВ	р. I, п. 9
Правило 8: Одиниця відбору проб: об'єм	ЧВ	маса (кг)
Правило 9: Розмір зразка : 240 літрів	ВВ	р. II, п. 2, п. 4, пп.5; р. III, п. 2, п. 10, пп.4
Правило 10: Агрегація мішків і дрібної тари	ВВ	---
Правило 11: Неоднорідність за фракціями	ВВ	---
Правило 12: Розмір вибірки, необхідний для визначення фракцій чистої упаковки брутто-нетто	ЧВ	р. II, п. 3 р. III, п. 9
Правило 13: Визначення кількості вибірок муніципалітетом шляхом стратифікованої випадкової вибірки	ВВ	---
Правило 14: Випадковий відбір вибірок у межах муніципалітетів	ВВ	---
Правило 15: Відбракування зразків та документування відбору проб	ЧВ	Додаток 2, Додаток 3
Правило 16: Відбір проб з великих контейнерів (>240 літрів)	ЧВ	р. II, п. 2; р. III, п. 2
Правило 17: Сортування фракцій відходів	ЧВ	р. I, п. 8
Правило 18: Максимальна частка для неідентифікованих залишків сортування	ВВ	---
Правило 19: Контроль маси проби на зразок	ПВ	р. II, п. 5; р. III, п. 10
Правило 20: Оцінка результатів	ЧВ	р. II, п. 5; р. III, п. 10, пп.5
Додаток «Каталог сортування та список призначень»	ЧВ	Додаток 2, Додаток 3

Примітка: ВВ – відсутність відповідності; ЧВ – часткова відповідність; ПВ – повна відповідність.

Література

1. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 8 лист. 2017 р. № 820-р. URL: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80/page> (дата звернення: 08.09.2024).
2. Субрегіональна стратегія поводження з твердими побутовими відходами для Полтавської області: проєкт «Реформа управління на сході України» «Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH», представлено для Полтавської обласної державної адміністрації, GFA Consulting Group, січень, 2016. 83с.
3. Регіональний план управління відходами у Полтавській області до 2030 року: проєкт. URL: <https://www.adm-pl.gov.ua/advert/oprilyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu-regionalniy-plan-upravlinnya-vidhodami-u-poltavskiy-> (дата звернення: 08.09.2024).
4. Комплексна програма поводження з твердими побутовими відходами у Полтавській області на 2022-2030 роки: проєкт. Полтава, 2022. 268с. URL: <https://www.adm-pl.gov.ua/advert/oprilyudnennya-dlya-obgovorennya-proektu> (дата звернення: 08.09.2024).
5. Ілляш О. Е., Голік Ю. С. Дослідження ресурсного потенціалу побутових відходів у Полтавській області. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2023. Вип. 39(1–2). С. 47–54.
6. Стратегія розвитку Полтавської області 2021–2027: Рішення Пленарного засідання п'ятої сесії обласної ради восьмого скликання від 6 черв. 2021 р. № 188. URL: <https://poda.gov.ua/documents/138471> (дата звернення: 09.09.2024).
7. Iliash O., Holik Yu., Allesch As., Chepurko Iu., Serha T. Analysis of studies on the morphological composition of domestic waste in Ukraine. *Environmental Problems. Екологічні проблеми*. 2023. Vol. 8, № 4. P. 241–246.
8. Про затвердження Методичних рекомендацій з визначення морфологічного складу твердих побутових відходів: Наказ Міністерства з питань житлово-комунального господарства від 16 лют. 2010 р. № 39. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0039662-10#Text> (дата звернення: 09.09.2024).
9. Методичні рекомендації з визначення морфологічного складу побутових відходів: Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 3 трав. 2024 р. № 409. URL: <https://mtu.gov.ua/documents/2485.html> (дата звернення: 10.09.2024).
10. Leitfaden für die Durchführung von Restmüll-Sortieranaysen : September 2017 (original) / Oktober 2021 (adaptiert) / Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Wien.
11. Methodology for the Analysis of Solid Waste. SWA-Tool. Verfügbar unter. URL: <https://www.wien.gv.at/meu/fdb/pdf/swa-tool-759-ma48.pdf> (дата звернення: 10.09.2024).
12. Голік, Ю. С., Ілляш, О. Е., Монастирський, О. М., Чепурко, Ю. В., Серга, Т. М. Оцінка енергоресурсного потенціалу територіальних громад Полтавської області як складової енергетичної безпеки. *The 3rd International scientific and practical conference «Scientific research in the modern world» (January 12-14, 2023) Perfect Publishing, Toronto, Canada*. С. 205–215.

ОСОБЛИВОСТІ НАЦІОНАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ В УКРАЇНІ

Сорочинська О.Л.

Державний університет інфраструктури та технологій
вул. Кирилівська, 9, 04071, м. Київ
ellena06.84@ulr.net

Одним із ключових принципів внутрішньої і зовнішньої політики України є збереження навколишнього природного середовища та його компонентів, які є необхідними для виживання людства, для нинішнього і майбутніх поколінь. Для досягнення цієї мети Україна визнає екологічну безпеку одним з основних напрямів політики національної безпеки України. За своєю суттю, національна екологічна політика спрямована, зокрема, на розв'язання існуючих екологічних проблем, що мають негативні екологічні, соціальні та економічні наслідки, запобігання їх виникненню та поширенню.

Розвиток виробництва та зростання економічної активності призвели до збільшення кількості природних ресурсів, що використовуються людиною у виробничому процесі, збільшуючи антропогенний тиск на навколишнє середовище та порушуючи баланс природного середовища. Разом з виснаженням не відновлюваних сировинних та енергетичних ресурсів зростає забруднення навколишнього середовища, особливо води і повітря, зменшуються площі лісів і родючих земель, зникають окремі види рослин і тварин. Все це в кінцевому підсумку підриває природно-ресурсний потенціал суспільного виробництва і негативно впливає на здоров'я людей. Концептуальні засади сталого розвитку передбачають запровадження певної системи базових підходів до екологізації та гуманізації економічної та соціальної діяльності. Використання недосконалих технологічних процесів у промисловості та недостатня комплексність сировинної бази, а також значне зростання чисельності населення при одночасному підвищенні якості життя призвели до утворення великої кількості промислових та побутових відходів. Нова стратегія управління відходами полягає у зменшенні кількості відходів, що утворюються в процесі споживання та виробництва, забезпеченні їх максимальної утилізації та переробки, а також впровадженні ефективних технологій поводження з відходами. На підтримку європейських стандартів і принципів управління відходами Україна затвердила Національну стратегію управління відходами. Прийняття стратегії на національному рівні було зумовлене підписанням Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, яка зобов'язує Україну інтегрувати світові стандарти в національне законодавство. Національна стратегія спрямована на впровадження принципів і методів циркулярної економіки та переорієнтацію країни на сучасні та екологічно безпечні практики поводження з відходами. *Ключові слова:* поводження з відходами, стратегія, утилізація відходів, рециклінг, управління, екологічна політика, сталий розвиток.

Features of the national waste management strategy in Ukraine. Sorochynska O.

One of the key principles of the domestic and foreign policy of Ukraine is the preservation of the natural environment and its components, which are necessary for the survival of humanity, for current and future generations. To achieve this goal, Ukraine recognizes environmental security as one of the main directions of Ukraine's national security policy. In its essence, the national environmental policy is aimed, in particular, at solving existing environmental problems that have negative ecological, social and economic consequences, preventing their occurrence and spread.

The development of production and the growth of economic activity have led to an increase in the number of natural resources used by humans in the production process, increasing anthropogenic pressure on the environment and disrupting the balance of the natural environment. Along with the depletion of non-renewable raw and energy resources, environmental pollution, especially water and air, is increasing, the areas of forests and fertile lands are decreasing, and certain species of plants and animals are disappearing. All this ultimately undermines the natural resource potential of social production and negatively affects people's health. The conceptual principles of sustainable development provide for the introduction of a certain system of basic approaches to environmentalization and humanization of economic and social activities. The use of imperfect technological processes in industry and the insufficient complexity of the raw material base, as well as a significant increase in the population with a simultaneous increase in the quality of life, led to the formation of a large amount of industrial and household waste. The new waste management strategy consists in reducing the amount of waste generated in the process of consumption and production, ensuring its maximum utilization and recycling, as well as implementing effective waste management technologies. In support of European standards and principles of waste management, Ukraine approved the National Waste Management Strategy. The adoption of the strategy at the national level was conditioned by the signing of the Association Agreement between Ukraine and the EU, which obliges Ukraine to integrate world standards into national legislation. The national strategy is aimed at implementing the principles and methods of the circular economy and reorienting the country to modern and environmentally safe waste management practices. *Key words:* waste management, strategy, waste disposal, recycling, management, environmental policy, sustainable development.

Постановка проблеми. Відходи, побічний продукт нашої діяльності, вже є серйозним тягарем для українського суспільства та довкілля. Мабуть, досягненням є те, що Україна відкрила очі і почала замислюватися над тим, як кожен з нас може вплинути

на майбутнє, просто змінивши своє ставлення до поводження з відходами. Сьогодні українці щорічно продукують майже 12 мільйонів тонн твердих побутових відходів. Всім зрозуміло, що стан утворення, накопичення, зберігання, переробки та утилізації

відходів завдає шкоди навколишньому середовищу в Україні. Ситуація, що склалася в Україні у сфері техногенної, екологічної та промислової безпеки, становить загрозу національній безпеці та безпечному виживанню. Основними факторами, що зумовлюють цю загрозу, є незворотне виснаження природних ресурсів, стрімке зростання обсягів утворення та накопичення відходів, а також відсутність ефективних технологій утилізації відходів як вторинної сировини. Це є наслідком дисбалансу між технологічною та антропогенною діяльністю в Україні. Ситуація, спричинена вищезазначеними умовами, досягла критичної межі і вимагає негайної зміни стратегії індустріального та соціального розвитку, притаманної сучасній Україні, на постіндустріальну та відмови від нехтування природним довкіллям.

Актуальність дослідження. Проблема, на вирішення якої спрямована Національна стратегія управління відходами, полягає у необхідності розв'язання критичної ситуації, що склалася у сфері утворення, накопичення, зберігання, оброблення, утилізації та видалення відходів, яка характеризується подальшим зростанням екологічних загроз. Проблема відходів в Україні є особливо масштабною і значущою як через домінування в національній економіці ресурсоемних багатовідхідних технологій, так і через відсутність адекватного реагування на цей виклик протягом тривалого часу. Значні масштаби спеціалізації використання ресурсів, енергії та сировини в національній економіці та застаріла технологічна база визначали і продовжують визначати високі темпи утворення та накопичення відходів. В Україні понад 90% побутових відходів захоронюється на полігонах і лише 3,2% переробляється, що не відповідає європейським стандартам. Така ситуація призвела до поглиблення екологічної кризи та погіршення соціально-економічної ситуації, а вся правова та економічна система, що регулює використання природних ресурсів загалом та поводження з відходами зокрема, потребує реформування та розвитку з урахуванням національного та міжнародного досвіду. Проблема відходів є однією з ключових екологічних проблем і найбільш критичною з точки зору ресурсів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Питання, пов'язані з розробкою ефективних механізмів та методів управління і поводження з відходами є нагальними у сьогоденні, чим і обумовлена дослідженнями в цій галузі великої кількості науковців. Дана проблематика висвітлена наукових працях Є. Михайлової, Г. Панчевої, Г. Резніченко, В. Погребенника, І. Коваль, Е. Джумеля, М. Вадівала, М. Вагнагі, В. Бабаєв, В. Панов, Я. Хайло, М. Горох, І. Коцюба, І. Пацева, О. Герасимчук, А. Кагукіна [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Виклад основного матеріалу. Високий рівень утворення відходів та низькі показники їх використання як вторинної сировини призвели до того, що

в Україні щороку в промисловості та комунальному секторі нагромаджуються значні обсяги твердих відходів, з яких лише незначна частина застосовується як вторинні матеріальні ресурси, решта потрапляють на звалища. Відмінність ситуації, що склалася з відходами в Україні, порівняно з іншими розвинутими країнами полягає у великих обсягах утворення відходів та у відсутності інфраструктури поводження з ними. При цьому наявність такої інфраструктури є неодмінною ознакою всіх економік розвинутих країн.

Обсяги утворення відходів від економічної діяльності і в домогосподарствах України у 2022 році становили 366 млн. т або 8616 кг на одну особу. Більша частина відходів утворюється від видобувної промисловості. Побутові відходи складають, орієнтовно, 2,5% від загальної кількості відходів. За даними Мінрегіону, в Україні щороку утворюється близько 52 млн.м³ побутових відходів, або близько 10 млн. тон [7].

У територіальному розрізі для України саме промислово розвинені регіони формують найбільшу кількість відходів. Так, у 2022 році у Центральному регіоні утворилося майже 78% всіх відходів країни, у Східному 11%, у Південному – 8%. Найменше відходів створюють Північний (1%) і Західний (2%) регіони (рис. 1).

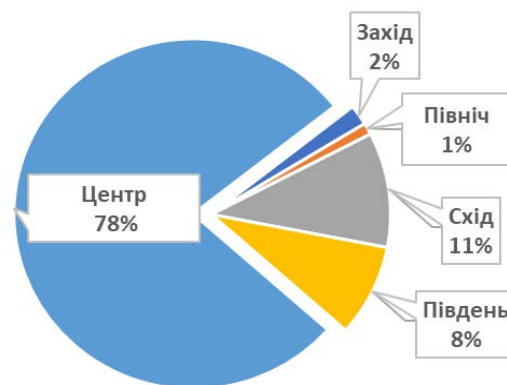


Рис. 1. Утворення відходів за регіонами України, 2022 р. [7]

Загалом система управління відходами в Україні характеризується такими тенденціями:

- накопичення відходів як у промисловому, так і побутовому секторі, що негативно впливає на стан навколишнього природного середовища і здоров'я людей;
- здійснення неналежним чином утилізації та видалення небезпечних відходів;
- розміщення побутових відходів без урахування можливих небезпечних наслідків;
- неналежний рівень використання відходів як вторинної сировини внаслідок недосконалої організаційно-економічних засад залучення їх у виробництво;

– неефективність впроваджених економічних інструментів у сфері поводження з відходами.

Значні обсяги накопичених в Україні відходів та відсутність ефективних заходів, спрямованих на запобігання їх утворенню, утилізації, знешкодження та видалення, поглиблюють екологічну кризу і стають гальмівним фактором розвитку національної економіки.

У цьому контексті необхідно створити та забезпечити належне функціонування національної системи запобігання утворенню, збирання, оброблення, перероблення, утилізації, знешкодження та екологічно безпечного захоронення відходів. Це є нагальним завданням, навіть в умовах, коли економічні можливості держави та основних виробників відходів є відносно обмеженими. Тому єдиним рішенням у цій ситуації є створення комплексної системи управління відходами. Вирішення цієї проблеми має важливе значення для енергетичної та ресурсної незалежності країни, збереження природних матеріалів та енергетичних ресурсів і є невідкладним стратегічним завданням (пріоритетом) державної політики.

8 листопада 2017 року Кабмін затвердив «Національну стратегію управління відходами до 2030 року», яку підготувала робоча група за участю українських профільних міністерств – Мінприроди, Мінекономрозвитку, Мінрегіону, експертів німецької групи GIZ, ЄБРР та проекту «Twinning» [8]. Національна стратегія поводження з відходами визначає головні напрями державного регулювання у сфері поводження з відходами в найближчі десятиліття з урахуванням європейських підходів з питань управління відходами. В ній йдеться про проблему відходів як про масштабну, і таку, яка викликана, в першу чергу, домінуванням в національній економіці ресурсоємних багатовідхідних технологій, а також відсутністю ефективного управління відходами.

Місія прийнятої стратегії полягає у впровадженні європейських принципів управління відходами для всіх видів відходів у найближчі десятиліття: твердих побутових відходів, промислових відходів, будівельних відходів та небезпечних відходів. Метою стратегії є активне використання як традиційних методів (запобігання утворенню відходів, зменшення їх накопичення), так і інноваційних для нашої країни (переробка та повторне використання, а в деяких випадках і переробка відходів), як на національному, так і на регіональному рівнях.

Стратегія передбачає досягнення поставлених цілей у чітко визначений спосіб. Створення незалежної галузі, в якій фахівці перевірятимуть, очищатимуть і визначатимуть придатність продуктів (або їхніх компонентів) для повторного використання без переробки. Це означає, що в найближчому майбутньому на Україну чекає масштабна технологічна модернізація та відмова від споживацького ставлення до природних ресурсів.

9 липня 2023 року набув чинності новий Закон України «Про управління відходами» [9], що кардинально змінює усю систему поводження з відходами та допомагатиме впроваджувати у життя цілі Національної стратегії управління відходами.

Дуже важливим інструментом Стратегії є розширена відповідальність виробників, яка діє за принципом «забруднювач платитиме». Це передбачає, що особи, відповідальні за забруднення в результаті впливу свого виробництва, повинні нести витрати, пов'язані із цим забруднення – для чого виробники упаковки повинні будуть запровадити роздільний збір і максимально заохочувати людей сортувати відходи.

Розширена відповідальність виробників (РВВ) це стратегія додавання всіх екологічних витрат, пов'язаних з товаром протягом усього життєвого циклу товару, до ринкової ціни цього товару. Вперше запропонована у Швеції в 1990 році, оригінальне визначення звучить наступним чином: «РВВ – це стратегія охорони навколишнього середовища для досягнення екологічної мети – зменшення загального впливу продукту на навколишнє середовище, шляхом покладання відповідальності на виробника продукту за весь життєвий цикл продукту, та, особливо, за зворотній збір, рециклінг та остаточне видалення» (рис. 2).



Рис. 2. Схема розширеної відповідальності виробника [10]

Перекладення відповідальності на виробників як забруднювачів є не лише питанням екологічної політики, але й найефективнішим засобом досягнення вищих екологічних стандартів при розробці продукції. Це може відбуватися шляхом ре-дизайну пакування або зменшення його кількості (наприклад, в Україні останнім часом виробники води використовують пляшки із меншою кількістю пластику та тоншими кришечками), продовження гарантії та терміну служби товарів, шляхом постачання запасних компонентів та створення сервісних центрів. Важливим моментом є зменшення токсичності продуктів. Прикладом такого підходу є виконання виробниками Технічного регламенту обмеження використання

свинцю у лакофарбових матеріалах і сировинних компонентах, який затверджено Кабінетом міністрів України у березні 2021 року. Регламент фактично забороняє побутові фарби зі свинцем, що є надзвичайно токсичним елементом [11].

Реалізація стратегії «Розширена відповідальність виробників» визначається у законодавстві кожної країни окремо. Існують різні моделі ресурсних та фінансових механізмів її реалізації. Адаптація їх до місцевих умов має забезпечити досягнення основної мети РВВ – зменшення кількості відходів та негативного впливу на довкілля.

Механізм розширеної відповідальності виробника у поводженні з побутовими відходами в Україні включає в себе:

1) приймання від кінцевих споживачів відходів, що утворилися внаслідок використання продукції, а також подальше управління цими відходами та фінансову відповідальність за таку діяльність;

2) інформування утворювачів відходів, на яких розповсюджується розширена відповідальність виробника, про заходи, які вони можуть здійснювати з метою запобігання утворенню відходів, їх придатності для підготовки до повторного використання та рециклінгу, про наявні системи для приймання та роздільного збирання відходів, що утворилися внаслідок використання продукції;

3) здійснення заходів з розроблення продукції та її складових компонентів з урахуванням мінімізації негативного впливу на навколишнє природне середовище, зменшення обсягів утворення відходів у процесі її виробництва та використання, виробництво довговічної продукції, придатної для ремонту та повторного використання, а також максимальне залучення у виробництво великих обсягів вторинної сировини [11].

Реалізація Національної стратегії управління відходами запланована у три етапи. Так, через 10–13 років заплановано зменшення захоронення відходів на полігонах з 50% до 35%. У 5000 населених пунктах з'явиться роздільний збір, а також відкриються 250 центрів по збиранню відходів споживання. До 2030 року, згідно Стратегії відбудеться зменшення кількості утворення відходів з 95% до 30%, кількості полігонів з 6000 до 300, при цьому ті триста полігонів, які залишаться, будуть переобладнані до вимог директиви ЄС № 1999/31 [12]. Нажаль, зараз жоден український полігон ТПВ не відповідає цим вимогам.

У «Національній стратегії управління відходами в Україні до 2030 року» задекларовано 5-ти ступеневу ієрархію управління відходами, яка діє в Європейському Союзі.



Рис. 3. Ієрархія управління відходами

Національна стратегія визначає головні напрями державного регулювання у сфері поводження з відходами в найближчі десятиліття з урахуванням європейських підходів з питань управління відходами, що базуються на положеннях:

- Директиви Ради № 1999/31/ЄС від 26 квітня 1999 р. «Про захоронення відходів» [12];
- Рамкової Директиви № 2008/98/ЄС Європейського парламенту та Ради від 19 листопада 2008 р. «Про відходи та скасування деяких директив» [13];
- Директиви № 2006/21/ЄС Європейського парламенту та Ради від 15 березня 2006 р. «Про управління відходами видобувних підприємств», та якою вносяться зміни до Директиви 2004/35/ЄС» [14];
- Директиви 94/62/ЄС Європейського парламенту та Ради від 20 грудня 1994 р. «Про упаковку та відходи упаковки» [15];
- Директиви 2012/19/ЄС Європейського парламенту та Ради від 4 липня 2012 р. «Про відходи електричного та електронного обладнання (ВЕЕО)» [16];
- Директиви 2006/66/ЄС Європейського парламенту та Ради від 6 вересня 2006 р. «Про батарейки і акумулятори та відпрацьовані батарейки і акумулятори» [17];
- Директиви 2010/75/ЄС Європейського парламенту та Ради від 24 листопада 2010 року про промислові викиди (комплексне запобігання та контроль забруднення) [18].

Нормативно-правові акти і нормативні документи, що розроблятимуться та прийматимуться в Україні на виконання Національної стратегії, повинні базуватися виключно на принципах і положеннях відповідних актів європейського законодавства.

Законодавство ЄС щодо управління відходами встановлює конкретні цілі щодо збільшення переробки певних потоків відходів, таких як електронне обладнання, транспортні засоби, у яких закінчився термін експлуатації, акумулятори, відходи будівництва та демонтажу, побутові відходи та відходи паку-

вання, а також зменшення кількості біорозкладних відходів, що розміщуються на полігонах. У країнах, де охороні довкілля приділяють велику увагу, обсяги переробки вторинних матеріалів постійно збільшуються. Проте використання відходів для повторного виробництва обмежується їх нестабільними і гіршими порівняно з вихідними властивостями продукту. Кінцева продукція з їх використанням часто не відповідає естетичним та іншим критеріям. Для деяких видів продукції використання вторинної сировини взагалі заборонено діючими санітарними нормами. Наприклад, у багатьох країнах діє заборона на використання деяких вторинних полімерів для виробництва упаковки для їжі. Сам процес отримання готової продукції зі вторинної сировини є дуже складним. Повторне використання утилізованих матеріалів потребує особливого переналаштування параметрів технологічного процесу через те, що вторинний матеріал може змінювати свої фізичні і хімічні властивості, а також може містити інші включення. У деяких випадках до готової продукції пред'являються особливі механічні вимоги, яких просто неможливо дотриматись при використанні вторинної сировини. Тому для використання вторинної сировини необхідно досягти балансу між заданими властивостями кінцевого продукту і середніми характеристиками вторинного матеріалу. Основою для подібних розробок повинна стати ідея створення нових виробів зі вторинної сировини, а також часткової заміни первинних матеріалів вторинними у традиційних виробках.

В середньому у Європейському союзі переробляється близько 66% відходів пакування. Відповідно до

Директиви № 94/62/ЄС Європейського Парламенту і Ради про пакування та відходи пакування не пізніше 31 грудня 2030 року мінімум 70% від ваги всіх відходів пакування буде перероблено (55% пластику; 85% паперу та картону 30% деревини та ін.) [15]. Українська Національна стратегія управління відходами передбачає переробку 15% усіх відходів до 2023 року та 50% у 2030 році. Спеціальні цільові показники по рециклінгу пакування мають бути відображені у майбутньому законі про пакування (упаковку).

Висновки. Реалізація національної стратегії управління відходами сприятиме впровадженню інноваційних систем управління відходами, що забезпечують раціональне використання природних ресурсів, розвитку законодавства у сфері управління відходами згідно з вимогами відповідних європейських директив, якісним змінам у сфері управління відходами відповідно до найкращих природоохоронних практик, поліпшенню санітарно-епідеміологічного стану довкілля та населення і дотриманню вимог екологічної безпеки. Національна стратегія поводження з відходами спрямована на запобігання утворенню нових відходів і підготовку до повторного використання та переробки вже утворених відходів. Тому управління відходами повинно починатися з моменту планування видобутку природних ресурсів як сировини для отримання матеріалів, незалежно від їх джерела, і продовжуватися при проектуванні життєвого циклу корисної продукції. На кожному етапі утворення відходів слід заздалегідь планувати методи і способи повторного використання природних ресурсів і переробки утворених відходів.

Література

1. Михайлова Є.О., Панчева Г.М., Резніченко Г.М. Ефективні механізми поводження з твердими побутовими відходами в Україні. *Комунальне господарство міст*, 2019, том 5, випуск 151, с. 37–44. DOI 10.33042/2522-1809-2019-5-151-37-44
2. Погребенник В.Д., Коваль І.І., Джумеля Е.А. Тенденції розвитку методів і систем управління відходами. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2019. 29(1), с. 78–82. <https://doi.org/10.15421/40290117>
3. Vadivala M., Vagnani M. Integrated solid waste management based on 3R's/ *International journal of advanced research in engineering, science and management (UJARESM)*, 2015. Pp. 1–6.
4. Бабаєв В.М., Панов В.В., Хайло Я.М., Горох М.П. (2017). Комплексна система управління у сфері поводження з твердими побутовими відходами. *Комунальне господарство міст*, 2017. № 130, с. 1–9.
5. Коцюба І.Г., Подчашинський Ю.О., Лико С.М., Лук'янова С.М. Математичне моделювання та прогнозування обсягів накопичення твердих комунальних відходів міста. *Науково-технічний збірник «Вісник Національного транспортного університету»*. Київ, 2017 року. Вип. № 2/2017. С. 34–41.
6. Пацева І.Г., Герасимчук О.Л., Кагукіна А.М системний підхід управління відходами об'єднаних територіальних громад. *Екологічні науки*, 2022. № 4(43), с. 181–184.
7. Статистичний збірник «Довкілля України за 2022 рік» / За ред. О. М. Прокопенко. Державна служба статистики України. К., 2023. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/10/zb_dov_22.pdf
8. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 р. № 820-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
9. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text>
10. Практичні аспекти управління відходами в Україні. Посібник / *Барінов М.О., Олексієвець І.Л., Родная Д.В., Журавель Т.В., Коломієць С.В., Козлова І. А., Пархоменко Г.П.* –К.: «Поліграф плюс», 2021. – 118 с.
11. Про розширену відповідальність виробника товарної продукції у поводженні з побутовими відходами – роз'яснення Мінрегіону <https://ns-plus.com.ua/2019/11/08/minregion-dav-roz-yasnennya-shhodo-vidpovidalnosti-vyrobnyka-tovarnoyi-produktsiyi-u-povodzhenni-z-pobutovymy-vidhodamy/>
12. Директива Ради 1999/31/ЄС від 26 квітня 1999 року про полігони відходів URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_925#Text

13. Директива 2008/98/ЄС Європейського парламенту та Ради від 19 листопада 2008 року про відходи та скасування окремих Директив URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text
14. Директива 2006/21/ЄС Європейського парламенту та Ради від 15 березня 2006 р. про управління відходами видобувної промисловості, та якою вносяться зміни до Директиви 2004/35/ЄС URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_016-06#Text
15. Директиви 94/62/ЄС Європейського парламенту та Ради від 20 грудня 1994 р. «Про упаковку та відходи упаковки» URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_b05#Text
16. Директиви 2012/19/ЄС Європейського парламенту та Ради від 4 липня 2012 р. «Про відходи електричного та електронного обладнання (ВЕЕО)» URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_030-12#Text
17. Директиви 2006/66/ЄС Європейського парламенту та Ради від 6 вересня 2006 р. «Про батарейки і акумулятори та відпрацьовані батарейки і акумулятори» URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/direktiva-2006-66-ec.pdf>
18. Директивою 2010/75/ЄС Європейського парламенту та Ради від 24 листопада 2010 року про промислові викиди (комплексне запобігання та контроль забруднення) URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/%202010_75_%D0%84%D0%A1.pdf

УДК 628.3.03

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.31>

РЕАГЕНТНЕ ОЧИЩЕННЯ ФІЛЬТРАТУ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ЯК ФАКТОР КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

Сталінська І.В., Хандогіна О.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Черноглазівська, 17, 61002, м. Харків
stalinskaairina5@gmail.com, olga.khandogina@kname.edu.ua

Проведено дослідження, спрямоване на оптимізацію реагентної обробки фільтрату полігонів твердих побутових відходів. Виявлено, що відомі рішення не можуть бути безпосередньо використані при розробці технології очищення стічних вод полігонів ТПВ, в першу чергу, через відсутність даних про конкретні параметри обробки, що враховують специфіку хімічного складу фільтрату. Запропоновано математичну модель для визначення оптимальної дози реагенту та значення рН, які сприяють мінімізації показників хімічної і біологічної потреби в кисні (ХПК та БПК), що є інтегральними показниками наявності органічних забруднювачів у оброблюваній воді. В запропонованій моделі дози FeSO_4 і значення рН розглядалися нами як фактори, а ХПК та БПК – як функції відгуку або параметри оптимізації. При цьому факторним простором послужив знайдений на попередньому етапі досліджень інтервал значень $\text{pH}=8,5\div 10,5$. Результати дослідження виявили, що оптимальні параметри реагентного очищення фільтратів полігонів ТПВ, які забезпечують мінімізацію ХПК та БПК, включають дозу FeSO_4 у кількості 3000 мг/дм^3 та значення рН 10,3. Були проведені експериментальні дослідження, результати яких представлені в роботі. Виходячи з наявності широкого діапазону вихідних значень ХПК та БПК, з метою звуження дисперсії відтворюваності, як функції відгуку прийняті відносні значення $\text{ХПК} = \text{ХПК}/\text{ХПК}_0$ та $\text{БПК} = \text{БПК}/\text{БПК}_0$. В роботі представлені ізолінії відносних значень $\text{ХПК}/\text{ХПК}_0$ та $\text{БПК}/\text{БПК}_0$, відповідно. Ізолінії отримані перетином побудованих за розробленими моделями поверхонь відгуку горизонтальними площинами з інтервалом $\Delta Y = 0,01$. Отримані дані можуть бути використані при плануванні очищення фільтратів полігонів, а також при розробці режимів експлуатації обладнання та визначенні оптимальних доз реагентів. Виявлено, що відомі рішення не можуть бути безпосередньо використані при розробці технології очищення стічних вод полігонів ТПВ, в першу чергу, через відсутність даних про конкретні параметри обробки, що враховують специфіку хімічного складу фільтрату. *Ключові слова:* реагентне очищення фільтрату полігонів ТПВ, математична модель, комплексне управління відходами.

Reagent treatment of landfill leachate from municipal solid waste as a factor in comprehensive waste management. Stalinska I., Khandoghina O.

A study was conducted to optimize the reagent treatment of landfill leachate from municipal solid waste. It was found that existing solutions cannot be directly applied to the development of a treatment technology for landfill wastewater, primarily due to the lack of data on specific treatment parameters tailored to the specific chemical composition of the leachate. A mathematical model was proposed to determine the optimal reagent dose and pH value that minimize the chemical oxygen demand (COD) and biological oxygen demand (BOD), which are integrative indicators of the presence of organic pollutants in the treated water. In the proposed model, FeSO_4 doses and pH values were considered as factors, while COD and BOD were treated as response functions or optimization parameters. The factor space was determined based on a pH range of 8.5 to 10.5, identified in a previous stage of the research. The study revealed that the optimal parameters for reagent treatment of landfill leachate, which ensure the minimization of COD and BOD, include an FeSO_4 dose of 3000 mg/L and a pH value of 10.3. Experimental studies were conducted, and the results are presented in the paper. To narrow the reproducibility dispersion, given the wide range of initial COD and BOD values, relative $\text{COD} = \text{COD}/\text{COD}_0$ and $\text{BOD} = \text{BOD}/\text{BOD}_0$ were used as response functions. The paper presents isolines of relative COD/COD_0 and BOD/BOD_0 values, respectively. The isolines were obtained by intersecting the response surfaces constructed based on the developed models with horizontal planes at intervals of $\Delta Y = 0.01$. The obtained data can be used in planning landfill leachate treatment, as well as in developing operational regimes for equipment and determining optimal reagent doses. It was found that existing solutions cannot be directly applied to the development of a treatment technology for landfill wastewater, primarily due to the lack of data on specific treatment parameters that account for the chemical composition of the leachate. *Key words:* reagent purification of SHW landfill filtrate, mathematical model, integrated waste management.

Реагентне очищення води – досить вивчений, поширений у промисловій та комунальній сферах процес. Однак, як показав аналіз наукової літератури [4–5, 10–12], відомі рішення не можуть бути безпосередньо використані при розробці технології очищення стічних вод полігонів ТПВ, в першу чергу, через відсутність даних про конкретні параметри обробки, що враховують специфіку хімічного складу фільтрату. Фільтрат звалищ містить різноманітні

типові забруднювачі, включаючи високу концентрацію гумінових речовин, аміачного азоту, неорганічних солей та різноманітних зважених речовин. Незважаючи на досягнення значного прогресу в удосконаленні технологій очищення стічних вод полігонів ТПВ, критичні проблеми залишаються.

Дана робота присвячена пошуку оптимальних параметрів реагентної обробки стічних вод – дози реагенту і значення рН, при яких будуть забезпечені

Таблиця 1

Результати експериментів щодо очищення фільтрату

Перша серія експериментів	№ точок на рис. 1	FeSO ₄ , мг/дм ³	pH	ХПК мгО ₂ /дм ³	БПК мгО ₂ /дм ³
Вихідні значення: БПК=744,8 мгО ₂ /дм ³ ХПК=1560 мгО ₂ /дм ³	1	1000	9,5	379,47	364,8
	2	500	8,5	504	486,5
	3	500	10,5	535,1	488
	4	1500	8,5	447,58	360
	5	1500	10,5	360,01	123
Друга серія експериментів	№ точок на рис. 1	FeSO ₄ мг/дм ³	pH	ХПК мгО ₂ /дм ³	БПК мгО ₂ /дм ³
Вихідні значення: БПК=1198 мгО ₂ /дм ³ ХПК=2400 мгО ₂ /дм ³	1	1000	9,5	600	486
	2	500	8,5	1400	446,1
	3	500	10,5	1200	273,2
	4	1500	8,5	634,6	480
	5	1500	10,5	634,6	490

Таблиця 2

Перехід від натуральних змінних до кодованих

Фактори		Результати експериментів	
Натуральне позначення	Кодоване позначення	Натуральне позначення	Кодоване позначення
FeSO ₄	X ₁	ХПК мгО ₂ /дм ³	Y ₁
pH	X ₂	БПК мгО ₂ /дм ³	Y ₂

мінімальні величини ХПК і БПК як узагальнених показників наявності в обробленій воді органічних забруднювачів.

Значення ХПК та БПК у стічних водах полігону ТПВ взято з наших попередніх досліджень.

Виходячи зі сформульованого вище завдання цього дослідження, відповідно до термінології, прийнятої в теорії планування експерименту [8–9], дози FeSO₄ і значення pH розглядалися нами як фактори, а ХПК та БПК – як функції відгуку або параметри оптимізації. При цьому факторним простором послужив знайдений на попередньому етапі досліджень [7] інтервал значень pH=8,5÷10,5.

План першого етапу експериментів (2² [1]) представлений точками 1–5 на рис. 1, результати експериментів – у табл. 1, кодоване позначення змінних – табл. 2.

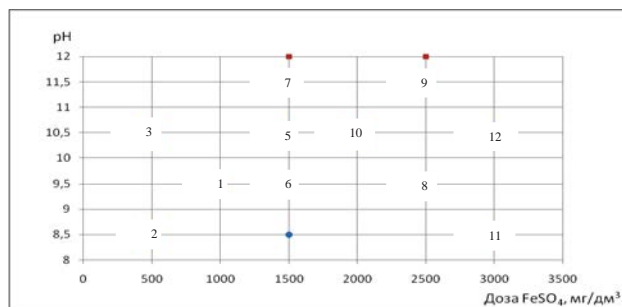


Рис. 1. Область визначення факторів при реагентній обробці

Інтервали варіювання факторів: X₁ (FeSO₄) : Δ₁= 500, X₂ (pH) : Δ₂ = 1.

Кодовані позначення:

$$\bar{X}_{1i} = \frac{X_{1i} - X_{10}}{\Delta_1}, \tag{1}$$

$$\bar{X}_{2i} = \frac{X_{2i} - X_{20}}{\Delta_2}. \tag{2}$$

Наприклад, для точки 3 (рис. 3): $\bar{X}_{12} = \frac{X_{12} - X_{10}}{\Delta_1} = \frac{500 - 1000}{500} = -1$; $\bar{X}_{22} = \frac{X_{22} - X_{20}}{\Delta_2} = \frac{10,5 - 9,5}{1} = 1$. Матриця планування, значення факторів та результати експериментів зведені в табл. 3.

У наведеній матриці введено фіктивний фактор X₀, який необхідний для розрахунку вільного члена в лінійній моделі:

$$Y = b_0 + b_1 \bar{x}_1 + b_2 \bar{x}_2. \tag{3}$$

В результаті обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії (кореляційні моделі процесу):

$$Y_1 = 714,25 - 195,25 \bar{x}_1 - 32,25 \bar{x}_2, \tag{4}$$

$$Y_2 = 393,5 - 30,5 \bar{x}_1 - 50,5 \bar{x}_2. \tag{5}$$

Виходячи з наявності широкого діапазону вихідних значень ХПК та БПК (див. табл. 2), з метою зменшення дисперсії відтворюваності, як функції відгуку прийняті відносні значення ХПК = ХПК/ХПК₀ та БПК = БПК/БПК₀. Таким чином:

$$\bar{Y}_i = \frac{Y_i}{Y_0}, \tag{6}$$

де: Y₀ – початкове значення ХПК; Y_i – значення ХПК після експерименту.

Наприклад, в першій серії експериментів для точки 2 (див. табл. 3): Y₁₂ = ХПК = 504; вихідні значення Y₀ = БПК = 744,8; Y₀ = БПК=1560. Тому:

$$\bar{Y}_1 = Y_{11}/Y_0 = 504/1560 = 0,323, \tag{7}$$

$$\bar{Y}_2 = Y_{21}/Y_{20} = 486/744,8 = 0,652. \tag{8}$$

Умови та результати експериментів у відносних значеннях наведені в табл. 4.

У відносних змінних отримано такі кореляційні моделі:

$$\bar{Y}_1 = 0,349 - 0,088 \cdot \bar{X}_1 - 0,015 \cdot \bar{X}_2, \tag{9}$$

$$\bar{Y}_2 = 0,421 - 0,056 \cdot \bar{X}_1 - 0,056 \cdot \bar{X}_2. \tag{10}$$

Аналіз рівнянь (4, 5, 9, 10) показав, що зі збільшенням X₁ (дози FeSO₄) та X₂ (pH) залишкові значення ХПК

Таблиця 3

Матриця планування, фактори, результати експериментів

№ дослід	Фактори					Результати експериментів					
	абсолютні значення		кодовані позначення			Y ₁ , Y ₂ – середні значення результатів експериментів					
	X ₁	X ₂	\bar{X}_0	\bar{X}_1	\bar{X}_2	Y ₁₁	Y ₁₂	Y ₁	Y ₂₁	Y ₂₂	Y ₂
2	500	8,5	1	-1	-1	504	1400	952	486	446	468
3	500	10,5	1	-1	1	535	1200	867,5	488	273	380,5
4	1500	8,5	1	1	-1	448	635	541,5	360	480	420
5	1500	10,5	1	1	1	360	635	497,5	123	490	306,5

Таблиця 4

Умови та результати експериментів у відносних значеннях

№ № точок	Фактори			Результати експериментів			
	X ₀	X ₁	X ₂	1-а серія		2-а серія	
				X ₁	X ₂	X ₁	X ₂
1	-	0	0	0,243	0,49	0,25	0,405
2	1	-1	-1	0,323	0,652	0,583	0,372
3	1	-1	1	0,342	0,655	0,5	0,228
4	1	1	-1	0,287	0,483	0,264	0,4
5	1	1	1	0,230	0,165	0,264	0,409

та БПК зменшуються, що свідчить про доцільність продовження експериментів зі збільшенням доз FeSO₄ та рН. Значення доз FeSO₄ і рН, в межах яких проводився другий етап досліджень, а також результати експериментів наведено в табл. 7 (точки 6–12, рис. 1).

Отримано такі моделі залежностей $\bar{Y}_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$, $\bar{Y}_2(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$:

$$\bar{Y}_1 = 0,238 - 0,012\bar{x}_1 + 3,125 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{x}_2 \quad (11)$$

$$\bar{Y}_2 = 0,386 - 0,02\bar{x}_1 + 2,25 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{x}_2 \quad (12)$$

В рівняння (11, 12) \bar{x}_1 входить зі знаком “-”, а \bar{x}_2 – зі знаком “+”, але з дуже малими коефіцієнтами. З цього випливає, що значення рН > 10,5 зумовлюють підвищення залишкової концентрації забруднюючих речовин в обробленому фільтраті, чим підтверджується правильність визначення області оптимізації.

Зменшення функцій \bar{Y}_1 та \bar{Y}_2 відбувається у напрямках: для Y₁ – вектор із координатами $\bar{x}_1 = 0,012$, $\bar{x}_2 = -3,125 \cdot 10^{-3}$, для Y₂ – вектор із координатами $\bar{x}_1 = 0,02$; $\bar{x}_2 = -2,25 \cdot 10^{-3}$.

Визначимо значення ХПК (X₁) у точці мінімуму функції відгуку \bar{Y}_1 . Збільшуючи X₁ ще на 500 (тобто ΔX₁=500, Δ \bar{x}_2 =500/500=1) і рухаючись градієнтом, ми прийдемо в точку з координатою X₁=2500. При цьому приріст \bar{x}_2 становитиме:

$$\Delta \bar{x}_2 = \frac{500 \cdot (-3,125 \cdot 10^{-3})}{500 \cdot 0,12} = -0,26; \quad X_{2min} = 10,5 - 0,26 \approx 10,24$$

Таким чином, координати точки мінімального значення Y₁ (ХПК), становлять: X₁ (доза FeSO₄)=3000 мг/дм³, X₂ (рН) ≈ 10.

Аналогічний розрахунок виконуємо для БПК: $\Delta \bar{x}_2 = \frac{500 \cdot (-2,25 \cdot 10^{-3})}{500 \cdot 0,02} = 0,113 \cdot$

Значення рН, при якому досягається мінімальне значення Y₂ (БПК), при умові, що X₁=2500, дорівнює 10,5 – 0,113=10,39.

Для більш точної локалізації точки мінімуму було вирішено описати всю сукупність даних із двох серій експериментів моделлю другого порядку. В результаті розрахунків отримано наступні залежності:

$$\bar{Y}_1 = \frac{ХПК}{ХПК_0} = 1,914 - 3,142 \cdot 10^{-4} [FeSO_4] - 0,271 \cdot pH + 5,905 \cdot 10^{-8} [FeSO_4]^2 + 0,013 \cdot (pH)^2 + 3,453 \cdot 10^{-6} [FeSO_4] \cdot pH; \quad (13)$$

$$\bar{Y}_2 = \frac{БПК}{БПК_0} = 2,656 - 2,138 \cdot 10^{-4} [FeSO_4] - 0,398 \cdot pH + 2,04 \cdot 10^{-8} [FeSO_4]^2 + 0,018 \cdot (pH)^2 + 1,038 \cdot 10^{-5} [FeSO_4] \cdot pH. \quad (14)$$

Результати двох етапів досліджень показано у табл. 5. На рис. 2, 3 представлені ізолінії відносних значень ХПК/ХПК₀ та БПК/БПК₀, відповідно. Ізолінії отримані перетином побудованих за розробленими моделями поверхонь відгуку горизонтальними площинами з інтервалом ΔY = 0,01.

Аналіз результатів виконаних досліджень дозволив встановити, що оптимальними параметрами реагентного очищення стічних вод полігонів ТПВ, що забезпечують мінімізацію ХПК та БПК, є: доза FeSO₄ – 3000 мг/дм³ та значення рН=10,3.

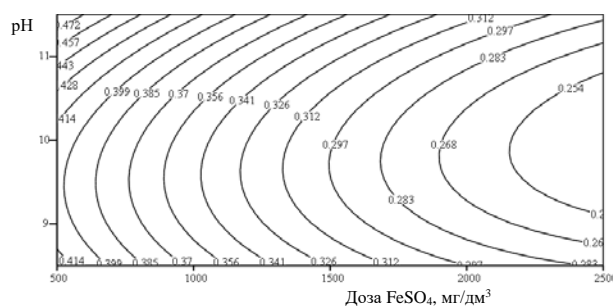


Рис. 2. Ізолінії відносних значень ХПК = ХПК/ХПК₀

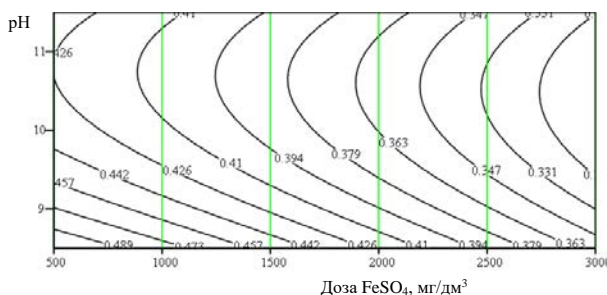


Рис. 3. Ізолінії відносних значень БПК = БПК/БПК₀

Результати двох етапів досліджень по реагентному очищенню стічних вод полігону ТБВ

№ досліду	Фактори		I-й етап							
			1-серія при вихідних даних БПК = 744,8; ХПК = 1560				2-серія при вихідних даних БПК = 1198; ХПК = 2400			
	X ₁	X ₂	ХПК		БПК		ХПК		БПК	
	FeSO ₄	pH	I	II	I	II	I	II	I	II
1	1000	9,5	379,47	0,243	364,8	0,49	600	0,25	486	0,406
2	500	8,5	504	0,323	486,5	0,653	1400	0,583	446,1	0,373
3	500	10,5	535,1	0,343	488	0,655	1200	0,5	273,2	0,228
4	1500	8,5	447,58	0,287	360	0,483	634,6	0,264	480	0,401
5	1500	10,5	360,01	0,231	123	0,165	634,6	0,264	490	0,41
№ досліду	Фактори		II-й етап							
			1-серія при вихідних даних БПК = 915; ХПК = 1860				2-серія при вихідних даних БПК = 1024; ХПК = 2250			
	X ₁	X ₂	ХПК		БПК		ХПК		БПК	
	FeSO ₄	pH	I	II	I	II	I	II	I	II
6	1500	9,5	617,5	0,332	425,4	0,465	776,2	0,345	477,2	0,466
7	1500	11,5	647,29	0,348	422,7	0,462	818	0,364	441,3	0,431
8	2000	10,5	500,3	0,269	343,1	0,375	654,7	0,291	408,5	0,399
9	2500	9,5	558,0	0,300	337,6	0,369	663,7	0,295	399,3	0,390
10	2500	11,5	548,7	0,295	338,5	0,370	650,2	0,289	378,9	0,370
11	3000	8,5	533,8	0,287	320,2	0,350	596,2	0,265	351,2	0,343
12	3000	10,5	398,0	0,214	290,9	0,318	508,5	0,226	312,3	0,305

Примітка: Концентрація FeSO₄ (X₁), мг/дм³

I – абсолютні значення ХПК та БПК, мгО₂/дм³;

II – відносні значення ХПК та БПК $\left(\frac{ХПК}{ХПК_0}; \frac{БПК}{БПК_0} \right)$

Література

1. Яцков М. В., Варнавська І. В. Аналіз методів очищення стічних вод місць захоронення ТПВ. *Науково-технічний журнал «Екологія довкілля та безпека життєдіяльності»*. № 4. 2008. С. 69-73.
2. Сталінський Д. В., Епштейн С. І., Музикіна З. С., Варнавська І. В., Яцков М. В. До питання про очищення стічних вод полігонів твердих побутових відходів. *Науковий вісник будівництва*. Вип. 52. Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2009. С. 120-129.
3. Сталінська І. В. Зменшення екологічного ризику полігонів твердих побутових відходів. *Науково-практичний журнал «Екологічні науки»*. 2022. Випуск 4 (43), С. 185-189.
4. Grippa E., Daffon S. D. A., de Almeida R., da Fonseca F. V., Campos J. C. Landfill leachate treatment by high-pressure membranes and advanced oxidation techniques with a focus on ecotoxicity and by-products management: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 173. 2023. P. 747-764. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.03.074>
5. Zhang Q., Tian B., Zhang X., Ghulam A., Fang C., He R. Investigation on characteristics of leachate and concentrated leachate in three landfill leachate treatment plants. *Waste Management*, Vol. 33, is. 11. 2013. P. 2277-2286. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.07.021>
6. Аналітична хімія: навч.-довідк. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / В.В. Болотов, О.А. Євтіфєєва, Т.В. Жукова, Л.Ю. Клименко, О.Є. Микитенко, В.П. Мороз, І.Ю. Петухова; за заг.ред. В.В. Болотова. Х.: НФаУ, 2014. – 320 с.
7. Сталінський Д. В., Епштейн С. І., Музикіна З. С., Діденко Н. М., Варнавська І. В. Розрахунок вмісту важких металів під час очищення стічних вод. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХДТУБА, 2010. Вип. 61. С. 235-241.
8. Шамаєв Ю.П., Лисенко Ю.С. Визначення математичної моделі планування експерименту при ідентифікації випробувань. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. Вип. 1(38). 2014. С. 228-229. <https://core.ac.uk/download/232878885.pdf>
9. Планування експерименту в техніці / В. І. Барабашук, Б. П. Креденцера, В. І. Мірошніченко; Під ред. Б. П. Креденцера. – К.: Техніка, 1984. – 200с.
10. Chen H., Xu H., Zhong Ch., Liu M., Yang L., He J., Sun Y., Zhao Ch., Wang D. Treatment of landfill leachate by coagulation: A review. *Science of The Total Environment*, Vol. 912. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169294>
11. Baettker E. C., Kozak C., Knapik H. G., Aisse M. M. Applicability of conventional and non-conventional parameters for municipal landfill leachate characterization. *Chemosphere*, 251. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126414>
12. Alver A., Atlas L. Characterization and electrocoagulative treatment of landfill leachates: A statistical approach. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. 111. 2017. P. 102-111. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.04.021>

ПИТАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

УДК 556.3:628.1:61

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.32>

ОЦІНКА ПРОГРЕСУ ДОСЯГНЕННЯ ЦІЛІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ № 6 В УКРАЇНІ

Валерко Р.А., Герасимчук Л.О., Пацева І.Г., Бондарчук В.М., Войналович І.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

valerko_ruslana@ukr.net, gerasim4uk@ukr.net, rig@ztu.edu.ua,

kvm_bvm@ztu.edu.ua, kgt_lim@ztu.edu.ua

Ціль сталого розвитку № 6 полягає в забезпеченні доступу до чистої води та належних санітарних умов для всіх до 2030 року. В Україні прогрес у досягненні цієї цілі є неоднорідним і залежить від низки чинників, таких як інфраструктура, економічна ситуація, регіональні відмінності та вплив військового конфлікту. Оскільки, ЦСР 6 є основою для покращення благополуччя людей, підтримки економічного та соціального прогресу і збереження здорових екосистем, метою нашого дослідження стала оцінка прогресу її досягнення в Україні.

Установлено, що найбільш критичною є ситуація у сільській місцевості, зокрема відсоток проб питної води із мікробіологічним забрудненням постійно збільшується ($R^2 = 0,7477$), спостерігається підвищення кількості проб із перевищенням нормативу за радіаційними показниками ($R^2 = 0,8458$), збільшення відсотку нестандартних проб води за органолептичними, фізико-хімічними та санітарно-токсикологічними показниками ($R^2 = 0,8578$). Фіксується стабільний регрес у доступі до централізованого водопостачання сільського населення ($R^2 = 0,7797$). Проте, характерним є збільшення кількості сільського населення, яке має доступ до централізованих систем водовідведення, зокрема протягом 2020–2022 років відсоток забезпеченості варіював у межах 5,2–5,3. Спостерігається зниження обсягів скидів забруднених стічних вод, що корелює із метою досягнення до 2020 року ($R^2 = 0,7784$). Починаючи з 2015 року водоємність ВВП постійно знижується, проте у 2022 році ще не досягнуто рівня, що відповідає меті 2020 року.

Таким чином, прогрес у досягненні ЦСР № 6 в Україні залежить від здатності країни модернізувати інфраструктуру та вирішити поточні виклики, включаючи наслідки військових дій та економічну нестабільність. *Ключові слова:* питна вода, сталий розвиток, показники якості питної води, водопостачання, водовідведення.

Assessment of the trossess of achieving Sustainable Development Goal № 6 in Ukraine. Valerko R., Herasimchuk L., Patseva I., Bondarchuk V., Voinalovych I.

Sustainable Development Goal №6 is to ensure access to clean water and adequate sanitation for all by 2030. In Ukraine, progress towards this goal is uneven and depends on a number of factors, such as infrastructure, economic situation, regional differences and the impact of military conflict. Since SDG 6 is the basis for improving people's well-being, supporting economic and social progress, and preserving healthy ecosystems, the goal of our study was to assess the progress of its achievement in Ukraine.

It was established that the situation in rural areas is the most critical, in particular, the percentage of drinking water samples with microbiological contamination is constantly increasing ($R^2 = 0.7477$), there is an increase in the number of samples with radiation indicators exceeding the norm ($R^2 = 0.8458$), an increase in the percentage of non-standard water samples according to organoleptic, physico-chemical and sanitary-toxicological indicators ($R^2 = 0.8578$). A stable regression is recorded in access to centralized water supply for the rural population ($R^2 = 0.7797$). However, the increase in the number of the rural population that has access to centralized drainage systems is characteristic, in particular, during 2020–2022, the percentage of provision varied between 5.2–5.3. A decrease in the volume of polluted wastewater discharges is observed, which correlates with the goal of achievement by 2020 ($R^2 = 0.7784$). Since 2015, the water capacity of GDP has been constantly decreasing, but in 2022, the level corresponding to the 2020 goal has not yet been reached.

Thus, progress towards SDG №6 in Ukraine depends on the country's ability to modernize infrastructure and address current challenges, including the effects of military operations and economic instability. *Key words:* drinking water, sustainable development, drinking water quality indicators, water supply, water drainage.

Постановка проблеми. Цілі сталого розвитку (ЦСР) передбачають подолання бідності, захист планети, забезпечення миру і процвітання для усіх людей у світі та майбутніх поколінь. Наразі 170 країн світу, у тому числі й Україна, прийняли ЦСР як основу для майбутнього розвитку. Проте, успішне досягнення цих цілей залежить від багатьох факторів та потребує розробки комплексної системи заходів і механізмів їх впровадження [7].

Актуальність дослідження. Ціль сталого розвитку № 6 «Чиста вода та належні санітарні умови» займає одне з головних місць у 17-ти ЦСР та безпосередньо або опосередковано пов'язана із 13-ма іншими ЦСР. ЦСР 6 є основою для покращення благополуччя людей, підтримки економічного та соціального прогресу і збереження здорових екосистем. Проте, відповідно звіту Організації Об'єднаних Націй про цілі стійкого розвитку, при теперішніх тем-

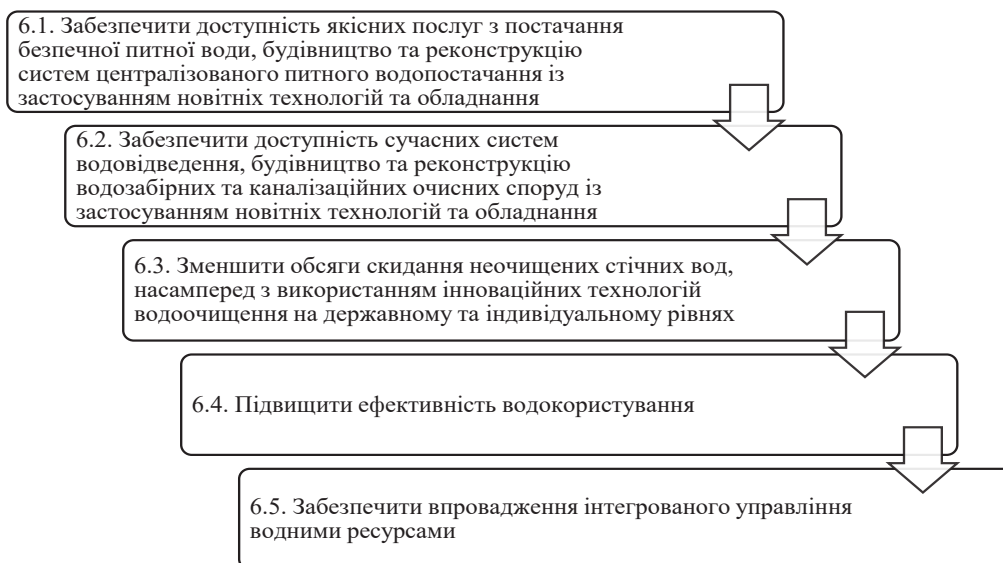


Рис. 1. Основні завдання «водної» цілі сталого розвитку України (ЦСР 6) на період до 2030 року (побудовано на основі даних [7])

пах прогресу 1,6 млрд людей так само не будуть мати доступу до безпечної питної води, а 2,8 млрд – не будуть мати доступ до безпечних санітарно-технічних засобів до 2030 року. Для досягнення ЦСР 6 темпи покращення потрібно пришвидшити у 4 рази [17].

Якісна питна вода має важливе значення для підтримки здорового населення. За даними ВООЗ, майже 1 млрд осіб позбавлені доступу до поліпшеного водопостачання. Відповідно до «водної» цілі сталого розвитку України (ЦСР 6) всеохоплюючий та рівномірний доступ до безпечної та економічно доступної питної води для всіх має бути досягнутий до 2030 року [2, 7].

Зв'язок авторського доробку із важливими та практичними завданнями. Дослідження проходило у рамках науково-дослідної роботи «Еколого-соціальна оцінка стану сільських селітебних територій у контексті сталого розвитку» (державний реєстраційний № 0120U104233).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цілі сталого розвитку є однією із провідних тематик наукових досліджень зарубіжних учених, які розглядають їх у аспекті доступу та якості медичної допомоги [9, 14, 18], у сфері політики охорони здоров'я [12], дитячої смертності [13, 22], глобальних правил для приватного сектору [21], питної води [10, 16], бідності [11], прогресу досягнення ЦСР [15, 19, 20] тощо. Українські вчені досліджували зокрема місце України у координатах цілей сталого розвитку [8], аналіз досягнення ЦСР в Україні [6], управління відходами [4] та екологічний стан сільських територій в умовах сталого розвитку [1]. Проте, наразі, питанням, що стосуються саме аналізу прогресу досягненню окремих ЦСР, зокрема й ЦСР №6, у науковій літературі приділено не достатньо уваги.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна. Аналіз досягнення цілей сталого розвитку в Україні, а також окремих завдань, які є складовими загального процесу руху до вирішення програми їх досягнення, може бути досить інформативним і показовим. Таким чином, метою даного дослідження є аналіз прогресу досягнення в Україні цілі сталого розвитку № 6 «Чиста вода та належні санітарні умови».

Методологічне або загальнонаукове значення. Інформаційною базою для проведення досліджень стали статистичні матеріали Державної служби статистики України [5].

Виклад основного матеріалу. Основними завданнями ЦСР 6 є: забезпечення доступу до якісних послуг з безпечного водопостачання та водовідведення, зменшення обсягів скидання неочищених стічних вод, підвищення ефективності водокористування та забезпечення впровадження інтегрованого управління водними ресурсами (рис. 1).

Відповідно до основних завдань було оцінено прогрес досягнення ЦСР 6 за певними індикаторами.

6.1.1. Безпечність та якість питної води за мікробіологічними показниками (по % нестандартних проб). Оцінка прогресу даного індикатора показала, що у міській місцевості, більшість якої обладнана централізованим водопостачанням кількість проб із перевищенням мікробіологічних показників зменшується. Проте, ситуація із сільською місцевістю залишається критичною, відсоток проб питної води із мікробіологічним забрудненням збільшується, що описується поліноміальним зв'язком 3-го ступеня: $y = 0,1457x^3 - 882,36x^2 + 2E + 0,6x - 1E + 09$ із значною кореляційною залежністю $R^2 = 0,7477$ (рис. 2).

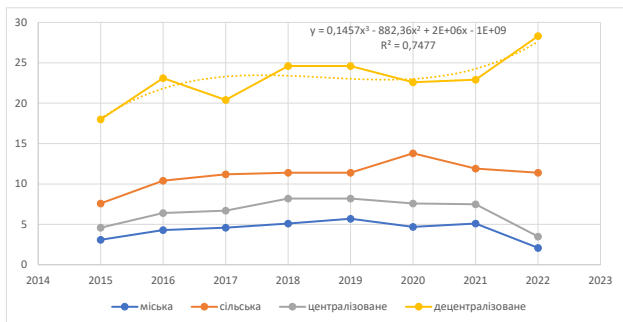


Рис. 2. Безпечність та якість питної води за мікробіологічними показниками, % проб, що перевищує норматив (побудовано на основі даних [5])

6.1.2. Безпечність та якість питної води за радіаційними показниками (по % нестандартних проб). Для системи централізованого водопостачання спостерігається зниження кількості проб із перевищенням нормативу за радіаційними показниками. У межах сільської місцевості навпаки спостерігається підвищення кількості проб із перевищенням нормативу (рис. 3).

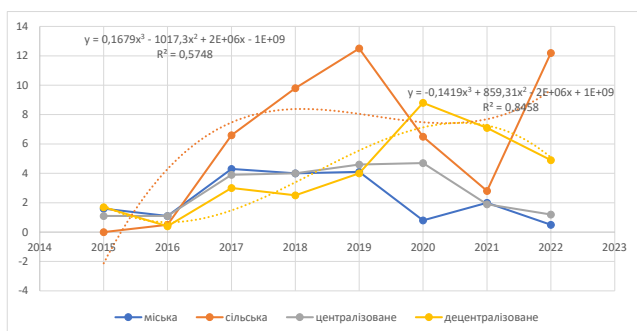


Рис. 3. Безпечність та якість питної води за радіаційними показниками, % проб, що перевищує норматив (побудовано на основі даних [5])

6.1.3. Безпечність та якість питної води за органолептичними, фізико-хімічними та санітарно-токсикологічними показниками (по % нестандартних проб). Ситуація по даному індикатору є аналогічною за попередній: якщо у міській місцевості спостерігається деяке покращення щодо якості питної води, то у сільській, навпаки, зафіксовано погіршення стану питної води, що надходить із джерел децентралізованого водопостачання. Збільшення відсотку нестандартних проб води за досліджуваними показниками описується поліноміальною залежністю 3-го ступеня за рівнянням: $y = 0,1538x^3 - 1,747x^2 + 5,5278x + 28,421$, $R^2 = 0,8578$ (рис. 4).

6.1.4. Частка сільського населення, яке має доступ до централізованого водопостачання. Аналіз даного індикатора показує його стабільний регрес, оскільки протягом 2019–2022 років спостерігається постійне зниження кількості сільського населення, яке має доступ до централізованого водопостачання (рис. 5).

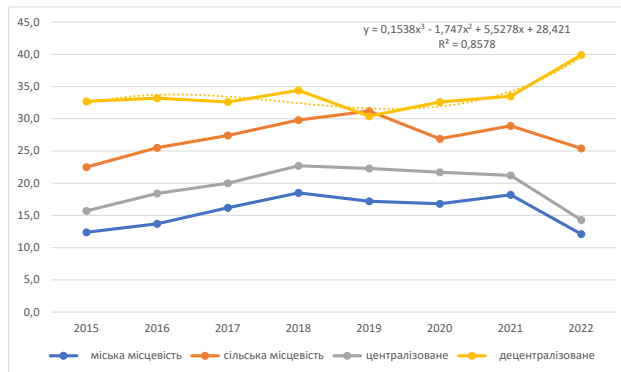


Рис. 4. Безпечність та якість питної води за органолептичними, фізико-хімічними та санітарно-токсикологічними показниками, % нестандартних проб (побудовано на основі даних [5])

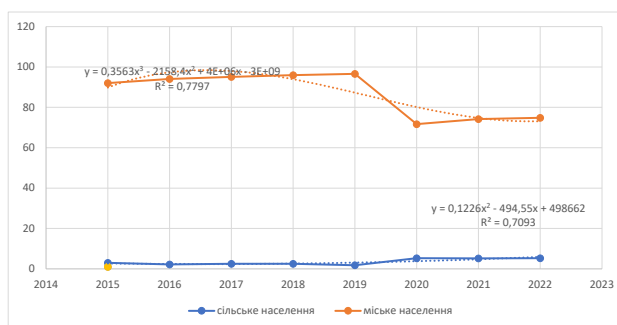


Рис. 5. Частка міського та сільського населення, яке має доступ до централізованого водопостачання, % (побудовано на основі даних [5])

6.2. Частка населення, яке має доступ до централізованих систем водовідведення. Аналіз динаміки даного індикатора вказує на позитивну тенденцію щодо збільшення кількості сільського населення, яке має доступ до централізованих систем водовідведення, зокрема протягом 2020–2022 років відсоток забезпеченості варіював у межах 5,2–5,3, а найгірша ситуація була зафіксована у 2019 році (рис. 6).

6.3.1. Обсяги скидів забруднених (забруднених без очисток та недостатньо очищених) стічних вод у водні об'єкти, млн. м³. За даним індикатором спостерігається зниження обсягів скидів починаючи із 2020 року, що корелює із метою досягнення до 2020 року (рис. 7).



Рис. 6. Частка міського та сільського населення, яке має доступ до централізованих систем водовідведення, % (побудовано на основі даних [5])

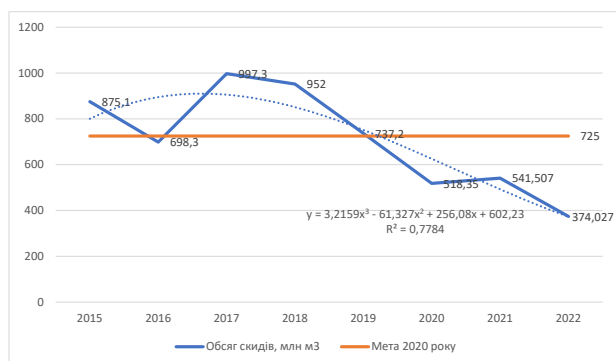


Рис. 7. Обсяги скидів забруднених (забруднених без очистки та недостатньо очищених) стічних вод у водні об'єкти, млн. м³ (побудовано на основі даних [5])

6.4.1. Водоемність ВВП, куб. м використаної води на 1000 грн ВВП (у фактичних цінах). Починаючи з 2015 року водоемність ВВП постійно знижується, проте у 2022 році ще не досягнуто рівня, що відповідає меті 2020 року (рис. 8).

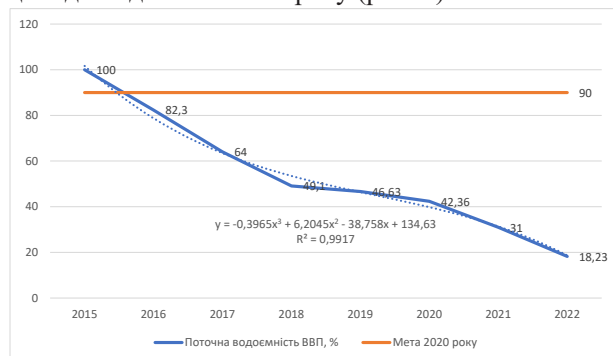


Рис. 8. Динаміка індикатора водоемність ВВП, м³ використаної води на 1000 грн ВВП (у фактичних цінах) (побудовано на основі даних [5])

6.4.2. Поточна водоемність ВВП, % до рівня 2015 року. Ціль 2020 року за індикатором поточна водоемність ВВП досягнуто у 2016 році і надалі цей показник постійно знижується (рис. 9).

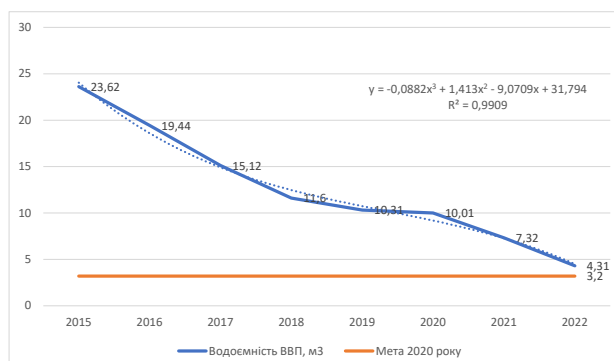


Рис. 9. Динаміка індикатора поточна водоемність ВВП, % (побудовано на основі даних [5])

6.5.1. Кількість річкових басейнів, для яких затверджено плани управління, одиниць. Інформація за даним індикатором надається Державним агентством водних ресурсів України та розробляється 1 раз на 6 років, починаючи з 2024 року.

Висновки. Таким чином, досягнення Цілі Сталого Розвитку № 6 «Чиста вода та належні санітарні умови» є пріоритетним завданням для забезпечення доступу до безпечної питної води для всіх до 2030 року. Сільські населені пункти в Україні є найбільш вразливими щодо проблем з питною водою, у межах яких спостерігається погіршення її якості за мікробіологічними, органолептичними, фізико-хімічними та радіологічними показниками. Частка сільського населення, що має доступ до централізованого водопостачання, постійно знижується протягом 2019–2022 років. Є позитивна тенденція щодо збільшення частки сільського населення, яке має доступ до централізованих систем водовідведення, проте рівень забезпеченості залишається дуже низьким (близько 5%).

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати досліджень можуть бути використані органами самоврядування територіальних громад для покращення екологічної безпеки питного водопостачання.

Література

1. Валерко Р. А., Герасимчук Л. О., Башинський І. В. Оцінка екологічного стану сільських селітебних територій в умовах сталого розвитку. *Аграрні інновації*. 2022. № 13. С. 215-221. DOI <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.13>.
2. Валерко Р. А., Герасимчук Л. О., Романчук Л. Д. ГІС як інструмент контролю та управління у сфері нецентралізованого водопостачання у межах ОТГ : монографія. Житомир : Поліський національний університет, 2022. 165 с.
3. Герасимчук Л.О., Валерко Р.А. Інтегральний показник екологічного стану міста Житомир як основа для встановлення тенденцій його розвитку. *Innovations in the Education of the Future: Integration of Humanities, Technical and Natural Sciences : International collective monograph, FIT CTU in Prague*. 2023. С. 160-181. DOI: 10.5281/zenodo.10259058.
4. Герасимчук Л. О., Валерко Р. А., Довбаш В. В. Регіональний аспект поводження з відходами у Житомирській області в контексті сталого розвитку. *Екологічні науки*. 2022. № 1 (40). С. 104-109. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.19>.
5. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>.
6. Кобцева Д. А. Проблеми аналізу досягнення цілей сталого розвитку – стан, об'єкти, актори, чинники, засоби, завдання та пріоритети змін у використанні ресурсів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2021. № 3 (267). С. 13-24. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-267-3-13-24>.
7. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 р. № 722/2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019>.

8. Трохименко О., Дорошкевич Д., Джадан І. Місце України у координатах цілей сталого розвитку (на прикладі цілей 8, 9, 12, 17). *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2020.1. 10.20535/2307-5651.17.2020.216323.
9. Abbott P., Sapsford R., Binagwaho A. Learning from Success: How Rwanda achieved the millennium development goals for health. *World Development*. 2017. 92. 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2016.11.013>.
10. Adams E. A. Thirsty slums in African cities: Household water insecurity in urban informal settlements of Lilongwe, Malawi. *International Journal of Water Resources Development*. 2018. 34(6). 869–887. <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1322941>.
11. Asadullah M. N., Savoia A. Poverty reduction during 1990–2013: Did millennium development goals adoption and state capacity matter? *World Development*. 2018. 105. 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2017.12.010>.
12. Buse K., Hawkes S. Health in the sustainable development goals: Ready for a paradigm shift? *Global Health*. 2015. 11. 13. <https://doi.org/10.1186/s12992-015-0098-8>.
13. Ebener S., Guerra-Arias M., Campbell J., Tatem A. J., Moran A. C., Johnson F. A., Fogstad H., Stenberg K., Neal S., Bailey P., Porter R., Matthews, Z. The geography of maternal and newborn health: the state of the art. *International Journal of Health Geographics*. 2015. <https://doi.org/10.1186/s12942-015-0012-x>
14. Fullman N. et al. Measuring performance on the healthcare access and quality index for 195 countries and territories and selected subnational locations: A systematic analysis from the global burden of disease study 2016. *Lancet*, 391(10136). 2018. 2236–2271.
15. Gaffey M. F., Das J. K., Bhutta Z. A. Millennium development goals 4 and 5: Past and future progress. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*. 2015. 20(5). 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.siny.2015.07.00>
16. Martinez-Santos P. Does 91% of the world's population really have 'sustainable access to safe drinking water'? *International Journal of Water Resources Development*. 2017. 33(4). 514–533. <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1298517>
17. Miao J., Song X., Zhong F., Huang C. Sustainable Development Goal 6 Assessment and Attribution Analysis of Underdeveloped Small Regions Using Integrated Multisource Data. *Remote Sensing*. 2023. 15(15):3885. <https://doi.org/10.3390/rs15153885>.
18. Milat A. J., Bauman A., Redman S. Narrative review of models and success factors for scaling up public health interventions. *Implementation Science*. 2015. 10. 113. <https://doi.org/10.1186/s13012-015-0301-6>.
19. Mohammadi, Y., et al. Measuring Iran's success in achieving Millennium Development Goal 4: A systematic analysis of under-5 mortality at national and subnational levels from 1990 to 2015. *The Lancet Global Health*. 2017. 5(5), e537–e544. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(17\)30105-5](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(17)30105-5).
20. Moucheraud C., Owen H., Singh N. S. N. G., Requejo J. C. K., Lawn J. E., Berman P. The Countdown Case Study Collaboration Group 2016 Countdown to 2015 country case studies: what have we learned about processes and progress towards MDGs 4 and 5? *BMC Public Health*. 2016. 16 (Suppl 2). 794. <https://doi.org/10.1186/s12889-016-3401-6>
21. Scheyvens R., Banks G., Hughes E. The private sector and the SDGs: The need to move beyond 'business as usual.' *Sustainable Development*. 2016. 24(6). 371–382. <https://doi.org/10.1002/sd.1623>
22. Wolf J., Hunter P. R., Freeman M. C., Cumming O., Clasen T., Bartram J., Higgins J. P. T., Johnston R., Medlicott K., Boisson S., Prüss-Ustün, A. Impact of drinking water, sanitation and handwashing with soap on childhood diarrheal disease: Updated meta-analysis and meta-regression. *Tropical Medicine & International Health*. 2018. 23(5). 508–525. <https://doi.org/10.1111/tmi.13051>

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО РОЗВИТКУ ЗЕМЛЕУСТРОЮ В КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІЙ

Герасимчук О.Л., Мельник-Шамрай В.В., Шевчук Л.М., Васильєва Л.А.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
kgt_gol@ztu.edu.ua, org_vvm@ztu.edu.ua, knz_shlm@ztu.edu.ua, knz_vla@ztu.edu.ua

Актуальність дослідження. Статтю присвячено інноваційним підходам до розвитку землеустрою, які сприяють успішній реалізації земельної та адміністративної реформ й дають поштовх громадам до економічного зростання на засадах сталого розвитку територій.

Метою статті є аналіз інноваційних підходів в землеустрої та обґрунтування їх ефективності в забезпеченні сталого розвитку територій. Для реалізації поставленої мети були використані наукові методи аналізу, порівняння та узагальнення.

Викладення основного матеріалу. Інновації та інноваційна діяльність у сучасному світі виступають основою стабільного довгострокового економічного розвитку. Ключовим для сталого розвитку територій є оновлення картографічних матеріалів, матеріалів кількісного обліку та інвентаризації земель з урахуванням земельної та адміністративної реформ. Землеустрій, що ґрунтується на інноваційних підходах забезпечує комплексне дослідження природно-географічних умов та ресурсів, що дозволяє виявити закономірності просторової організації компонентів ландшафту, їх взаємозв'язків та динаміку розвитку у структурі ландшафтів. Він набуває значення ключового регуляторного механізму для вирішення соціально-економічних, правових та екологічних проблем громад та регіонів та обумовлює сталий розвиток територій. Застосування наявного спектру сучасних технологій до розвитку землеустрою дозволяє розробити сценарії для збереження екосистем та їх успішної адаптації до змін у майбутньому.

Висновки. Реалізація ідей сталого розвитку територій має ґрунтуватися на впровадженні інноваційних підходів до землеустрою. Використання сучасних технологій і даних, допомагають приймати обґрунтовані рішення щодо сталого планування та управління земельними ресурсами. *Ключові слова:* інноваційні підходи, землеустрій, цифровий землеустрій, земельні ресурси, сталий розвиток територій.

Innovative approaches to land development in the context of sustainable territory development. Herasymchuk O., Melnyk-Shamrai V., Shevchuk L., Vasilieva L.

Relevance of the study. The article is devoted to innovative approaches to the development of land management, which will contribute to the successful implementation of land and administrative reforms and provide communities with an impetus for economic growth based on sustainable territorial development.

The aim of the article is to analyse innovative approaches to land management and to demonstrate their effectiveness in ensuring sustainable development of territories. Scientific methods of analysis, comparison and generalisation have been used to achieve this objective.

Outline of the main material. Innovations and innovative activities in the modern world are the basis for stable long-term economic development. The key to the sustainable development of territories is the updating of cartographic materials, materials of quantitative accounting and inventory of land, taking into account land and administrative reforms. Land management based on innovative approaches provides a comprehensive study of natural and geographical conditions and resources, which allows to identify patterns of spatial organisation of landscape components, their interrelationships and development dynamics in the landscape structure. It becomes a key regulatory mechanism for solving socio-economic, legal and environmental problems of communities and regions and determines the sustainable development of territories. The application of the available range of modern technologies to the development of land management makes it possible to develop scenarios for the preservation of ecosystems and their successful adaptation to future changes.

Conclusions. The implementation of sustainable development ideas should be based on the introduction of innovative approaches to land management. The use of modern technologies and data helps to make informed decisions on sustainable land planning and management. *Key words:* innovative approaches, land management, digital land management, land resources, sustainable development of territories.

Постановка проблеми. Земельний ресурс є важливим чинником розвитку громад та держави в цілому, оскільки слугує просторовою основою для розміщення та успішного функціонування різних галузей господарського комплексу. Реформування будь-якої галузі економіки здійснюється з метою покращення рівня життя суспільства, зменшення державних витрат та збільшення доходів населення. Земельна реформа, запроваджена в Україні мала на меті – забезпечення реалізації конституційних прав громадян на вільне розпорядження своєю власністю;

формування спроможних територіальних громад шляхом передачі в їх розпорядження сільськогосподарських земель державної власності як основного засобу виробництва та економічного розвитку територій; прозоре та ефективне управління земельними ресурсами [1]. Досвід країн лідерів світової економіки, демонструє, що реалізація реформи, спрямованої на запровадження приватної власності на землю виступає важливим економічним чинником, який стимулює розвиток всіх сфер національної економіки. Успішна реалізація земельної реформи запро-

вадженій в Україні потребує пошуку нових напрямів організації території. Провідну роль відіграє землеустрій, наукове обґрунтування та сучасний розвиток якого дозволяє здійснити всебічне дослідження природно-географічних умов, ресурсного потенціалу, що дозволяє визначити закономірності розвитку окремих елементів ландшафту, встановити взаємозв'язки між ними та аналізувати динаміку і характер їх змін. Не менш важливим землеустроєм є при організації сталого землекористування громад. Відповідно до Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо планування використання земель» [2], передбачається розробка рішень стосовно перспективного використання всіх земель територіальної громади, спрямованих на забезпечення її сталого розвитку, формування та підтримку оптимальних умов життєвого середовища громадян. В період післявоєнного відновлення території громад ці питання набуватимуть особливої актуальності. Тому предметом огляду є інноваційні підходи до розвитку землеустрою, які дозволять реалізувати принципи сталого землекористування та сприятимуть сталому розвитку громад.

Актуальність дослідження. Перспективними для подальшого розвитку економіки держави є інноваційні процеси. Державна політика та законодавство стимулюють інноваційні процеси та підходи, які передбачають отримання наукових результатів та їх практичної реалізації. Сучасні виклики у землекористуванні стимулюють впровадження інноваційних підходів у землеустрої для забезпечення збалансованого розвитку, екологічної стійкості та підвищення ефективності управління земельними ресурсами.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. В період післявоєнного відновлення територій виникатиме потреба прийняття швидких екологічно та економічно доцільних рішень, які ґрунтуватимуться на інноваціях та інноваційній діяльності й перспективі раціонального землекористування. Аналіз інноваційних підходів в розвитку землеустрою та їх реалізація для відновлення деградованих техногенних та белігертивних ландшафтів сприятиме забезпеченню сталого розвитку територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність проблеми раціонального землекористування обумовлює широкий спектр досліджень та потужний науковий доробок в цій галузі. Дослідженням теоретичних та прикладних аспектів розвитку землеустрою присвячені праці вітчизняних та зарубіжних науковців: Ю. Дзядикевич, І. Любезна, М. Галич, С. Смирнова, Н. Стойко, О. Ковалишин, О. Куліковська, А. Тригуба, Є. Скороход, О. Паленичак, І. Кошкалда, В. Мельник-Шамрай, К. Фей, К. Рехбергер та К. Войт, О. Моцун, Е. Ердоган та інші. Так Ю. Дзядикевич та І. Любезна в своїх працях дослідили напрями покращення землеустрою та землекористування в Україні та встано-

вили ефективність застосування технології зберігаючого землеробства [3]. Н. Стойко, О. Ковалишин, О. Куліковська, А. Тригуба обґрунтували значення землеустрою в системі просторового планування територій громад для інтегрованого розвитку, забезпечення стійких засобів до існування та відновлення ландшафтів [4]. Питання розробки комплексних планів просторового розвитку територій територіальних громад дослідили в працях Л. Новаковський, А. Третяк, В. Третяк, Ю. Лобунько [5, 6]. В. Мельник-Шамрай висвітлює раціональне використання, відтворення та охорону земельних ресурсів на регіональному рівні, а також приділила увагу управлінню земельними ресурсами в умовах екологізації виробництва [7, 8]. Ефективність використання методів дистанційного зондування для моніторингу деформацій земної поверхні аргументували К. Фей, К. Рехбергер та К. Войт [9]. О. Моцун розглянув питання розвитку механізму публічного управління в галузі земельних відносин в Україні [10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значний науковий доробок в питаннях раціонального землекористування та землеустрою недостатньо висвітлені сучасні підходи, які впливають на процес землеустрою в Україні та визначають сталий розвиток територій, що зумовлює потребу в їх подальшому науковому дослідженні.

Методологічне або загальнонаукове значення. Метою статті є аналіз інноваційних підходів в землеустрої та обґрунтування їх ефективності в забезпеченні сталого розвитку територій. Для реалізації поставленої мети були використані наукові методи аналізу, порівняння та узагальнення.

Викладення основного матеріалу. Земельна та адміністративні реформи, які реалізовані в Україні потребують пошуку шляхів удосконалення організації територій з метою сталого розвитку. В період післявоєнного відновлення держави вирішальне значення відіграватиме сталий розвиток територій, що забезпечуватиме відбудову громад та покращення життя населення, що виступатиме запобіжником повторних руйнувань. Стратегія розумного, стійкого і всеосяжного зростання, прийнята Європейською комісією [11] визначає три важливі пріоритети розвитку громад:

- Smart зростання;
- Стійке зростання;
- Інклюзивне зростання.

Слід зауважити, що розвиток в зазначених напрямках стимулюватиме розвитку конкурентоспроможної економіки на засадах інновацій, ресурсозберігаючих та екологічноспрямованих технологій, що сприятиме підвищенню зайнятості населення та сталому розвитку територій.

Землеустрій набуває значення ключового регуляторного механізму для вирішення соціально-економічних, правових та екологічних проблем громад та

регіонів. Євроінтеграційний шлях, яким неспинно рухається Україна потребує перегляду підходів до землеустрою та їх кореляції з європейськими стандартами. Досвід провідних країн світу свідчить, що саме інновації є вирішальною умовою забезпечення стабільного довгострокового економічного розвитку. Землеустрій, що ґрунтується на інноваційних підходах забезпечує комплексне дослідження природно-географічних умов та ресурсів, що дозволяє виявити закономірності просторової організації компонентів ландшафту, їх взаємозв'язків та динаміку розвитку у структурі ландшафтів. Організація землекористування на таких засадах дозволяє врахувати екологічні аспекти, які є пріоритетним для європейської нормативної бази та сприятиме сталому розвитку території.

Стаття 1 Закону України «Про інноваційну діяльність» [12] визначає, що інновації – новостворені (застосовані) і (або) вдосконалені конкурентоздатні технології, продукція або послуги, а також організаційно-технічні рішення виробничого, адміністративного, комерційного або іншого характеру, що істотно поліпшують структуру та якість виробництва і соціальної сфери.

В контексті нашого дослідження цінною є думка І. Колганової [12], яка серед інших виділяє такі напрями інноваційного розвитку землеустрою та землекористування, як удосконалення інституційного середовища проведення землеустрою та землевпорядкування, удосконалення процесу збору інформації про земельні та інші природні ресурси, запровадження розроблення інвестиційних проєктів землеустрою щодо організації землеволодіння і землекористування, здійснення земельних поліпшень та заходів з охорони земель.

Інноваційні підходи до землеустрою включають нові методи, технології та управлінські рішення, які спрямовані на підвищення ефективності використання земельних ресурсів з урахування екологічних, економічних та соціальних аспектів. Розглянемо ключові підходи та їх роль у забезпеченні сталого розвитку території.

Питання, яке потребує нагального вирішення для забезпечення доступу до інформації є оновлення інформаційних баз. Повільне та непослідовне оновлення даних призводить до погіршення якості планово-картографічних баз, які є основою для розроблення проєктів землеустрою. Сталий розвиток територій повинен ґрунтуватися на оновлених картографічних матеріалах, матеріалах кількісного обліку та інвентаризації земель [14]. Принциповим для вирішення даного питання є використання геоінформаційних систем та дистанційного зондування землі, що дозволить здійснити точне картографування території, забезпечити автоматизований моніторинг стану земель, встановити його динаміку та виявити зміни у їх використанні. Також важливим для оновлення баз є запровадження цифрового землеустрою,

який дає можливість оптимізувати та автоматизувати процеси землеустрою.

Створення інфраструктури геопросторових даних набуває все більшого розвитку. На сайті Державної служби України з питань геодезії, картографії та кадастру діє електронний геопортал національної інфраструктури геопросторових даних [15], де поєднуються дані Державної геодезичної мережі, відомості Державного земельного та містобудівного кадастрів.

Актуальними з огляду на євроінтеграційні процеси в країні є підходи з урахуванням екологічної складової землеустрою, зокрема: інтеграція екологічних показників у землеустрій та реалізація агро-екологічного землеустрою. Впровадження даних підходів до землеустрою дасть змогу балансувати між економічним використанням землі та її екологічною цінністю та сприятиме збереженню біорізноманіття і зменшенню негативного впливу на довкілля.

Перспективним в контексті сталого розвитку територій є впровадження моделювання та прогнозування землекористування. Використання математичних моделей і сценарного планування дозволить прогнозувати наслідки різних варіантів землекористування з урахуванням природних, соціальних та економічних чинників.

Впровадження інноваційних підходів допоможе зробити процес землеустрою більш точним та ефективним, а з урахуванням сучасних викликів та потреб – більш сталим (табл. 1). Аналіз таблиці 1 вказує на те, що реалізація кожного із запропонованих підходів відіграє важливу роль для сталого розвитку територій. Так створення інфраструктури геопросторових даних забезпечує підвищення ефективності управління земельними ресурсами та їх раціонального використання. Впровадження цифрового землеустрою підвищує ефективність, прозорість та точність використання земельних ресурсів, що є важливим інструментом досягнення сталого розвитку територій. Інтеграція екологічних показників у землеустрій дозволяє ефективно поєднувати економічні вигоди з екологічною відповідальністю та забезпечує раціональне та стійке використання земельних ресурсів.

Агро-екологічний землеустрій враховує не лише економічні показники, але й екологічні та соціальні аспекти, сприяючи збереженню природних ресурсів, підвищенню стійкості агросистем та покращенню якості життя в сільських громадах. Моделювання і прогнозування землекористування є важливим інструментом для збереження балансу між економічним зростанням, соціальними потребами та екологічною стійкістю. Весь наявний спектр сучасних технологій дозволяє розробити сценарії для збереження екосистем та їх успішної адаптації до змін у майбутньому.

Висновки. В ході дослідження встановлено, що сталий розвиток територій є перспективним напрямком післявоєнного відновлення держави та розвитку

Основні аспекти реалізації інноваційних підходів в контексті сталого розвитку

Інноваційний підхід	Напрямки та перспективи реалізації
Геоінформаційні системи та дистанційне зондування Землі	1. Моніторинг змін у землекористуванні; 2. Оцінка екологічного стану земель; 3. Планування та управління природними ресурсами; 4. Моделювання сценаріїв розвитку; 5. Забезпечення прозорості та прийняття рішень; 6. Моніторинг сталого сільського господарства.
Цифровий землеустрій	1. Ефективне управління земельними ресурсами; 2. Підвищення прозорості та доступності інформації; 3. Автоматизація та оптимізація процесів землеустрою; 4. Зменшення екологічних ризиків; 5. Підтримка інноваційних підходів до землекористування; 6. Моніторинг і прогнозування розвитку територій; 7. Інтеграція з іншими системами управління ресурсами; 8. Блокчейн для прозорого землекористування.
Інтеграція екологічних показників у землеустрій	1. Оцінка екологічного стану земель; 2. Забезпечення екологічної стійкості територій; 3. Охорона природних ресурсів; 4. Зменшення негативного впливу на довкілля; 5. Баланс між економічними і екологічними інтересами; 6. Використання інноваційних технологій; 7. Моніторинг та адаптивне управління; 8. Збереження екосистемних послуг; 9. Підтримка міжнародних екологічних стандартів.
Агроекологічний землеустрій	1. Збереження родючості ґрунтів; 2. Захист біорізноманіття; 3. Зменшення використання хімічних речовин; 4. Рациональне водокористування; 5. Інтеграція екосистемних послуг у сільськогосподарські системи; 6. Впровадження сільськогосподарських ландшафтів на основі принципів сталого розвитку; 7. Підтримка соціально-економічної стійкості; 8. Адаптація до змін клімату; 9. Сприяння циркулярній економіці.
Моделювання і прогнозування землекористування	1. Просторове моделювання землекористування; 2. Аналіз сценаріїв розвитку; 3. Оцінка впливу на екосистеми; 4. Інтеграція екологічних, соціальних та економічних факторів; 5. Застосування технологій штучного інтелекту; 6. Моніторинг і контроль за змінами землекористування; 7. Прогнозування впливу кліматичних змін; 8. Розробка політик сталого землекористування; 9. Підтримка адаптивного управління.

економіки. Реалізація ідей сталого розвитку територій має ґрунтуватися на впровадженні інноваційних підходів до землеустрою, найбільш перспективними з яких є: геоінформаційні системи та дистанційне зондування Землі, цифровий землеустрій, інтеграція екологічних показників у землеустрій, агроекологічний землеустрій та моделювання і прогнозування землекористування. Використання інноваційних підходів до розвитку землеустрою сприяє підвищенню ефективності управління земельними ресурсами їх та моніторингу, збалансованому підходу до землекористування зберігаючи природні екосистеми і спри-

ючи сталому розвитку суспільства, продуктивності агросистем і збереженню екосистемних послуг, необхідних для довгострокової екологічної стійкості. Використання сучасних технологій і даних, допомагають приймати обґрунтовані рішення щодо сталого планування та управління територіями.

Перспективи подальших досліджень полягають у необхідності більш детального вивчення розвитку міждисциплінарних підходів, що включають економічну, екологічну, соціальну та технологічну складові для прийняття обґрунтованих рішень для комплексного управління територіями.

Література

1. Земельна реформа. Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/reformi/ekonomichne-zrostannya/zemelna-reforma>
2. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо планування використання земель: Закон України від 17.06.2020 р. № 711-IX (із змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/711-20#Text>

3. Дзядикевич Ю.В., Любезна І.В., Розум Р.І. Напрями покращення землеустрою та землекористування в Україні. Сталій розвиток економіки. 2019. № 1 (42). С. 172–178.
4. 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.
5. Третяк А. М., Третяк В. М., Лобунько Ю. В. Інформаційні проблеми розроблення комплексних планів просторового розвитку територій територіальних громад. Грааль науки. 2021. № 9. С. 33–41.
6. Новаковський Л., Третяк А., Дорош Й. Стан та проблеми землеустрою об'єднаних територіальних громад у контексті підвищення їх фінансової стійкості. Землевпорядний вісник. 2018. № 12. С. 38–48.
7. Мельник-Шамрай В.В. Аналіз стану використання земельного фонду Житомирської області. Екологічні науки. 2023. № 5(50). С. 20–24.
8. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г., Пацев І.С. Землеустрій як інструмент управління земельними ресурсами в умовах екологізації землекористування. Екологічні науки. 2023. № 6(51). С. 78–83.
9. Fey C., Rechberger C., Voit K. Remote sensing-based deformation monitoring and geological characterisation of an active deep-seated rock slide (Tellakopf/Cima di Tella, South Tyrol, Italy). Bull Eng Geol Environ. 2023. 82. pp. 85. URL: <https://doi.org/10.1007/s10064-023-03101-x>
10. Моцун О. Інноваційні підходи до розвитку механізми публічного управління в галузі земельних відносин в Україні. Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада». 2023. С. 287–289.
11. EUROPE-2020: A European strategy for smart, sustainable and inclusive growth. URL: <https://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET%20EN%20BARROSO%20%20%20007%20-%20Europe%202020%20-%20EN%20version.pdf>
12. Про інноваційну діяльність: Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/40-15#Text>.
13. Колганова І. Г. Інноваційно-інвестиційні напрями розвитку землеустрою на місцевому рівні : автореф. дис. на здобуття наукового ступеня кандидата економічних наук зі спеціальності 08.00.06 «Економіка природокористування та охорони навколишнього середовища». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021. URL: <https://dglib.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/878a5b33-8288-4ab3-aa36-b842864b434b/content>
14. Koshkaldal I., Anopriienko T., Pilicheva M., Maslii L. Methodology of Application of Modern Technologies in Land Inventory of Territorial Communities. Baltic Surveying, Vol. 14, 2021, pp. 17–24.
15. Сайт Національної інфраструктури геопросторових даних. URL: <https://nsdi.gov.ua/>

ДОСЛІДЖЕННЯ АНТИКОРОЗІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНИХ ВИЛУЧЕНЬ З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

Петруша Ю.Ю., Пушкарьова Є.Р., Сохрякова І.М.

¹Національний університет «Запорізька політехніка»

вул. Жуковського, 64, 69063, м. Запоріжжя

yulia.znu@ukr.net, lizavishnevetskaia15@gmail.com, irchvanova04@gmail.com

Вивчено антикорозійні властивості водних вилучень з лікарської рослинної сировини (дуб, вільха, калган, чорниця – виробник ПрАТ «Ліктрави», м. Житомир), що містить дубильні речовини, у стандартних корозійно активних середовищах (10%-вий розчин сульфатної кислоти, 3%-вий розчин натрій хлориду). Дослідження проведено на зразках конструкційної вуглецевої сталі, яка є найбільш розповсюдженим матеріалом у різних галузях промисловості, будівництві та широко використовується для виготовлення побутових товарів. За результатами проведеного експерименту виявлено певний інгібувальний ефект окремих рослинних екстрактів та їх сумішей у співвідношенні 1:1. Встановлено, що ступінь інгібіторного захисту деяких вилучень знаходилася в межах 20,74–97,93%. Такий вплив мали чисті водні витяжки з кори дубу, супліддя вільхи, кореневища калгану та пагонів чорниці. А також аналогічний вплив здійснювала суміш витяжок з кори дубу та супліддя вільхи, і суміш витяжок з кори дубу та пагонів чорниці у співвідношенні 1:1. У розчині натрій хлориду (3%-вий розчин) найкращі результати продемонструвала суміш дуб+чорниця: коефіцієнт гальмування швидкості корозії цієї суміші становив 48,19, а ступінь інгібіторного захисту – 97,93%. У сульфатнокислому середовищі (10%-вий розчин) найбільший інгібіторний вплив виявили чисті витяжки з кори дубу та супліддя вільхи, та їх суміш, відповідно. Коефіцієнт гальмування швидкості корозії суміші дуб+вільха становив 5,27, а ступінь інгібіторного захисту – 81,05%.

Отримані результати показали, що досліджувані інгібітори рослинного походження мають гарний антикорозійний ефект у певних середовищах, тому їх подальше поглиблене вивчення представляється досить перспективним та актуальним, і сприятиме зменшенню антропогенного навантаження на екосистеми. *Ключові слова:* корозія металів, антикорозійний ефект, водні вилучення, інгібітори рослинного походження.

Study of anti-corrosion properties of aqueous extracts of plant raw materials. Petrusya Yu., Pushkarova Ye., Sokhriakova I.

The anti-corrosion properties of aqueous extracts from medicinal plant raw materials (oak, alder, galangal, bilberry – manufacturer of Private joint-stock company «Liktavy», Zhytomyr) which contain tannins was studied in standard corrosive media (10% solution of sulfuric acid, 3% solution of sodium chloride). The research was conducted on samples of structural carbon steel, which is the most used material in various industries, construction and is widely used for the manufacture of household goods. A certain inhibitory effect of certain plant extracts and their mixtures in a ratio of 1:1 was revealed by the results of the conducted experiment. It was established that the degree of inhibitory protection was within the range of 20,74–97,93%. Pure water extractions from oak bark, alder seeds, galangal root and bilberry shoots had such an effect. A mixture of extract from oak bark and alder fruit, and a mixture of extract from oak bark and bilberry shoots in a 1:1 ratio also had a similar effect. In the sodium chloride solution (3% solution), the best results were demonstrated by the mixture of oak and bilberry: the coefficient of inhibition of the corrosion rate of this mixture was 48,19, and the degree of inhibitory protection was 97,93%. In a sulfuric acid environment (10% solution), the greatest inhibitory effect was shown by pure extracts from oak bark and alder fruit, and the mixture, respectively. The coefficient of inhibition of the corrosion rate of the oak + alder mixture was 5,27, and the degree of inhibitory protection was 81,05%. The obtained results showed that the studied inhibitors of plant origin have a good anti-corrosion effect in certain environments, so their further in-depth study is quite promising and relevant. This will contribute to reducing the anthropogenic load on ecosystems. *Key words:* corrosion of metals, anti-corrosion effect, water extracts, inhibitors of plant origin.

Постановка проблеми. Корозія металів та сплавів на їх основі є однією з найпоширеніших причин передчасного виходу з ладу інженерних комунікацій, промислового обладнання, будівельних конструкцій та транспортної техніки. Надзвичайно актуальною проблемою корозії та протикорозійного захисту металоконструкцій залишається і для промисловості України. Це має виняткове значення у таких стратегічних галузях промисловості, як ядерна і теплова енергетика, магістральні нафто-, газо-, аміакопроводи, хімічна та нафтопереробна промисловість, залізничний транспорт, комунальне господарство тощо [1].

Аварійний вихід з ладу обладнання, зумовлений корозійними процесами, дуже часто спричиняє серйозні екологічні наслідки для навколишнього середовища. Зокрема, витік природного газу чи інших небезпечних речовин через отвори, що утворились у результаті корозії, може призвести до пожежі або вибухів зі значними матеріальними втратами, шкодою для довкілля, і, навіть, до людських жертв. Відновлення пошкоджень вимагає значних капіталовкладень, а щорічні втрати металофонду сягають до 15%.

Актуальність дослідження. Всесвітня організація з питань корозії (The World Corrosion Organization)

завичай присвячує свою щорічну доповідь до Всесвітнього дня знань про корозію (24 квітня), і акцентує увагу, що шляхи вирішення цієї проблеми пов'язані, передусім, з належним застосуванням наявних технологій боротьби з корозією та залученням досвідчених фахівців [1]. Одним з раціональних та ефективних рішень проблеми є застосування спеціально підібраних сполук – інгібіторів корозії. Пошук та дослідження екологічно безпечних сполук, так званих «зелених» інгібіторів корозії є на даний час актуальним напрямком у галузі захисту металів. За останні два десятиліття ведуться активні дослідження з пошуку та отримання так званих «зелених» інгібіторів: більш дешевих, легко доступних, які знижують ризик негативного впливу на навколишнє середовище. Джерелами таких речовин можуть бути нетоксичні та поновлювані рослинні відходи. Створення інгібіторів на основі природних сполук є важливим рішенням не тільки в галузі захисту металів, але й для питання утилізації багатотонажних відходів сільського господарства.

Перспективність використання рослинної сировини аргументована тим, що в Україні щорічно переробляються тисячі тонн рослинних культур, а отже, утворюється велика кількість відходів, перевагою яких є не тільки безпечність, а й щорічна поновлюваність та низька вартість.

Відходи рослинної промисловості є джерелом суміші органічних сполук різних класів, як легких так і високомолекулярних, що при цілеспрямованому доборі системи розчинників для їх вилучення, можуть забезпечити поліфункціональність протикорозійного захисту металів та сплавів у різних корозійних середовищах.

Отже, пошук та дослідження «зелених» інгібіторів корозії металів і сплавів є вкрай необхідними та актуальними.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження, проведені авторами, надасть цінну інформацію для розуміння можливості створення нових, екологічно безпечних інгібіторів корозії металів на основі рослинної сировини та сприятиме практичному вирішенню питання накопичення рослинних відходів сільського господарства. Крім того, отримані результати є важливими для запровадження ресурсозберігаючих технологій і залучення вторинних природних ресурсів для виготовлення нової продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом у всьому світі для запобігання або зменшення корозії металів і сплавів як інгібітори все частіше використовують рослинні екстракти та інші витяжки. У сучасній науковій літературі описано дослідження антикорозійних властивостей екстрактів і вилучень з багатьох рослин або відходів промисловості рослинного походження: артемізії блідої, листя османтуса запашного, лаванди зубчастої,

листя аргемони мексиканської, мангрового таніну, мирту звичайного, квітів календули, опунції індійської, рисового та кавового лушпиння, листя оливи, перської лакриці, мескітового дерева, нетреби звичайної, гінкго білоба, ашоки, кульбаби лікарської, часнику городнього, асафетиди (ароматична смола з коренів ферули смердючої), плодів кавуна, шкірки моркви, листя скунквіну, листя хни, плодів перцю довгого, екстракту стебла бакопи Моньє, листя мезембріантемуму вузлоцвітнього тощо.

Хорватські науковці вивчили антикорозійний ефект екстрактів 10 місцевих дикорослих рослин: насіння, плодів та шкірки гранату; листя меліси лікарської; виноградних вичавків; кореню кульбаби; листя і квітів пасифлори; кореню лопуха; кореню солодки; листя і квітів глоду; цибулі; листя манжетки звичайної. Дослідження показало значне зниження процесу корозії при застосуваннях екстракту кореня кульбаби та екстракту манжетки звичайної.

Розглянуто також антикорозійні властивості екстрактів лаврового листя, фініка їстівного, насіння льону звичайного, базилику, касії вузьколистої, лантани склепінчастої, тіноспори серцелистої, пеннісетуму пурпурового, філлантуса гіркового, акаліфи дубровниколистної, гороху посівного, м'яти круглолистої, квіток борщівника, земноводної рослини погостемону чотирилистої, мальви звичайної, ромашки золотистої, китайського гіркового гарбуза, європейської в'ялової пальми, мексиканського соняшника, індійської хризантеми, гарбузового насіння, ясеню звичайного, імбиру гіркового, вайди фарбувальної. За декілька останніх років з'явилися публікації щодо оцінювання потенціалу інгібування корозії екстрактів з лушпиння насіння соняшнику, кори какао, листя аквіларії, шкірки лонгану, насіння грифонії простолистої, коріння тирличу, листя клена гостролистого, трави перистоцетинника пурпурного і подорожника овального [2, 3].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Протягом останніх років цей напрямок досліджень активно розвивається у всьому світі, в тому числі і в Україні. Зокрема, вітчизняними науковими школами отримано композиції з антикорозійними властивостями на основі кори дубу та модифікованої гірчичної олії [1]. Проте більшість робіт українських вчених присвячена саме штучно створеним інгібіторам корозії, «зелені» інгібітори вивчені значно менше. Тому метою нашої роботи було вивчення ефективності інгібувального ефекту розчинів на основі кори дубу, супліддя вільхи, кореневища калгану, пагонів чорниці та їх сумішей у сульфатно-кислому середовищі та розчині натрій хлориду.

Новизна. Проаналізовано антикорозійну ефективність поширених лікарських рослин, що містять дубильні речовини (дуб, вільха, калган, чорниця) у стандартних корозійно активних середовищах.

Методологічне або загальнонаукове значення. Результати дослідження сприятимуть доповненню

вже існуючих відомостей про антикорозійні властивості екстрактів з рослинної сировини та перспективи створення на їх основі «зелених» інгібіторів. А також будуть дуже корисними при підготовці фахівців у галузі охорони навколишнього середовища та здобувачів вищої освіти технічних спеціальностей.

Матеріали та методи дослідження. Для дослідження було використано 4 зразки лікарської рослинної сировини: «Кора дубу», «Супліддя вільхи», «Кореневища калгану» та «Пагони чорниці» виробництва ПрАТ «Ліктрави», м. Житомир. Цей вибір сировини обумовлений тим, що є значна кількість наукових публікацій, присвячених пошуку інгібіторів на основі екстрактів дубової кори та стружки, які містять дубильні речовини (таніни) [1, 4].

Для аналізу було обрано зразки з конструкційної вуглецевої сталі (Ст3), яка є найбільш розповсюдженим матеріалом у промисловому і цивільному будівництві, всіх галузях машинобудування, використовується для виготовлення трубопроводів, обладнання інженерних мереж, обладнання у виробництві цукру, кондитерських виробів, спирту і лікєро-горілчанних виробів, а також для виробництва товарів широкого вжитку.

З подрібненої рослинної сировини готували водні вилучення, які відфільтрували і використовували у подальших дослідженнях. Отримані витяжки 4-х видів рослинної сировини змішували у пропорції 1:1 (витяжка кори дубу + витяжка однієї з інших рослин). Також окремо досліджували дію розчинів з кори дубу, супліддя вільхи, кореневища калгану та пагонів чорниці (без змішування).

Експеримент здійснювали в корозійноагресивному середовищі – 10%-му розчині сульфатної кислоти, а також у класичному модельному корозійноактивному середовищі – 3%-му розчині натрій хлориду. Розчин рослинного інгібітору вводили безпосередньо у корозійноактивне середовище. Паралельно проводили контрольний експеримент: визначали стійкість металу до корозії без присутності інгібітору в корозійноактивних розчинах (H_2SO_4 , NaCl).

Швидкість процесу корозії сталевих зразків оцінювали гравіметричним методом за стандартними показниками [5].

Викладення основного матеріалу. За результатами дослідження було виявлено певний інгібувальний ефект деяких рослинних екстрактів у сульфатнокислому середовищі та в розчині NaCl. Ступінь інгібіторного захисту знаходилася в межах 20,74–97,93%. Такий ефект мали чисті водні витяжки з кори дубу (зразок 2), супліддя вільхи (зразок 3), кореневища калгану (зразок 4) та пагонів чорниці (зразок 5). А також аналогічний вплив здійснювала суміш витяжок з кори дубу та супліддя вільхи (зразки 6, 14), і суміш витяжок кори дубу та пагонів чорниці (зразок 16) у співвідношенні 1:1 (рис. 1).

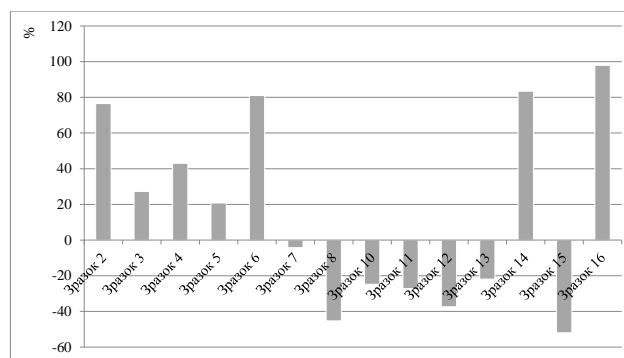


Рис. 1. Ступінь інгібіторного захисту (зразки 2–8 – у розчині H_2SO_4 , зразки 10–16 – у розчині NaCl)

Коефіцієнт швидкості гальмування корозії суміші дуб+чорниця в розчині натрій хлориду становив 48,19 (рис. 2), а ступінь інгібіторного захисту – 97,93%.

У сульфатнокислому середовищі найбільший інгібіторний вплив виявили чисті витяжки з кори дубу та супліддя вільхи, та їх суміш, відповідно. Коефіцієнт гальмування швидкості корозії суміші дуб+вільха становить 5,27, а ступінь інгібіторного захисту – 81,05%. Інші запропоновані інгібітори при аналізі показників не проявили захисної дії.

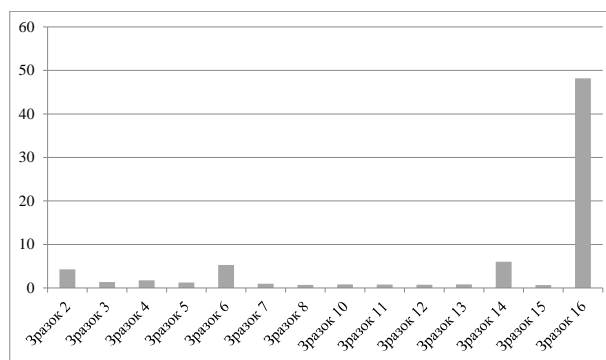


Рис. 2. Коефіцієнт гальмування швидкості корозії (зразки 2–8 – у розчині H_2SO_4 , зразки 10–16 – у розчині NaCl)

У наукових публікаціях за останні роки наголошується, що застосування водних екстрактів є кращим порівняно з екстрактами, що виготовлені на основі органічних розчинників, оскільки саме водні екстракти містять відносно полярні органічні речовини, що забезпечують міцне зв'язування з металевими поверхнями, ніж у неполярних речовин екстрактів [6].

Науковцями доведено, що у корозійноактивних середовищах процес інгібування рослинними екстрактами є більш складним, з поетапною хімічною трансформацією компонентного складу екстракту в розчині (або на поверхні металу), що є сучасним

та новітнім «поглядом» на механізм інгібувальної дії саме рослинних екстрактів [6].

Зазначається, що інгібувальна ефективність рослинного екстракту суттєво залежить від типу корозійного середовища, в якому буде функціонувати інгібітор, і тому необхідним є розуміння щодо екстракції певних класів сполук, які є потенційно протикорозійно ефективними у даному середовищі та здатні до формування бар'єрних плівок, або формування нерозчинних комплексних сполук із катіонами феруму. Наприклад, у нейтральних водних та водно-сольових розчинах, 3%-му розчині NaCl високу антикорозійну ефективність для сталі демонструють як екстракти, що містять значну кількість поліфенольних сполук та здатні до фізичної або хімічної адсорбції на поверхні металу, утворення комплексних сполук з катіонами Fe^{2+} та формування захисної плівки, так і ті екстракти, що містять терпенові сполуки, олії та формують адсорбційну плівку, що блокує доступ кисню до поверхні металу.

Встановлено, що введення інгібітору корозії безпосередньо у корозійноактивне середовище чинить кращий ефект післядії, а витримування зразків металу у розчині інгібітору зумовлює утворення захисних плівок на поверхні, які надійніше захищають метал на початковому етапі впливу агресивного середовища [4].

Основною діючою речовиною в екстракті кори дубу є суміш природних поліфенольних сполук (танінів) з молекулярною масою від 500 до 3000. Інгібувальний ефект дубильних речовин посилюється, ймовірно, також за рахунок присутності в розчині силосанових сполук, які поліпшують адгезію до поверхні металу. Речовини формують на поверхні металу адсорбційні шари, фазові танатні сполуки, що й обумовлює їхні інгібіторні властивості [4].

Відомо, що захисна дія інгібіторів на основі екстрактів дубової кори полягає у формуванні на поверхні сталі хемосорбційної плівки, яка забезпечує

гальмування електродних реакцій. Поверхня металевих зразків набуває синьо-чорного забарвлення, характерного для танатів заліза, а утворена захисна плівка міцно зчеплена з поверхнею металу. Молекули танінів заповнюють мікротріщини та інші дефекти поверхні, що підвищує корозійну стійкість металу [4].

Враховуючи все вищевказане, можна зробити висновок, що механізм дії інших рослинних екстрактів, які також містять суміш танінів й були використані нами в дослідженні, схожий на механізм дії екстракту кори дубу.

Головні висновки. Найкращий інгібувальний ефект у розчині натрій хлориду показала суміш витяжок з кори дубу і пагонів чорниці у співвідношенні 1:1, а в сульфатнокислому середовищі – суміш витяжок з кори дубу та супліддя вільхи. Отримані результати показують, що інгібітори рослинного походження мають гарний антикорозійний ефект в певних середовищах, тому подальше вивчення та дослідження «зелених» інгібіторів є досить перспективним та необхідним. Застосування інгібіторів корозії рослинного походження дозволить зменшити обсяги відходів сільського господарства й економічні витрати, та знизити негативний вплив на навколишнє середовище, що сприятиме підвищенню екологічної безпеки довкілля.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати вказують на перспективність подальших досліджень зазначених рослинних екстрактів та розширення спектру експерименту. Зокрема, цікавим напрямком буде вивчення антикорозійних властивостей спиртових витяжок з рослинної сировини, що містить дубильні речовини. А також збільшення часу експозиції у агресивнокорозійних середовищах, варіювання способів приготування екстрактів, попереднє витримування зразків у розчинах з рослинної сировини, вивчення протикорозійних ефектів за інших значень рН (в лужному середовищі).

Література

1. Хома М.С. Стан і перспективи розвитку досліджень у галузі корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів в Україні. *Вісник НАН України*. 2021. № 12. С. 99–106.
2. Петруша Ю.Ю., Сохрякова І.М. «Зелені» інгібітори корозії металів. *Тиждень науки-2024*: Збірник тез доповідей щорічної науково-практичної конференції серед студентів, викладачів, науковців, молодих учених і аспірантів (Запоріжжя, 15–19 квітня 2024 р.). Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. С. 121–122.
3. Петруша Ю., Пушкарьова С. Актуальність створення інгібіторів корозії металів на основі рослинних екстрактів. *Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи*: тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 16–17 листопада 2023 р.). Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2023. С. 260.
4. Гулай О., Шемет В., Жилко В., Клімович О. Інгібіторна ефективність і склад екстракту кори дуба. *Праці НТШ. Хім. науки*. 2020. Т. LX. С. 107–117.
5. Повзло В.М. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Корозія та захист металів» для студентів спеціальності 136 «Металургія» усіх форм навчання. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 34 с.
6. Воробйова В.І. Інгібітори корозії металів комплексної дії на основі природних органічних сполук: дис. ... док. техн. наук: 05.17.14. Київ, 2023. 472 с.

РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ АДАПТИВНОГО МОНІТОРИНГУ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ НА МОДЕЛЬНИХ ЗАСАДАХ

Федоряк М.М.¹, Черлінка Л.В.², Черлінка В.Р.^{3,4},
Москалик Г.Г.¹, Легета У.В.¹, Жук А.В.¹,
Ситнікова І.О.¹, Москалик І.М.¹, Курищук А.Д.²

¹Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
вул. Коцюбинського, 2, 58012, м. Чернівці

²ГО ТГЗБ «Терра»

пров. Смотрицький, 8, 58009, м. Чернівці

³Institute of Geography, Pavol Jozef Šafárik University in Košice
Jesenná 5, 04001, Košice, Slovakia

⁴EOS Data Analytics

800 W El Camino Real, Mountain View, CA, 94040, USA

m.fedoriak@chnu.edu.ua, g.moskalyk@chnu.edu.ua,

u.legeta@chnu.edu.ua, a.zhuk@chnu.edu.ua,

i.sytnikova@chnu.edu.ua, liubov.cherlinka@gmail.com,

vasyl.cherlinka@upjs.sk, vasyi.cherlinka@eosda.com

Запропоновано метод отримання високоякісної гідрологічно-коректної та екологічно відповідної цифрової моделі рельєфу, яка є базисом для подальшого різнопланового моделювання. Для заповнення прогалів у ґрунтовій карті та нівелювання наявних помилок у картографічних матеріалах розроблено і апробовано інноваційний спосіб картографічного прогнозного моделювання для суміжних територій, де відсутня або недостатня інформація про ґрунтовий покрив. В цьому підході використовуються 14 типів предикативних алгоритмів, зокрема алгоритм Random Forest, який показав найкращі результати для симуляції. Також досліджено ефективність моделі водної ерозії SIMWE для більш точної оцінки ерозійних явищ. Це важливо для розробки системи протиерозійних заходів на вищому рівні та оцінки різних сценаріїв та стратегій боротьби з ерозійними процесами. Додатково проведено прогнозне моделювання та картографування рівноважної щільності ґрунтів на основі розробленої педотрансферної моделі, що дозволяє оцінювати потенційну динаміку екологічних функцій ґрунтів в умовах посиленого антропогенного навантаження та ризиків втрати продуктивності ґрунтового покриву. Крім того, здійснено модельну реалізацію секвестрації Карбону за різними сценаріями збільшення надходження органічної речовини до ґрунтів. Виявлено, що навіть провідних практик землекористування часто недостатньо для нейтралізації розкладу органічного Карбону в ґрунтах. Тому для таких ареалів важливо приділити увагу прогресивним видам агротехніки та консерваційним практикам. Нарешті, розроблено картографічну методику визначення площ забруднення ґрунтів важкими металами та іншими поллютантами з урахуванням місцевих особливостей території. Цей підхід дозволяє передбачити ареали концентрацій забруднення на основі сукупності горизонтальної та вертикальної кривизн топографічної поверхні. *Ключові слова:* адаптивний моніторинг, екосистемні послуги, моделювання, ЦМР, предикативні алгоритми, ерозія, щільність ґрунту, секвестрація карбону.

Development of elements of adaptive monitoring of ecosystem services on a model basis. Fedoriak M., Cherlinka L., Cherlinka V., Moskalyk H., Legeta U., Zhuk A., Sytnikova I., Moskalyk I., Kuryshchuk A.

A method of obtaining a high-quality hydrologically correct and ecologically appropriate digital elevation model is proposed, which is the basis for further multi-faceted modeling. To fill the gaps in the soil map and level existing errors in the cartographic materials, an innovative method of cartographic predictive modeling was developed and tested for adjacent territories where there is no or insufficient information about the soil cover. This approach uses 14 types of predicative algorithms, in particular the Random Forest algorithm, which showed the best results for the simulation. The effectiveness of the SIMWE water erosion model for a more accurate assessment of erosion phenomena was also investigated. This is important for the development of a system of anti-erosion measures at the highest level and the evaluation of different scenarios and strategies for combating erosion processes. In addition, predictive modeling and mapping of the equilibrium density of soils was carried out based on the developed pedotransfer model, which allows evaluation of the potential dynamics of ecological functions of soils in conditions of increased anthropogenic load and risks of loss of soil cover productivity. In addition, a model implementation of carbon sequestration was carried out under various scenarios of increasing the supply of organic matter to the soil. It has been found that even leading land use practices are often insufficient to neutralize the decomposition of organic carbon in soils. Therefore, it is important to pay attention to progressive types of agricultural technology and conservation practices for such habitats. Finally, a cartographic method for determining the areas of soil contamination by heavy metals and other pollutants was developed, taking into account the local features of the territory. This approach allows predicting areas of pollution concentrations based on the combination of horizontal and vertical curvatures of the topographic surface. *Key words:* adaptive monitoring, ecosystem services, modeling, DEM, predictive algorithms, erosion, soil density, carbon sequestration.

Постановка проблеми. Ряд досліджень самої концепції моніторингу як такого, виділяють три основні проблеми, які перешкоджають його ефективності, зокрема: хибні рушійні сили (радше політичні рішення, ніж наукові); невдалий початковий дизайн; відсутність чіткості щодо цілей і компонентів [1, 2]. Знайденим рішенням даних проблем є створення так званого «адаптивного моніторингу», пов'язаного із екосистемними послугами. Відповідно, розробка методологічної основи для здійснення адаптивного просторового, багатопланового та різномасштабного моніторингу екосистемних послуг, є необхідним елементом, який дозволить охопити весь діапазон мінливості соціоекологічних систем в умовах агроландшафтів з різними фізичними властивостями за дії чинників соціальної та екологічної природи. Водночас такий підхід мінімізує ризики щодо згаданих базових проблеми, які перешкоджають ефективності моніторингу.

Актуальність дослідження. Необхідність слідування парадигмі адаптивного моніторингу явно назріла і якісна реалізація окремих положень вирішить багато проблем, які підірвали попередні спроби встановити довгострокові дослідження та моніторинг. Адаптивна структура моніторингу дозволяє програмам моніторингу розвиватися ітеративно, коли з'являється нова інформація та змінюються питання дослідження [1]. При цьому надзвичайну високу роль відіграють ґрунти, які є серцем наземних екосистем і мають вирішальну роль у їх функціонуванні.

Екосистемні послуги (ЕП) тісно пов'язані із властивостями ґрунтів і якщо раніше більшість досліджень зосереджені на забезпеченні та регулюванні ЕП, що стосуються фізико-хімічних властивостей ґрунтів, то в останні десятиліття значна увага звертається на вивчення регулюючих послуг, таких як поглинання Карбону ґрунтами, а відтак регулювання клімату та газообміну [3, 4]. Саме тому вивчення окремих аспектів системи ҐРУНТ-ЕП, зокрема моделювання секвестрації Карбону на різних типах агроландшафтів, моделювання ерозійно-денудаційних процесів для оцінки потенційного зниження стійкості агроекосистем, картографічне моделювання континуального розподілу щільності ґрунтів та розробка методики визначення ареалів потенційного забруднення ґрунтів можуть бути використані у розробці місцевої та національної політики та програми використання та управління природними ресурсами, що є, безмовно, необхідним та актуальним.

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

Деградація ґрунтів в Україні – серйозна екологічна проблема та загроза для надання ними якісних екосистемних послуг [5]. Серед основних аспектів деградації ґрунтів науковці наводять: ерозію, забруднення, дефляцію органічної речовини, ущільнення ґрунтів тощо. Інтенсивний обробіток сильнозмитих

ґрунтів приречені на цілковиту деградацію [6]. Для вирішення окресленої проблеми ґрунтів необхідні комплексні заходи. Розглядається можливість [7] виведення таких угідь із постійного землекористування та формування агрофітоценозів на основі багаторічних енергетичних культур. У наведеному дослідженні пропонується метод моделювання, який дозволяє детально як аналізувати наявні показники, так і прогнозувати вплив різних факторів на ґрунти та розробляти оптимальні стратегії для їх збереження та відновлення.

Розв'язанню наведених актуальних завдань у науковому і практичному плані і присвячені як попередні, так і поточне дослідження, яке виконувалося на базі кафедри екології та біомоніторингу Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича в межах науково-дослідної роботи № 51.803 «Моніторинг і оптимізація екосистемних послуг в умовах деструктивних агровиробничих впливів на засадах концепції соціоекологічної системи» (2022–2024 рр.), зареєстрованої Українським інститутом науково-технічної експертизи та інформації (державний реєстраційний номер 0122U001217), відповідно до: наказу МОН України від 29.12.2021 № 1461 «Про затвердження переліку проєктів фундаментальних і прикладних досліджень та науково-технічних (експериментальних) розробок закладів вищої освіти та наукових установ на 2022 рік, що належать до сфери управління Міністерства освіти і науки України, з експертними оцінками, отриманими за результатами проведення наукової і науково-технічної експертизи», наказу МОН України від 21.01.2022 № 50 «Про обсяги фінансування наукових досліджень і розробок та фінансової підтримки наукових об'єктів, що становлять національне надбання, на 2022 рік за КПКВК 2201040, наказу МОН України від 31.01.2022 № 77 «Про формування тематичних планів наукових досліджень і розробок закладів вищої освіти та наукових установ на 2022 рік, рішення Науково-технічної ради ЧНУ (протокол № 1 від 26.01.2022 р.); наказу по Чернівецькому національному університету імені Юрія Федьковича від 27.01.2022 р. № 33 «Про затвердження переліку нових держбюджетних тем, що розпочинаються у 2022 р.».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Рівноважну щільність ґрунтів оцінюють як найбільш узагальнюючий параметр фізичних властивостей ґрунтів та використовують як індикатор змін фізичного стану ґрунту. Безпосереднє вимірювання щільності залежно від країни, досить широко використовується в сільськогосподарських дослідженнях для визначення ущільнення ґрунтів насамперед ріллі, що спостерігається при різних системах обробки ґрунту. Загалом ця проблема стоїть досить гостро як в Україні [8], так і в інших країнах [9, 10]. Проблема агрофізичної деградації ґрунтів, поряд з іншими її видами, несе загрозу сталому використанню ґрун-

тів та виконання ними своїх глобальних функцій. Практичне значення щільності пов'язане найперше з продуктивністю сільськогосподарських культур, які вимагають певного екологічного оптимуму ґрунтових умов і ґрунтових показників. Відхилення від оптимуму щільності лімітує засвоюваність нутрієнтів рослинами [11, 12].

Не менш важливим щодо практичного використання показника щільності є моніторинг секвестрації/емісії Карбону ґрунтами, що контролюється через визначення запасів Карбону у ґрунтах [13]. Такі підрахунки ведуться для певної площі з використанням власне вмісту Карбону, потужності генетичних горизонтів чи шарів ґрунту та щільності ґрунту [12, 14, 15]. При однаковому вмісті Карбону у ґрунтах, але різній їх щільності запаси Карбону будуть істотно відрізнятися. В моніторингу нейтрального рівня деградації ґрунтів виявлено, що зменшення власне вмісту органічного Карбону супроводжується зменшенням пористості ґрунтів, їх водоутримуючої здатності, пришвидженням ерозії.

Велику роль у плануванні обсягів виробництва та моніторингу за зміною ґрунтових показників належить польовим ґрунтовим обстеженням. Але в Україні, у п'ятирічному циклі досліджуються тільки основні агрохімічні параметри (вміст NPK, гумусу і рН), а інші показники, у т.ч. і щільність ґрунтів аналізуються час від часу, або взагалі не досліджуються [16–18]. Тому одним із завдань дослідження є розробка методології підбору адекватної моделі рівноважної щільності на основі скінченого набору параметрів та створенні континуальних карт цього показника для практичних потреб, зокрема оцінки деградаційних ризиків, оцінки запасів Карбону у ґрунтах і, в результаті цього, забезпечення сталого менеджменту землекористування на різних рівнях.

Величезна увага в світі прикута до потенціалу зв'язування Карбону ґрунтами сільськогосподарських ландшафтів, як одного з найбільш рентабельних з екологічної точки зору рішень для пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до нього [19, 20]. Однак реалізація цього потенціалу залежить від створення ефективних механізмів моніторингу, звітності та перевірки змін в запасах органічного карбону ґрунтів [21]. У будь-якому разі, перший крок – це ініційована під егідою ФАО програма створення Глобальної карти потенціалу секвестрації органічного карбону на основі мережі національних карт [22]. Методи сталого управління ґрунтами, які розглядаються в рамках цього підходу, безпосередньо переводяться в три рівні надходження Карбону до ґрунту. Вони визначаються у відсотках збільшення знаходження Карбону відносно до звичайного сценарію землекористування. Використання заздалегідь визначених відсоткових показників при збільшенні обсягу надходження Карбону (Low/SSM1 – 5%, Medium/SSM2 – 10%, High/SSM3 – 20%) забезпечує застосування моделі RothC [23–25].

Очолує перелік деструктивних явищ щодо ґрунту водна та вітрова ерозія. Виникнення та розвиток процесів водної ерозії – одна з найактуальніших проблем для довкілля України. Ерозія – провідний чинник втрати родючого шару ґрунту, тобто його деградації як природно-економічного ресурсу. Вона є актуальною навіть для відносно посушливих районів, оскільки зливовий характер опадів передбачає моментальне виникнення тимчасових водних потоків, які зумовлюють виникнення лінійних ерозійних елементів. Проведений ґрунтознавцями України детальний аналіз засвідчив, що сукупність негативних факторів має позитивну динаміку [16]. Натурні обстеження в польових умовах попри очевидні переваги, мають величезний недолік – високу вартість як фінансову, так і часову. Тому використання сучасних способів діагностики, моніторингу та моделювання ерозійних явищ – це практично єдиний вихід із ситуації, яка склалася [26–28]. Акцент на запобіжні заходи з адекватними відповідями ризикам можливий за умов використання сучасних методів аналізу причинно-наслідкових взаємодій, які відбуваються у системі рельєф-ґрунт-вода. Практично єдиний засіб вирішення подібних завдань – це геоінформаційні системи, до яких входять і певні інструменти моделювання. Останні реалізують схеми поведінки та взаємодії факторів ерозійної небезпеки ґрунтоучись, залежно від складності, на більшу чи меншу кількість фізичних законів. Відповідно, точність передбачених ерозійних процесів і ареалів їх поширення визначатиметься базовою моделлю, форма і сутність якої повинна якнайкраще відповідати прикладним завданням землеустрою. Актуальна вимога до моделі – це її відносна простота та швидкість опрацювання даних, що надважливо для практики [29]. У дослідженнях водної ерозії ґрунтів і деградації внаслідок цього впливу земельних ресурсів рельєф загалом відіграє важливу роль. Тому в цій галузі розроблялися вагомні фізико-математичні моделі як емпіричного, так і теоретичного характеру [30–32]. Фундамент сучасних досягнень у сфері поєднання ерозійних моделей з геоінформаційними системами вже закладено, а ці результати є теоретичною основою для практичної реалізації просторового аналізу та моделювання. Вони також надають додаткову інформацію для правильного використання земельних ресурсів у районах поширення водної ерозії, мінімізації втрати земель сільськогосподарського призначення та обрання найефективніших протиерозійних заходів, незалежно від типу господарств.

Величезна кількість забруднюючих речовин різного роду має високу рухливість за рахунок міграції в розчиненому вигляді або адсорбованих на поверхні частинок ґрунту під час їх переміщення внаслідок ерозійних процесів. Сучасний моніторинг базується на кількох моделях руху водних потоків і наносів або на використанні поняття кривизни топографічної поверхні. Використання ГІС для його розрахунку та

використання для цілей моніторингу значно підвищує його ефективність [33]. Знаючи розташування точок зосередженого накопичення, можна встановити орієнтовні схеми розподілу потоку твердих частинок і розчинених речовин з метою прогнозування траєкторій руху всіх видів забруднюючих речовин. Застосування такого підходу особливо актуально при слабкому рельєфі, де неможливо візуально визначити розташування забруднюючих речовин. Проте загальною проблемою ретельного моніторингу, незалежно від його виду, є вибір мінімально необхідної кількості контрольних точок, у яких будуть відбиратися проби для проведення аналітичних процедур. У зв'язку з нерівномірним розподілом забруднення навколишнього середовища велике значення має створення мережі точок відбору проб на основі інноваційних методів (на відміну від класичних на основі рози вітрів, перетинів ліній кілометрової сітки, секторно-сегментних схем відбору). Сучасна геоморфологія вивчає польові форми рельєфу Землі з точки зору особливостей системи «земна поверхня – поле тяжіння» [34, 35]. З чотирьох класів морфометричних змінних і понять найбільший інтерес представляють ті, що визначають два основні механізми накопичення: кривизну в плані і профілі. Перший механізм акумуляції відображає конвергенцію поверхневих потоків [36]. Показано, що розбіжність ліній потоку дорівнює кривизні поверхні в плані (k_p). Це є основою для кількісного опису першого механізму накопичення. Другий механізм накопичення, як було доведено науковцями [36], є похідною від коефіцієнта градієнта вздовж лінії потоку і репрезентує вертикальну (або профільну) кривизну k_v . Таким чином, другий механізм накопичення діє на профільно-увігнутих схилах, де $k_v < 0$, і може бути описаний за допомогою k_v -карт (аналогічно k_p). Тому лінії току сходяться там, де $k_p < 0$ (зони конвергенції), і розходяться, де $k_h > 0$ (зони дивергенції). На відміну від першого типу накопичення, другий тип показує, що потоки сповільнюються там, де $k_v < 0$ (області відносного уповільнення), і прискорюються, де $k_v > 0$ (області відносного прискорення).

Для узагальнення цих двох основних типів акумуляції пропонується використовувати акумулятивну кривизну (K_a) [36]. K_a – добуток вертикальної та горизонтальної кривизни і дорівнює $K_a = k_p * k_v$. Класична теорія стверджує, що накопичувальна кривина – це інтегральна змінна, а одиницею K_a є m^{-2} . Однак при встановленні точок моніторингу цей алгоритм розрахунку нами дещо модифікований [33].

Отримані на основі такого підходу картографічні моделі з розташуванням потенційно максимальних концентрацій забруднюючих речовин розширюють можливості моніторингу навколишнього середовища, допомагають визначити швидкість розповсюдження забруднюючих речовин та визначити природні бар'єри, де можливе накопичення токсикантів.

Пропоновані нами моделі сприяють правильному визначенню контрольних точок при розробці відповідних програм моніторингу.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Об'єднання різноманітних підходів для комплексної розробки методологічної основи для здійснення адаптивного просторового, багатопланового та різномасштабного моніторингу екосистемних послуг, зосереджених, зокрема, в площинах оцінки та моделювання як їх прямих складових (щільність ґрунтів), опосередкованих (процеси ерозії), безпосередніх (моделювання секвестрації Карбону агроландшафтами) та побудова схеми ареалів моніторингу на основі геоморфологічного аналізу моделі рельєфу здійснюється вперше.

Новизна. Розроблено технологічну схему адаптивного просторового, багатопланового та різномасштабного моніторингу екосистемних послуг для отримання бажаних результатів, яка складається з ряду послідовних елементів:

1. створення/підготовка цифрової моделі рельєфу;
2. побудова предикативних ґрунтових карт із залученням 14 типів предикативних алгоритмів;
3. моделювання ерозійно-денудаційних процесів для оцінки потенційного зниження стійкості агроекосистем;
4. моделювання континуального розподілу щільності ґрунтів;
5. моделювання секвестрації Карбону на основі моделі RothC;
6. визначення ареалів потенційного забруднення ґрунтів із використанням картографічної методики на основі геоморфологічного аналізу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропоновано способи підготовки цифрової моделі рельєфу (ЦМР) як базису для подальшого моделювання ґрунтової ситуації та прояву процесів водної ерозії (включно із параметризацією алгоритму інтерполяції поверхонь для отримання гідрологічно-коректних ЦМР). Описано методику оцифрування та геоприв'язки оригінальних сканів архівних ґрунтових карт та побудови предикативної ґрунтової карти. Удосконалено наявні методи моделювання та картографування об'ємної щільності ґрунту. Запропонована картографічна методика визначення ареалів забруднення ґрунтів.

Матеріал і методи досліджень. В якості об'єкта обрано фрагмент території України (Рис. 1а) в межах Чернівецької області – ареал колишнього Кіцманського району (Рис. 1б). Даний фрагмент загальною площею 610 км² має різне адміністративне підпорядкування та господарське використання, а при його виборі та підготовці матеріалів були вирішені типові проблеми, що часто виникають при роботах такого характеру [37–43]. На даний час великомасштабними ґрунтовими обстеженнями охоплено лише 366 км², або 60% території.

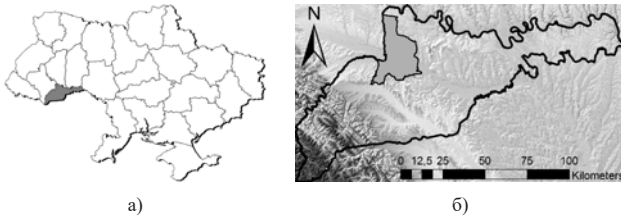


Рис. 1. Географічне розташування регіону досліджень в межах України (а), Кіцманського району Чернівецької області (б), *для фону використано дані SRTM – NASA's Shuttle Radar Topography Mission

Основа моделювання – це цифрова модель рельєфу. Її джерелом на території України можуть бути як вільнодоступні дані дистанційного зондування (максимальна якість $1 \text{ arcsec} \approx 30 \text{ м}$), так і отримані власноруч шляхом оцифрування топографічних карт великого масштабу [44]. Як показало згадане дослідження, існує значний вплив джерел ЦМР на якісні характеристики предикативних карт ґрунтового покриву та на всі інші похідні карти. Навіть використання алгоритмів знешумлення [45] на глобальних ЦМР типу SRTM, ALOS, Aster у завданнях предикативного моделювання дає менш якісний результат ніж з використанням згенерованої з топографічних карт ЦМР [44].

Відповідно до поставленої мети нами визначені наступні завдання: а) оцифрування та атрибування картографічних матеріалів масштабу 1:10000; б) побудова ЦМР з роздільною здатністю рівною 10 м з використанням регуляризованих напружених сплайнів [46]; в) аналіз цифрових моделей рельєфу і виділення з них у ГІС GRASS набору карт морфометричних та інших похідних характеристик; г) генерація навчальних вибірок; д) створення в R-statistic симулятивної моделі ґрунтового покриву з використанням предикативного алгоритму Random Forest [47] як для ареалів з наявною ґрунтовою інформацією, так і для тих, де вона не представлена; е) моделювання водної ерозії; є) розробка педотрансферних функцій (залежність між рівноважною щільністю, вмістом гумусу та гранулометричним складом); ж) побудова картографічної моделі рівноважної щільності ґрунтів; з) RothC моделювання секвестрації Карбону; и) побудова картографічних моделей локацій з потенційно максимальними концентраціями забруднюючих речовин на основі акумулятивної кривизни.

Для опрацювання даних використані інструментальні можливості вільного програмного забезпечення: георектифікація і оцифрування картографічного матеріалу – ГІС Quantum [48], підготовка карт морфометричних параметрів і генерація ЦМР – ГІС GRASS [49] та симуляція карт ґрунтового покриву – мова статистичних розрахунків R-statistic [50]. На основі цифрової моделі рельєфу виділили ряд морфометричних характеристик рельєфу, які послу-

вали предикторами: крутизна та експозиція схилів, кривизни поверхні (поздовжньої та максимальної), сонячна радіація, форми рельєфу. Також згенеровані додаткові карти гідрологічних показників: топографічного індексу вологості, акумуляції, напрямку та довжини водних потоків і відстані до них.

Ерозійне моделювання та оцінку потенційних ризиків ерозійних явищ проводили на основі аналізу ЦМР з використанням моделі SIMWE [32, 51–53]. Параметри моделі обрані згідно даних S. Koko [54].

Для створення симулятивних моделей ґрунтового покриву використали розроблений нами скрипт на мові R-statistic [50], який включає ряд адаптацій для вирішення поставлених завдань та реалізує 14 основних типів предикативних алгоритмів.

Для оцінки якості отриманих моделей використали індекс каппа Коена k [55, 56]. В математичному експерименті на відміну від дослідження [44] аналізувалася картограма агро виробничих груп ґрунтів з дефініціями по гранулометричному складу, тобто використовувалися буквенні індекси шифрів гранулометричного складу агро виробничих груп ґрунтів.

Виявлення тісноти та виду зв'язків між рівноважною щільністю, вмістом гумусу та гранулометричним складом (зокрема вмістом фізичної глини) можливе при створенні відповідних моделей, або педотрансферних функцій [9, 10, 57–62]. Таке моделювання зменшує час експериментальних досліджень, а також дозволяє створити просторову континуальну модель щільності ґрунту для агроландшафтів. Емпіричні дані щодо об'ємної щільності (bd), гранулометричного складу ґрунту (фізичної глини) та вмісту гумусу (hum) для моделювання педотрансферних залежностей отримані з двох джерел: частина набору даних, наданого ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського» – 130 значень, та власний набір даних – 144 значення, 274 сумарно [63]. Дані сформованої вибірки використовували для розробки власних педотрансферних моделей. Надалі підібрана педотрансферна модель використовувалась для побудови картографічної моделі рівноважної щільності ґрунтів.

RothC-моделювання секвестрації Карбону проведено відповідно до етапів [22] із вдосконаленнями запропонованими у [64], які уточнюють реалізований процес моделювання секвестрації діоксиду Карбону ґрунтами [65, 66], зокрема:

1. підготовка даних (збір, гармонізація);
2. моделювання (підетапи Spin Up, Warm Up, Forward);
3. генерування карт (всього 28 варіацій для BAU, SSM1, SSM2, SSM3):
 - 3.1. базові результати (7 карт): фінальний вміст Карбону в ґрунтах (tC/ha) і невизначеності (%);
 - 3.2. абсолютні різниці вмісту Карбону (4 карти): SSM 1-3-T0 (tC/ha);
 - 3.3. абсолютна швидкість секвестрації (8 карт): Abs. Diff/20 years (tC/ha/year);

3.4. відносні різниці вмісту Карбону (3 карти): SSM1-3 – BAU (tC/ha/year);

3.5. відносна швидкість секвестрації (6 карт): Rel. Diff./20 years (tC/ha/year) і невизначеності (%).

Для перелічених етапів використані як вільні загальнодоступні джерела даних (кліматичні дані та землекористування із супутникових джерел), так і власні вхідні дані по ґрунтам, зокрема модельний вміст фізичної глини та вміст органічного карбону (Табл. 1). Для побудови картографічної моделі акумулятивної кривизни топографічної поверхні, яка відображає потенційну акумуляцію поллютантів на основі сукупності горизонтальної та вертикальної кривизни поверхні використано розроблену методику, яка нівелює притаманні оригінальній акумулятивній логічній протиріччя [33, 67] з реалізацією скрипта на Python [68] у середовищі ГІС GRASS [49].

Виклад основного матеріалу.

1. ЦМР та предикативна ґрунтова карта

Для побудови цифрової моделі рельєфу топографічні карти георектифікувалися з використанням створеної векторної математичної основи та залученням 40–45 точок прив'язки на лист, а відповідні горизонталі оцифровані та атрибутовані (Рис. 2а, фрагмент), і у подальшому на їх основі згенерували ЦМР у ГІС GRASS з використанням регуляризованих напружених сплайнів (Рис. 2б). Автоматизований підбір їх параметрів для мінімізації середньоквадратичної помилки RMSE згідно процедури кросс-валідації [69, 70] реалізували розробленим скриптом на bash [71], що дозволило отримати якісну гідрологічно-коректну та екологічно-відповідну ЦМР.

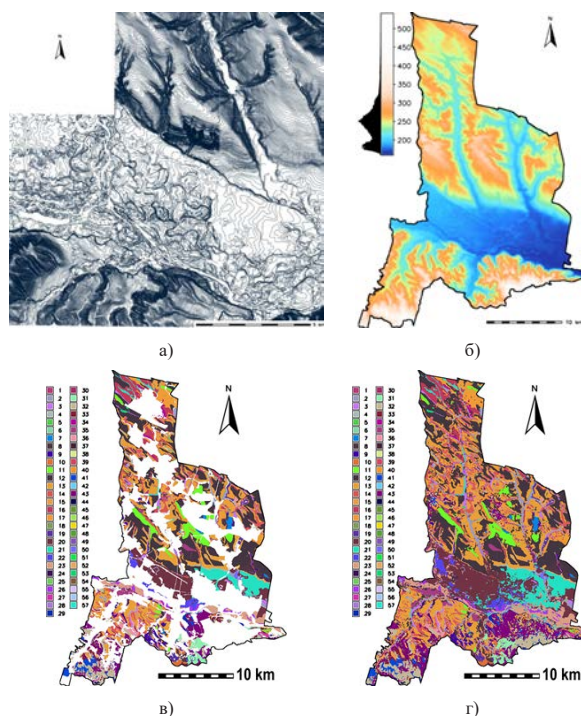


Рис. 2. Оцифровані горизонталі (а, фрагмент) та побудована на їх основі 10 м ЦМР (б); оригінальна картограма агровиробничих груп ґрунтів* (в) та повна предикативна модель ґрунтової ситуації* (г); *у легенді для полегшення візуального сприйняття ґрунтової текстури, що належать 57 агровиробничим групам (враховуючи індекси гранулометричного складу – 153 позиції) зведено до простого переліку агрогруп без диференціації за гранскладом

Таблиця 1

Джерела вхідних даних для моделі RothC, модифіковано на основі [22]

Дані	Вимоги до вхідних даних				Роздільна здатність
	Змінні	Часові серії	Одиниці	Тип даних	
Кліматичні	Місячна температура повітря	1980–2000; 2001–2023	°C	Растр	4x4 км переінтерпольовані до 10 м)
	Місячна евапотранспірація	1980–2000; 2001–2023	mm	Растр	4x4 км переінтерпольовані до 10 м)
	Місячні опади	1980–2000; 2001–2023	mm	Растр	4x4 км переінтерпольовані до 10 м)
Ґрунтові	Вміст глини (0–30 cm)	Власні дані	%	Растр	10 м
	Поточний вміст органічного Карбону (0–30 cm)	Власні дані	tC ha-1	Растр	10 м
Землекористування/ покрив	Землекористування/ покрив рекласифіковані до 12 класів FAO Global Land Cover – SHARE (GLC-SHARE)	Minimum: representative 2000–2020 (or last year available) Optimum: annual land use 2000 to 2020	1–11	Растр	10 м
	Помісячний вегетаційний покрив (відповідно до NDVI)	Середнє помісячно за 2015–2023	0–1	Растр	10 м

Грунтові матеріали базувалися на серії архівних ґрунтових карт колгоспів та радгоспів Кіцманського району радянської доби (зйомка 1957 р. та корекція 1970–1980-х рр.) Після узагальнення номенклатурного списку ґрунтів та узгодження їх контурів, отримано дані щодо відсотка покриття території ґрунтовими обстеженнями: 60,3% від загальної площі, для решти дані повністю відсутні (Рис. 2в). Для заповнення прогалів у ґрунтовій карті та нівелювання наявних помилок у картографічних матеріалах використана симуляція на основі предикативного алгоритму Random Forest. Підготовлена ЦМР застосована для отримання карт морфометричних характеристик рельєфу, які послуговували предикторами в моделюванні, зокрема крутизна та експозиція схилів, кривизни поверхні (поздовжня та максимальна), сонячна радіація, форми рельєфу тощо. Також згенеровані додаткові карти гідрологічних показників: топографічного індексу вологості, акумуляції, напрямку та довжини водних потоків і відстані до них. У даному дослідженні нами використана методика по рандомізовано-зваженому створенні навчальної вибірки з 33% охопленням від площі обстежених ґрунтів [40]. При застосуванні такого підходу значення каппа Коена зростає до 0,92 для модельного варіанту прогнозу картою ґрунтів (Рис. 2г), що свідчить про високу достовірність отриманих даних. Згідно даної карти, найбільшу частину території займають темно сірі опідзолені ґрунти та чорноземи опідзолені (загалом близько 16%).

Поточні результати не поступаються рівню аналогічних за літературними даними, а по точності предикації їх значно перевищують. Це дозволяє пропонувати використання таких модельних підходів у прикладних задачах екології, ґрунтознавства, агрономії, землевпорядкування та землеустрою, тобто сферах, де потреба у таких даних стоїть найбільш гостро.

2. Моделювання ерозійно-денудаційних процесів для оцінки потенційного зниження стійкості агроєкосистем

Якщо вирахувати еродованість тільки за офіційними даними (нагадаємо, що вони мають давність 60–30 років), то загалом вона становить 15862 га,

або ж 26% від площі всього району (Рис. 3а). Проте, якщо для оцінки еродованості ґрунтових ресурсів брати дані змодельованої предикативної ґрунтової карти, то можна зауважити, що еродованість зростає на 224% (Табл. 2), причому сильно еродовані ґрунти займають майже в 2 рази більші площі (Рис. 3б). При цьому, площа намитих ґрунтів залишається на попередньому рівні.

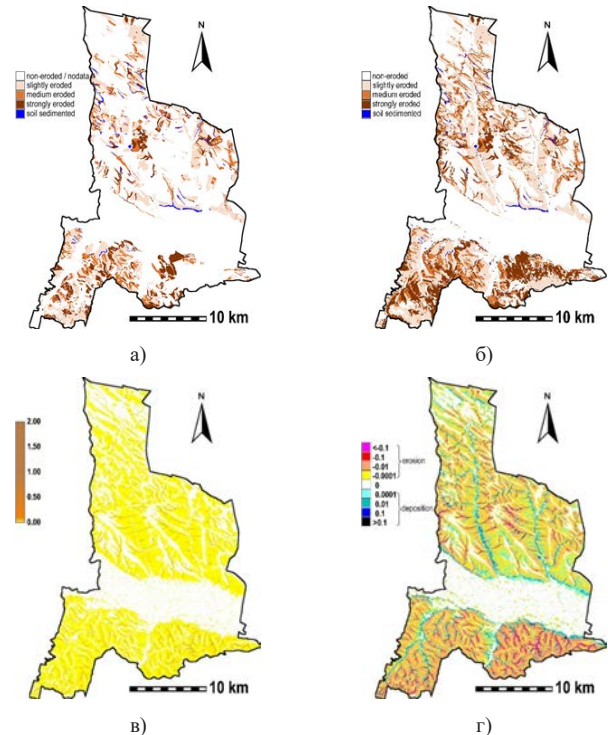


Рис. 3. Стан еродованості ґрунтів: еродовані ґрунти за офіційними даними (а) та предикативною картою (б); карти швидкості потоку седиментів (в) $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ та ерозії-осадження (г) згідно моделі SIMWE, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$

На відміну від попереднього підходу визначення кількості еродованих площ на основі предикативних ґрунтових карт, наступний підхід опирається на математичний модельний експеримент. Моделювання водної ерозії на основі моделі SIMWE показало цікаві результати. Насамперед, чітко спостерігається, що ерозійні процеси приурочені до рельєфу території.

Таблиця 2

Відмінності між офіційними і модельними даними про ерозію ґрунтів Кіцманського району

№	Рівень ерозії	Офіційні дані		Модельні дані		Зростання %
		га	%	га	%	
1	Немає даних	24230	39.7	-	-	-
2	Не змиті	20438	33.5	32956	54.0	161.2
3	Слабо змиті	8803	14.4	15180	24.9	172.4
4	Середньо змиті	3625	5.9	5773	9.5	159.3
5	Сильно змиті	3434	5.6	6621	10.8	192.8
6	Намиті	499	0.8	499	0.8	0.0
7	Всього досліджено	36799	60.3	61029	100.0	-
8	Всього	61029	100.0	61029	100.0	-

Седиментаційні потоки збільшують свою потужність на крутих схилах (Рис. 3в), що при подальшому моделюванні дозволило отримати повну картину ерозійної небезпеки (Рис. 3г). Ці результати показують, що ареали еродованих ґрунтів на офіційних картах насправді не мають необхідної точності, оскільки не враховують багато моментів, пов'язаних із протіканням реальних ерозійних процесів. Останні залежать, окрім похилу рельєфу (базовий параметр при виділенні контурів ґрунтів різного рівня змитості), від покриття (орні землі, культури суцільного висіву/просапні, залуженість території), коефіцієнту шорсткості поверхні Маннінга, гранулометричного складу ґрунтів тощо. Порівняння отриманих даних дозволяє зробити попередні висновки, про те, що оцінка еродованості за офіційними даними не дає її повної картини. Це пов'язано, передусім, з задовженістю картографічних даних, які при цьому ще й не покривають всю територію дослідження. Тому предикативне моделювання ґрунтового покриву, а далі ерозійне моделювання – один з найбільш доцільних шляхів оцінки потенційно небезпечних територій, де екосистемні послуги будуть радикальним чином погіршуватися. Відповідно, поєднання моделювання з верифікацією цих даних у польових умовах – максимально достовірний шлях виявлення і боротьби з ерозією ґрунтів. Це створює можливості реально оцінити ступінь прояву ерозійних процесів і на основі моделювання з широким спектром можливих параметрів створити різні сценарії боротьби з ерозійно-денудаційними процесами як в масштабі окремого поля так і в регіональній шкалі, проектувати протиерозійні гідротехнічні споруди тощо. Використання даних дистанційного зондування Землі, що належить до сфери нашого майбутнього наукового пошуку – це ще один шлях поліпшення діагностики ерозійних процесів. Загалом поєднання останніх двох підходів може дати найбільш обґрунтовану оцінку ерозії та основу для подальшої боротьби з її проявами.

Отож, наше дослідження підтверджує ефективність використання GRASS GIS та моделі водної ерозії SIMWE для більш коректної оцінки вияву ерозійних явищ. Це передумова для розробки системи протиерозійних заходів на якісно вищому рівні та дозволяє оцінювати різні сценарії та стратегії боротьби з виявами процесів ерозії. Такий підхід є масштабованим для всієї території України та може бути рекомендований для більш точної оцінки ризиків ерозії.

3. Педотрансферні функції та побудова картографічної моделі рівноважної щільності ґрунтів

Дані сформованої вибірки (Рис. 4а) використовували для розробки власних педотрансферних моделей. Надалі підібрана педотрансферна модель використовувалась для побудови картографічної моделі рівноважної щільності ґрунтів. Діаграма щільності споріднена з нормальним розподілом лише для фізичної глини (clay), для рівноважної щільності ґрунтів (bd) – розподіл проміжний між нормальним

та асиметричним, а для вмісту гумусу (humus) – чітко асиметричний. Щоб оцінити точність моделювання, ми використали суму помилок квадратів (SSE), де помилки зводяться в квадрат, а потім додаються. Вона використовується для визначення точності моделі прогнозування, коли точки даних подібні за величиною. Чим нижче SSE, тим точніший прогноз. За допомогою цієї статистики точності ми обирали, яка модель прогнозування найкраще відповідає нашим даним: $SSE = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$, де n – кількість прогнозів або точок даних, Y_i – вектор спостережуваних значень змінної, що прогнозується, і \hat{Y}_i є прогнозованим значенням.

Поставлені завдання (моделювання та картографування рівноважної щільності ґрунту) вирішувалися за таким алгоритмом: 1) моделювання карти агропромислових груп ґрунтів; 2) на основі отриманої карти ґрунтів – створення растрової карти вмісту глини у ґрунтах; 3) створення растрової карти вмісту гумусу на основі агрохімічних обстежень ґрунтів із залученням інтерполяційних або модельних технік; 4) підбір оптимального рівняння (педотрансферної функції) залежності щільності ґрунту від вмісту гумусу та глини; 5) імплементація отриманої формули в ГІС-середовище та побудова карти просторового континуального розподілу щільності ґрунтів.

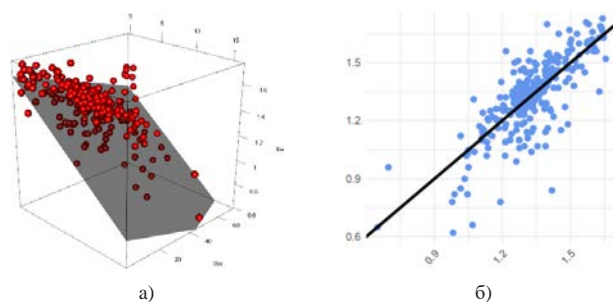


Рис. 4. Емпіричні дані (а) для рівноважної щільності ґрунтів ($g \cdot cm^{-3}$), гранулометричний склад (фізична глина, %) і вміст гумусу (%) для педотрансферного моделювання

Модельна карта ґрунтів (Рис. 2г) – основа для розробки карти вмісту фізичної глини (яка необхідна ще й для точного моделювання RothC). Моделювання вмісту глини носить нетривіальний характер, оскільки власне лабораторні вимірювання вмісту у ґрунтах глини в системі моніторингу України не проводяться. Тому для отримання такої інформації згідно рекомендацій [72] ми використовували шифри агропромислових груп (номер агропромислової групи та її буквенний індекс), які відповідають конкретному гранулометричному складу ґрунтів за Качинським (DSTU 4730:2007). Відповідно, для кожної з агрогруп ґрунтів ми обирали медіану вмісту глини в двочленній класифікації Качинського, де фізична глина (вміст часток розміром < 0.01 мм, а фізичний пісок – часток > 0.01 мм).

Ці дані в подальшому використані для побудови карт і розрахунків.

Основою обчислення значення рівноважної щільності було створення карти вмісту у ґрунтах гумусу, який є однією з факторних ознак. Для створення такої моделі нами використано відносно простий інтерполяційний варіант на основі регуляризованих напружених сплайнів [52, 69]. За точками, в яких відбиралися зразки ґрунтів та в лабораторіях визначався вміст гумусу шляхом інтерполяції для досліджуваної території нами створена карта вмісту гумусу. Підбір оптимального рівняння залежності щільності ґрунту від вмісту гумусу та вмісту глини проводився з використанням власної бази даних. Найкраща з перевірених функцій мала стати основою для моделювання карти щільності ґрунтів. Проведена апробація залежності щільності ґрунту (bd) від вмісту в ньому гумусу (hum) та фізичної глини (clay) за численними рівняннями: лінійними; з використанням лінеаризуючих перетворень для гумусу та глини із відповідними коефіцієнтами; варіанти поліноміальних залежностей; варіанти регресії із використанням логарифмів. Аналіз підібраних залежностей показує, що використання логарифмічних функцій дає незадовільні результати відповідності емпіричних та розрахункових даних. Попри подібність результатів розрахунків за численними формулами, одним з кращих є рівняння із $R=0,781$ та $SSE=3,92$:

$$bd = -3,889 + 422,507 / (86,141 + hum) + 45,982 / (68,263 + clay)$$

Графічна візуалізація даної залежності (Рис. 46) показує співпадіння розрахованих даних (вісь X) емпіричним (вісь Y). Також на рисунку відображена абліне, яка відображає ідеальну лінію тренду. При тотожних емпіричних та розрахункових значеннях точка лягатиме на цю лінію і при наростанні розходжень точка віддалятиметься від цієї лінії; при завищенні розрахункових даних відносно емпіричних, масив точок буде зміщуватися під цю лінію, і навпаки; у випадку відносно рівномірної похибки, точки розташовуватимуться рівномірно обабіч лінії, яка при таких умовах проходить від початку координат під кутом 45 градусів. Саме це рівняння пропонується нами для подальшого використання.

Фінальна стадія побудови карти континуального просторового розподілу щільності ґрунтів передбачає імплементацію обраного протестованого рівняння в GRASS GIS із використанням елементів map algebra [73]. З отриманих результатів насамперед відмітимо, що прогнозна карта щільності ґрунтів має розмах даних від 1,22 до 1,54 г·см⁻³ із переважанням значень від 1,29 до 1,40 г·см⁻³. Ця модель узгоджується із даними авторів [8, 16, 74] щодо агрофізичної деградації ґрунтів України. Сукупність агротехнологічних факторів і розвиток процесів площинної ерозії ґрунтів сприяли різкому зниженню запасів гумусу у ґрунтовому профілі, особливо у орному шарі і пов'язане з цим погіршення рівноважної щільності ґрунтів.

Отож, запропонований алгоритм дозволяє оперативно отримати прогнозні значення щільності ґрунтів, оскільки в умовах посиленого антропогенного навантаження існують високі ризики кінцевої втрати продуктивності ґрунтового покриву та здатності продукувати ним ряд базових екологічних функцій. Отримані карти мають всі передумови стати в умовах перехідного періоду (тобто без широкого запровадження безпосереднього інструментального контролю в системі моніторингу) методом оцінки ризиків та розробки стратегій сталого землекористування як в умовах окремого поля, так і для окремих регіонів.

4. RothC моделювання секвестрації Карбону

Останній етап у застосуванні моделі RothC – це власне обчислення запланованих показників, що дало змогу отримати всі результати у вигляді векторного точкового файлу з проміжними і фінальними даними, розташованими у відповідних полях його атрибутивної таблиці. Для цього послідовно залучалися доповнені та змінені для роботи на локальному рівні скрипти (загалом 15) на мові R-Statistic. Після відпрацювання останнього скрипта, результати rasterизуються з отриманням серії карт. Зауважимо, що дане дослідження є частинним варіантом попередніх – локального [75] та регіонального на прикладі всієї України [76] з отриманням аналогічних результатів, але у вищій роздільній здатності 10 м. З найбільш вагомим відмітимо, що головним позитивним ефектом при нарощуванні об'ємів поглинання CO₂ ґрунтами є зростання/відновлення їх потенційної родючості одночасно із відновленням екологічних функцій, що відбувається за рахунок значимого збільшення кількості органіки, яка надходить в ґрунти. Для даної території в найближчій часовій перспективі важко уявити повний перехід чи впровадження практик сталого управління ґрунтами, які передбачають практично повне виключення агротехнічних заходів із обертанням пласта ґрунту та перехід до різних варіантів мінімального обробітку. І хоча це різко зменшує мінералізацію органічної речовини і розвиток процесів водної та вітрової ерозії, а сукупність перелічених корисних ефектів і забезпечує відновлення родючості ґрунтів, «традиційність» землеробських підходів у регіоні зумовлює більшу увагу звертати на результати варіантів моделювання BAU – business as usual, які показують, що впродовж наступних 20-років (горизонт моделювання) спостерігатимуться помітні зміни з перевищенням територій, де вміст органічного Карбону ґрунтів зменшуватиметься. Водночас модельна реалізація сценаріїв із збільшенням надходження органічної речовини до ґрунтів на прикладі відносної різниці органічного вуглецю ґрунтів (SOC Relative Differences), яка визначається як різниця між практиками сталого землекористування та традиційним землеробством (SSM1-3–BAU) показує, що навіть у такому випадку залишатимуться досить значні

площі, де навіть провідних практик господарювання недостатньо для нейтралізації розкладу органічного Карбону ґрунтів. Відповідно, саме в цих ареалах доцільно приділити найбільше уваги видам агротехніки, які сприятимуть секвестрації Карбону чи мінімізації його емісії, або запроваджувати практики консервації. В умовах насиченого рельєфу, притаманного даній території, це зменшить антропогенне навантаження та мінімізує ризики втрати ґрунтами їх агроекологічних функцій, як через пряму мінералізацію органічної складової ґрунтів, так і внаслідок процесів водної ерозії, які, як було показано вище, є критично розповсюдженими по всій території.

5. Визначення ареалів потенційного забруднення ґрунтів із використанням картографічної методики на основі геоморфологічного аналізу

Забруднення ґрунтів – це вид антропогенної трансформації ґрунтів, при якій вміст хімічних речовин у ґрунтах, що піддаються антропогенному впливу, перевищує природний регіональний рівень їх вмісту у ґрунтах. Знаючи, де розташовуються точки акумуляції забруднень, можна встановити орієнтовні схеми розподілу стоку твердих часток і солей, з метою прогнозування траєкторій переміщення всіх видів забруднювачів. Це дасть змогу точніше і надійніше проводити відбір проб. Найбільш актуальне застосування такого підходу при слабо вираженому рельєфі, де візуально неможливо визначити місця локалізації поллютантів [77]. Для картографічного зображення ареалів потенційного забруднення ґрунтового покриву/концентрації поллютантів нами розроблено модель по визначенню точок акумуляції елементів на основі сукупності кривизн топографічної поверхні (Див. розділ «Методи і матеріали»). Основою цієї моделі стали два основні механізми акумуляції: горизонтальна (планова, або тангенціальна) та вертикальна (чи профільна) кривизни.

Горизонтальна кривизна перпендикулярна до напрямку схилу і впливає на конвергентність/дивергентність поверхневого стоку. Області з від'ємною плановою кривизною відповідають за увігнуті ділянки – зони конвергенції, де відбувається сходження ліній стоку, а з додатною – характеризують опуклі ділянки – зони дивергенції, де відбувається розходження ліній стоку. За рахунок цього планова кривизна може бути використана для диференціації між вододілами (підвищеннями), для яких властиве знесення матеріалу, та тальвегами (пониженнями), які цей матеріал акумулюють [33]. На основі описаної вище методики отримано картографічну модель планової кривизни ареалу досліджень (Рис. 5а) та переведено її у шкалу 0-100 (Рис. 5б), де білим кольором відображені зони дивергенції, а чорним – зони конвергенції.

Вертикальна (профільна) кривизна – кривизна лінії, утвореної перетинанням земної поверхні і вертикальної площини і описує градієнт ухилу уздовж заданого контуру, як похідна від рельєфу другого

порядку. Профільна кривизна використовується нами для характеристики процесів транспорту седиментів і швидкості стоку, оскільки вона являється мірою зміни градієнта. На опуклих ділянках швидкість поверхневого і внутрішньо-ґрунтового стоку прискорюється, а на увігнутих – сповільнюється. Таким чином, за допомогою вертикальної кривизни можна визначати місця розташування зон акумуляції матеріалів на увігнутих ділянках і зон його знесення – на опуклих. При цьому опуклі ділянки будуть характеризуватись додатними значеннями, а увігнуті – від'ємними, нульові значення відповідатимуть плоским поверхням в профілі. Аналогічно до планової кривизни, створено картографічну модель профільної кривизни досліджуваного ареалу (Рис. 5в,г).

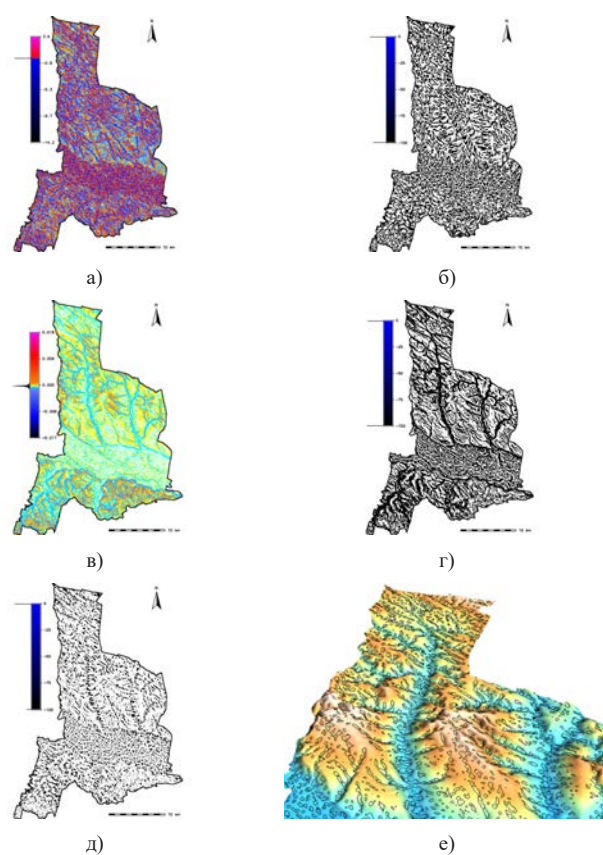


Рис. 5. Картограма планової кривизни з оригінальними (а) та перерахованими значеннями (б); профільної кривизни з оригінальними (в) та перерахованими значеннями (г); акумулятивна кривизна (д) та її тримірна візуалізація (е, фрагмент)

На основі узагальнення двох кривизн створена карта акумулятивної кривизни (Рис. 5д). Дана модель відображає ареали тільки тих ділянок, на яких горизонтальна і вертикальна кривизни перетинаються, тобто ті акумулятивні зони, які співпадають для обох кривизн. Саме така комбінація типів акумуляції дозволяє обрати найбільш характерні місця можливої просторової локалізації поллютантів, які добре візуалізуються на тримірному представленні (Рис. 5е).

Основний результат запропонованої методики – картографічна модель, яка чітко вказує місця потенційної концентрації або ж локалізації ареалів забруднення та акумуляції поллютантів на території досліджень до конкретних геоморфологічних параметрів. Отримана картограма добре масштабується і може бути використана для будь-яких територій. Пропоновані нами моделі сприяють більш коректному визначенню точок для контролю при розробці відповідних програм моніторингу на основі аналізу цифрової моделі рельєфу. Даний варіант не виключає можливості застосувати інші шляхи для побудови схем відбору зразків. Запропонований нами спосіб дозволяє адаптувати його для будь-яких прикладних задач моніторингу в екології, ґрунтознавстві, агрономії, землевпорядкуванні та землеустрої тощо.

Головні висновки. Запропоновано спосіб отримання високороздільної якісної гідрологічно-коректної та екологічно-відповідної ЦМР, яка є базисом у подальшому моделюванні. Для заповнення прогалів у ґрунтовій карті та нівелювання наявних помилок у картографічних матеріалах розроблено та апробовано інноваційний спосіб картографічного прогнозного моделювання для суміжних територій з відсутньою чи недостатньою інформацією про ґрунтовий покрив із залученням 14 типів предикативних алгоритмів (із найкращими результатами для симуляції на основі алгоритму Random Forest).

Показано ефективність моделі водної ерозії SIMWE для більш коректної оцінки ерозійних явищ, що є передумовою для розробки системи протиерозійних заходів на якісно вищому рівні та дозволяє оцінювати різні сценарії та стратегії боротьби з виявами процесів ерозії.

Здійснено прогнозне моделювання та картографування рівноважної щільності ґрунтів на основі розробленої педотрансферної моделі, що дозво-

ляє в умовах посиленого антропогенного навантаження та ризиків втрати продуктивності ґрунтового покриву оцінювати потенційну динаміку екологічних функцій ґрунтів.

Проведено модельну RothC-реалізацію секвестрації Карбону за різними сценаріями збільшення надходження органічної речовини до ґрунтів, яка показала, що навіть провідних практик землекористування часто недостатньо для нейтралізації розкладу органічного Карбону ґрунтів. Відповідно, для таких ареалів доцільно приділити найбільше уваги прогресивним видам агротехніки, які сприятимуть секвестрації Карбону чи мінімізації його емісії, або ж запровадженню консерваційних практик.

Розроблено картографічну методику визначення площ забруднення ґрунтів важкими металами чи іншими поллютантами із врахуванням місцевих особливостей території для передбачення ареалів концентрацій забруднень на основі геоморфологічного аналізу. Пропонований підхід враховує рух поллютантів та їх розподіл залежно від особливостей макро- і мікрорельєфу, ймовірність появи «гарячих точок» забруднення та уможливорює розробку ефективних антикризових заходів задовго до того, як ці зміни набудуть критичного характеру.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропоновані різнопланові високоточні модельні підходи є масштабованим для всієї території України і можуть бути застосовані у прикладних задачах екології, ґрунтознавства, агрономії, землевпорядкування та землеустрою, тобто у найбільш чутливих сферах, де потреба у суцільному континуальному покритті даними стоїть найбільш гостро, проте поточна політична та фінансові ситуації не дозволяють провести обстеження та дослідження на необхідному експериментальному рівні.

Література

- Lindenmayer D.B., Likens G.E. Adaptive monitoring: a new paradigm for long-term research and monitoring. *Trends in ecology & evolution*, 2009. № 24(9). P. 482–486. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.005>
- Chapman P.M. Adaptive monitoring based on ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 2012. № 415. P. 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.03.036>
- Adhikari K., Hartemink A.E. Linking soils to ecosystem services – A global review. *Geoderma*. 2016. № 262. P. 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
- Wall D.H., Bardgett R.D., Behan-Pelletier V., Herrick J.E., Jones T.H., Six J., ... Ritz K. (Eds.). *Soil ecology and ecosystem services*. OUP Oxford, 2012. 406 p. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199575923.001.0001>
- Гамкало З.Г., Шпаківська І.М., Марискевич О.Г. Літогенний потенціал карбонізації педосфери: теоретико-методологічні, методичні та екосистемні підходи. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. збірник. 2021. Вип. 92. Харків: ННЦ «ІА ім. О.Н. Соколовського». С. 41–51. <https://doi.org/10.31073/acss92-051>.
- Cherlinka V., Dmytruk Y. Water erosion modelling in areas with absent soil maps in GRASS GIS. Asia-EC JRC Joint Conference 2017 on «All That Soil Erosion the Global Task to Conserve Our Soil Resources», Seoul, Korea, December 4 – 7. 2017. С. 55–56.
- Енергетичні культури як модифікатори агроекосистем: монографія / за заг. ред. проф. М.М. Федоряк. Чернівці: Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2019. 176 с.
- Медведев В.В., Лактіонова Т.М., Линдіна Т.С. Оцінка втрат урожаю сільськогосподарських культур в Україні від переуцільнення ґрунтів. *Вісник аграрної науки*. 2002. № 3. С. 53–59.
- Jalabert S.M., Martin M.P., Renaud J.P., Boulonne L., Jolivet C., Montanarella L., Arrouays D. Estimating forest soil bulk density using boosted regression modelling. *Soil Use and Management*. 2010. №26(4). P. 516–528. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00305.x>
- Makovniková J., Širán M., Houšková B., Pálka B., Jones A. Comparison of different models for predicting soil bulk density. Case study-Slovakian agricultural soils. *International agrophysics*. 2017. №31(4), P. 491–498. <https://doi.org/10.1515/intag-2016-0079>

11. Sequeira C.H., Wills S.A., Seybold C.A., West L.T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma*. 2014. № 213, P. 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.013>
12. Schillaci C., Perego A., Valkama E., Märker M., Saia S., Veronesi F., ... Acutis M. New pedotransfer approaches to predict soil bulk density using WoSIS soil data and environmental covariates in Mediterranean agro-ecosystems. *Science of the total environment*. 2021. 780. 146609. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146609>
13. Dent D., Boincean B., Dmytruk Y., Bai Z. A candle in the wind. *International Journal of Environmental Studies*, 2022. 79(4). P. 587–596. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2085454>
14. Lal R. Soil degradation as a reason for inadequate human nutrition. *Food Security*. 2009. 1(1). P. 45–57. <https://doi.org/10.1007/s12571-009-0009-z>
15. Tadiello T., Perego A., Valkama E., Schillaci C., Acutis M. Computation of total soil organic carbon stock and its standard deviation from layered soils. *MethodsX*. 2022. 9. 101662. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101662>
16. Національна доповідь «Про стан родючості ґрунтів України» / Під ред. С.А. Балюка, В.В. Медведєва, О.Г. Тараріко та ін. Київ: МАПУ, Центрдержродючість, НААНУ, ННЦ ІГА, НУБіП, 2010. 111 с.
17. Балюк С.А., Медведєв В.В., Мірошніченко М.М., Скрильник Є.В., Тимченко Д.О., Фатєєв А.І., Христенко А.О., Цапко, Ю.Л. Екологічний стан ґрунтів України. *Український географічний журнал*. 2012. 2. С. 38–42. URL: https://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2012-2-38_0.pdf
18. Яцук І.П. Наукові основи відновлення природного потенціалу агроєкосистем України: автореф. дис. ... д-ра с.-г. наук: 03.00.16. Нац. акад. аграр. наук України, Ін-т агроєкології і природокористування. Київ, 2018. 53 с.
19. Vargas-Rojas R., Cuevas-Corona R., Yigini Y., Tong Y., Bazza Z., Wiese L. International Yearbook of Soil Law and Policy. In Ginzky H., Dooley E., Heuser I.L., Kasimbazi E., Markus T., Qin T. (Eds). *International Yearbook of Soil Law and Policy*. 2018. Cham, Springer International Publishing. P. 373–395. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-00758-4_18.
20. FAO. Unlocking the potential of soil organic carbon. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2017. Rome, Italy. 22 p. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/584567aa-d89d-4d9a-82d8-1fad58266364/content>
21. FAO. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. 2020. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb0509en>.
22. FAO. Technical specifications and country guidelines for Global Soil Organic Carbon Sequestration Potential Map (GSOCseq). 2020. Rome, Italy. URL: <https://www.fao.org/documents/card/ru/c/cb0353en>
23. Jenkinson D.S., Rayner J.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil science*. 1977. 123(5). P. 298–305. <https://doi.org/10.1097/00010694-197705000-00005>
24. Jenkinson D.S. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. 1990. 329. P. 361–368. <https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0177>
25. Sierra C.A., Müller M., Trumbore S.E. Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0. *Geoscientific Model Development*. 2012. Vol. 5.4. P. 1045–1060. <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1045-2012>.
26. Aiello A., Adamo M., Canora F. Remote sensing and GIS to assess soil erosion with RUSLE3D and USPED at river basin scale in southern Italy. *Catena*. 2015. 131. P. 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.003>
27. Alatorre L.C., Begueria S. Identification of eroded areas using remote sensing in a badlands landscape on marls in the central Spanish Pyrenees. *Catena*. 2009. 76 (3). P. 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.11.005>
28. Meusburger K., Banninger D., Alewell C. Estimating vegetation parameter for soil erosion assessment in an alpine catchment by means of QuickBird imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2010. 12(3). P. 201–207. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2010.02.009>
29. Дмитрук Ю.М., Черлінка В.Р. Використання моделей водної ерозії при розв'язанні прикладних завдань землеустрою: геоінформаційний підхід. *Землеустрій і кадастр*. 2012. № 1. С. 12–18. URL: https://www.researchgate.net/publication/328048942_Vikoristanna_modeliej_vodnoi_erozii_pri_rozvv'azanna_prikladnih_zavdan_zemleustrou_geoinformacijnij_pidhid
30. Mitas L., Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*. 1998. 34(3). P. 505–516. <https://doi.org/10.1029/97WR03347>
31. Schmidt J. (Ed.) *Soil Erosion: Application of physically based models*. Springer Science & Business Media. 2000. 318 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04295-3>
32. Fernandes J., Bateira C., Soares L., Faria A., Oliveira A., Hermenegildo C., Moura R., Goncalves J. SIMWE model application on susceptibility analysis to bank gully erosion in Alto Douro Wine Region agricultural terraces. *Catena*. 2017. 153. P. 39–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.034>
33. Dmytruk Y., Cherlinka V. Cartographic technique for determining areas of soil contamination by heavy metals. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. 80(2) P. 451–463. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2147708>
34. Evans I.S., Minár J. A classification of geomorphometric variables. *Proceedings of the Geomorphometry 2011 Conference*. Redlands, California, USA, 2011. P. 105–108.
35. Krcho J. Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu (Morphometric analysis and digital models of georelief). Bratislava: Veda, 1990. 426 p.
36. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*. 2002. 107(1-2). P. 1–32. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7)
37. Черлінка В.Р. Адаптація великомасштабних ґрунтових карт до їх практичного використання у ГІС. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Вип. 84. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. Харків: ТОВ «Смуґаста типографія», 2015. С. 20–28. URL: <https://agrosoil.yolasite.com/resources/2015-AiG-84-pp20-28.pdf>
38. Cherlinka V. Using Geostatistics, DEM and Remote Sensing to Clarify Soil Cover Maps of Ukraine. In: Dent, D., Dmytruk, Y. (Eds.). *Soil Science Working for a Living: Applications of soil science to present-day problems*. Springer-Verlag GmbH, Cham, Switzerland, Ch. 7, 2017a. P. 89–100. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45417-7_7

39. Черлінка В.Р. Морфометричні параметри рельєфу як базис для предикативного моделювання просторового поширення ґрунтових відмін. *Агрохімія і ґрунтознавство*. Міжвід. тем. наук. зб. Вип. 86. Харків: ННЦ ІГА, 2017а. С. 5–16. URL: http://agrosoil.yolasite.com/resources/2017-86/2017_AiG-86_5-16_Cherlinka.pdf
40. Черлінка В.Р. Варіації прогновної ефективності ґрунтових карт залежно від способів побудови навчальних вибірок предикативних алгоритмів. *Ecology and noospherology*. 2017b. Vol. 28 (3-4). С. 55–71. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/etn_2017_28_3-4_8
41. Черлінка В.Р. Вплив роздільної здатності цифрових моделей рельєфу на якість предикативної симуляції ґрунтового покриву. *Ґрунтознавство*. 2017. Т. 18. № 1–2. С. 79–95. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/grunt_2017_18_1-2_11
42. Черлінка В.Р., Лобова О.В. Методичні підходи до узгодження ґрунтових картографічних матеріалів на межах адміністративно-територіальних одиниць України. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2018. №6. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2018_6_12
43. Cherlinka V.R., Dmytruk Y.M. Solving existing problems with soil maps in Ukraine. *Biological systems*. 2018. Vol. 10. (1). P. 298–308. <https://doi.org/10.31861/biosystems2018.01.094>
44. Cherlinka V.R., Dmytruk Y.M., Bodyan Y.H. Effect of DEM sources on quality indicators of predictive maps of soil cover. *Agrochemistry and Soil Science*. Collected papers. No. 90. Kharkiv: NSC ISSAR, 2020. P. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.31073/acss90-04>.
45. Stevenson J.A., Sun X., Mitchell N.C. Despeckling SRTM and other topographic data with a denoising algorithm, *Geomorphology*. 2010. 114/3. P. 238–252. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.07.006>
46. Mitašova H., Mitaš L. Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation. *Mathematical Geology*. 1993. Vol. 25. №.6. P. 641–655. <https://doi.org/10.1007/BF00893171>
47. Breiman L. Random forests. *Machine learning*. 2001. 45 (1). P. 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
48. QGIS Development Team, 2024. QGIS Geographic Information System. URL <http://qgis.osgeo.org>
49. GRASS Development Team, 2024. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS GIS) Software. Version 8.3. URL <http://grass.osgeo.org>
50. R Development Core Team, 2024. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. URL <http://www.r-project.org>
51. Mitas L., Mitasova H. Distributed soil erosion simulation for effective erosion prevention. *Water Resources Research*. 1998. 34(3). P. 505–516. <https://doi.org/10.1029/97WR03347>
52. Mitasova H., Mitas L. Multiscale soil erosion simulations for land use management. In: Harmon, R. S., Doe, W.W. I. I. I. (Eds.), *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. 2001. Springer Science & Business Media (Kluwer Academic & Plenum Publishers), New York, Ch. 11. P. 321–347. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0575-4_11
53. Hofierka J., Mitasova H., Mitas L. et al. GRASS and modeling landscape processes using duality between particles and fields. In: *Proceedings of the Open Source GIS-GRASS users conference*. 2002. Trento, Italy. P. 11–13. URL: https://www.researchgate.net/publication/228547675_GRASS_and_modeling_landscape_processes_using_duality_between_particles_and_fields
54. Koko S. Simulation of gully erosion using the SIMWE model and GIS. *Landform Analysis*. 2011. 17. P. 81–86. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Simulation-of-gully-erosion-using-the-SIMWE-model-Koko/7e0649bbe131ad453440459276f30244b8588d00>
55. Kuhn M. Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*. 2008. 28(5). P. 1–26. URL <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
56. Landis J.R., Koch G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. 1977. 33 (1). P. 159–174. URL <https://doi.org/10.2307/2529310>
57. Heuscher A.S., Brandt C.C., Jardine M.P. Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density data. *Soil Sci. Soc. America J.* 2005. 6. P. 51–56. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0051a>
58. Houšková B. Assessment of the state of soil compaction in Slovakia. *Advances in geoecology 35*. A cooperating series of the IUSS. Catena Verlag, Germany, 2002. 379–386. URL: https://www.researchgate.net/publication/284824454_Assessment_of_state_of_soil_compaction_in_Slovakia
59. Kaur R., Kumar S., Gurung H. P. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Soil Research*. 2002. 40(5). P. 847–858. <https://doi.org/10.1071/sr01023>
60. Назаренко І.І., Бербець М.А., Черлінка В.Р. Залежність рівноважної щільності ґрунтів від вмісту гумусу і параметрів вбирного комплексу. *Вісник аграрної науки*. 1998. № 5. С. 17–19.
61. Taalab K.P. Modelling Soil Bulk Density Using Data-mining and Expert Knowledge. 2013. 278 p. URL: <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/8273>
62. Tranter G., Minasny B., McBratney A.B., Murphy B., McKenzie N.J., Grundy M., Brough D. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density. *Soil Use and Management*. 2007. 23(4). P. 437–443. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00092.x>
63. Черлінка В.Р. Обґрунтування агроекологічної відповідності моделей ґрунтової родючості та її факторів вимогам польових культур: дис... канд. біол. наук: 03.00.27; Чернівецький національний ун-т ім. Юрія Федьковича. Чернівці, 2001. 224 с. URL: <https://archer.chnu.edu.ua/handle/123456789/998>
64. Cherlinka V.R., Dmytruk Y.M., Sobko V.I., Gunchak M.V., Balan T. I. Cherlinka L.V. Challenges and opportunities of modelling carbon dioxide sequestration potential in Ukrainian soils. *AgroChemistry and Soil Science*. 2021. 92. P. 62–70. <https://doi.org/10.31073/acss92-07>
65. Coleman K. Jenkinson D. S. RothC-26.3 – a model for the turnover of carbon in soil. Powlson, D. S., Smith, J. U. and Smith, P. (ed.) *Evaluation of soil organic matter models using existing long-term datasets (NATO ASI Series I, Vol. 38)*. 1996. Springer, Berlin. P. 237–246. URL: <https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8746v/rothc-26-3-a-model-for-the-turnover-of-carbon-in-soil>

66. Falloon P., Smith P. Modeling Soil Carbon Dynamics. In: Kutsch W.L., Bahn M., Heinemeyer A. (Eds). Soil carbon dynamics: an integrated methodology. 2009. Cambridge University Press. P. 221–244. URL: <https://abdn.elsevierpure.com/en/publications/modelling-soil-carbon-dynamics>
67. Faybishenko B., Dwivedi D., O’Ryan D., Nico P., Birkholzer J., Zavarin M., Kersting A., Slessarev E., Nezgoduk A., Cherlinka V., Dmytruk Y., Romashchenko M., Yakirevich A., Shestopalov V. Assessment of Groundwater Radiological Vulnerability in Ukraine Using a GIS– and Modeling Based Approach. *VIII International Conference on Nuclear Decommissioning and Environmental Recovery*, INUDEC 2023, April 27–28, 2023, Slavutych, Ukraine.
68. Van Rossum G., & Drake Jr F. L. Python tutorial. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, The Netherlands. 1995. 73 p.
69. Hofierka J., Cebecauer T., Suri M. Optimisation of Interpolation Parameters Using Cross-validation. In: Peckham R.J., Jordan G., editors. Digital Terrain Modelling, Development and Applications in a Policy Support Environment. Berlin (Germany): Springer. 2007. P. 67–82. JRC43643. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC43643>
70. Дмитрук Ю.М., Черлінка В.Р. Прикладні аспекти генерації гідрологічно-коректних та екологічно-відповідних цифрових моделей місцевості. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. Івано-Франківськ, 2013. № 1(7). С. 126–131. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ebzp_2013_1_27
71. GNU P. Free Software Foundation. Bash (3.2. 48)[Unix shell program]. 2007.
72. Cherlinka V., Dmytruk Y., Cherlinka L., Gunchak M., Sobko V. Methods of modeling and mapping of the soil bulk density: a case study from Chernivtsi region, Ukraine. *Geographia Cassoviensis*. 2022. XVI(2). P. 147–163. DOI: <https://doi.org/10.33542/GC2022-2-05>
73. Shapiro M., Westervelt J. R. MAPCALC: An Algebra for GIS and Image Processing. Champaign, IL: Environmental Division CERL, 1992. 22 p. URL: <https://grass.osgeo.org/gdp/raster/mapcalc-algebra.pdf>
74. Медведєв В.В. Відновлення еколого-відтворних і продуктивних функцій ґрунтів як найважливіший етап реалізації концепції сталого розвитку України. *Вісник аграрної науки*. 1997. №9. С. 16–20.
75. Cherlinka V.R., Dmytruk Y.M., Sobko V.I., Gunchak M.V., Balan T.I., Cherlinka L.V. Challenges and opportunities of modelling carbon dioxide sequestration potential in Ukrainian soils. *AgroChemistry and Soil Science*. 2021. 92. P. 62–70. <https://doi.org/10.31073/acss92-07>
76. Cherlinka V., Lelechenko L., Dmytruk Y. Soil organic carbon: assessment of dynamics and sequestration potential on the example of Ukraine. ESA Symposium on EO 4 Soil Protection and Restoration, 06-07 March 2024, ESA-ESRIN, Frascati (Rome), Italy URL: <https://az659834.vo.msecnd.net/eventsairwesteuprod/production-nikal-public/a6b01ba920ab4a98b9baba4788b6df51>
77. Singovszka E., Balintova M., Holub M. Heavy metal contamination and its indexing approach for sediment in Smolnik creek (Slovakia). *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2015. 18(1). P. 305–313. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0991-0>

ПІСЛЯДІЯ ВНЕСЕННЯ ОСАДУ СТІЧНИХ ВОД НА РОДЮЧІСТЬ ТЕХНОЗЕМУ ТА ЯКІСТЬ БІОСИРОВИНИ МІСКАНТУСУ І ТОПОЛІ

Харитонов М.М.¹, Бабенко М.Г.¹, Клімкіна І.І., Мартинова Н.В.²

¹Дніпровський державний аграрно-економічний університет
вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, м. Дніпро

²Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Гагаріна, 72, 49010, м. Дніпро
kharytonov.m.m@dsau.dp.ua

Найбільш поширеними чинниками гальмування проблеми використання осаду стічних вод в Україні є відсутність регіональних комплексних рішень з поводження з відходами, розроблених схем їх використання у сільському господарстві, для рекультивативної полігонів та порушених гірничими розробками земель, відсутність коштів для придбання сучасного обладнання та флокулянтів для зневоднення, відсутність розвитку проектів з утилізації та повторного використання ресурсів, високі витрати на транспортування та стабілізацію осаду. Разом з тим застосування осадів комунальних підприємств як ґрунтової домішки на маргінальних землях для вирощування енергетичних культур досі лишається оптимальним рішенням, оскільки дозволяє найбільш раціональне використання матеріалу, що містить значну кількість органічного вуглецю і біогенних елементів. У статті викладено результати вегетативних та мікропольових дослідів чотирирічних досліджень з міскантусом та тополею шляхом вивчення реакції доза – ефект на процеси формування родючості технозему після стартового внесення флокульованого осаду стічних вод (ФОСВ) у кількості 20, 40 та 60 т/га. Модельні польові досліді за вирощування міскантусом та тополею на фітомеліорованому лесоподібному суглинку були проведені у 2020–2023 роках в умовах Покровської навчально-дослідної станції рекультивативної земель ДДАЕУ з стартовим внесенням флокульованого осаду стічних вод у 2020-му році. Вегетативні досліді з високо вимогливою до родючості ґрунту культурою ячмінь були проведені для встановлення чотирирічної післядії внесення домішки ОСВ. Внесення осаду стічних вод сприяло збільшенню мікроелементів в біомасі міскантусу та в листі тополі. Цинк в біомасі міскантусу зріс у 2,8 раз в той час як вміст міді в 1,8 раз за внесення за внесення ОСВ+Ф60. Застосування осаду у цій дозі стічних вод сприяло збільшенню вмісту кобальту, та нікелю у біомасі в 1,1–2,3 рази. Внесення осаду стічних вод суттєво не вплинуло на вміст кобальту і нікелю у листках тополі. Ефективність післядії внесення стартових доз флокульованого осаду стічних вод зазначилася на міскантусі у більшому ступені. *Ключові слова:* технозем, осад стічних вод, важкі метали, міскантус, тополя.

The aftereffect of sewage sludge on the fertility of technosol and the quality of biofeedstuffs of miscanthus and poplar.
Kharytonov M., Babenko M., Klimkina I., Martynova N.

The most common factors inhibiting the use of sewage sludge in Ukraine are the lack of regional comprehensive solutions for waste management, developed schemes for their use in agriculture for the reclamation of landfills and post-mining lands, the lack of funds for the purchase of modern equipment and flocculants for dehydration, the lack of development of resource utilization and reuse projects, high costs for sewage sludge transportation and stabilization. At the same time, the use of sludge from communal enterprises as soil amendment on marginal lands for growing energy crops still remains the optimal solution, as it allows the most rational use of material containing a significant amount of organic carbon and biogenic elements. The article presents the results of pot and microfield experiments of a four-year study of the dose-effect response on the processes of technosol fertility formation after the initial introduction of flocculated sewage sludge (FSS) in the amount of 20, 40, and 60 t/ha. Model field experiments for growing miscanthus and poplar on phytomeliorated loess-like loam were carried out in 2020–2023 in the conditions of the Pokrov educational and research station of land reclamation of DSAEU with the starting application of flocculated sewage sludge in 2020. Pot experiments with barley crop, which is highly demanding on soil fertility, were carried out to establish the four-year aftereffect of applying the SS amendment. The introduction of sewage sludge contributed to the increase of trace elements in the biomass of miscanthus and in poplar leaves. Zinc in the biomass of miscanthus increased by 2.8 times, while the copper content increased by 1.8 times per application with SS+F60 application. The use of soil amendment in this dose of sewage sludge contributed to an increase in the content of cobalt and nickel in the biomass by 1.1–2.3 times. The introduction of sewage sludge did not significantly affect the content of cobalt and nickel in poplar leaves. The effectiveness of the after-effect of introducing starting doses of flocculated sewage sludge was noted on miscanthus to a greater extent. *Key words:* technosol, sewage sludge, miscanthus, poplar.

Постановка проблеми. В останні роки підвищена увага приділяється потенціалу техноземів для вирощування культур другого покоління в якості біопалива. Швидкорослі багаторічні культури (міскантус, тополя), можуть бути першим вибором для вирощування на рекультивованих землях в гірничовидобувних регіонах з можливістю використання біосировини у якості пел-

лет та брикетів у місцевих котельнях. Висока продуктивність енергетичних насаджень може бути забезпечена за рахунок використання осаду стічних вод (ОСВ). Метою роботи було вивчення післядії внесення осаду стічних вод на ріст міскантусу і тополі на техноземі.

Актуальність дослідження. Існуюча ситуація з виробництвом ОСВ, здебільшого, зумовлена відсут-

ністю економічних та ефективних технологій зневоднення та обробки осаду. Відповідно до нормативів, для подальшого виробництва органічно-мінерального добрива, сушіння, складування або іншої переробки, вміст вологи у кеку не має перевищувати 65–75%. Серед інших проблем найбільш поширеними є відсутність регіональних комплексних рішень з поводження з відходами, або розроблених схем їх використання у сільському господарстві, для рекультивації полігонів, відсутність розвитку проектів з утилізації та повторного використання ресурсів, високі витрати на транспортування та стабілізацію осаду. Гігієнічна небезпека і високий вміст важких металів в осаді стічних вод є основними причинами його обмеженого використання в сільському господарстві. Ось чому найбільш перспективним шляхом вважається використання ОСВ як нетрадиційного добрива під технічні культури для виробництва біопалива.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Різноманітні групи «молодих» ґрунтів (техноземів) сформувалися з різних техногенних відкладень, у тому числі в процесі гірничодобувних та днопоглиблювальних робіт [1]. Там, де природний профіль ґрунту було втрачено, оголивши необроблений або забруднений вихідний ґрунтовий матеріал, землю можна використовувати для вирощування швидкозростаючої сировини для виробництва пеллет та брикетів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Не достатньо дослідженим є ефект післядії стартового внесення осаду стічних вод під міскантус і тополлю на техноземі на формування родючості технозему під цими культурами.

Новизна. В наших дослідженнях був використаний осад стічних вод після обробки полімерним флокулянтном ДАМЕТ за технологією ТОВ «ВАО Виробництво» на південній станції аерації Дніпровського водоканалу. У роботі вперше визначено ефект післядії стартового внесення флокульованого осаду стічних вод в дозах 20, 40 та 60 т/га на ріст міскантусу і тополі на техноземі.

Методологічне або загальнонаукове значення. В умовах Покровської навчально-дослідної станції рекультивації земель ДДАЕУ з 2020-го по 2023-й роки були проведені модельні польові дослідження з міскантусом та тополлю на техноземі з внесенням флокульованого осаду стічних вод. Вегетативні дослідження з високою вимогливістю до родючості ґрунту культурою ячмінь були проведені у 2024 році для встановлення чотирирічної післядії внесення домішки ОСВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Міскантус, особливо міскантус гігантський (*Miscanthus × giganteus*), це цінна енергетична культура, що останніми роками набуває все більшого поширення. Біомаса міскантусу може бути використаною для виготовлення різноманітних пеллет, біостанолу або біогазу [2] на вис-

нажених і важких ґрунтах, схильних до ерозії схилах і зонах захисту ґрунтових вод [3–5]. Результати застосування фіторе mediaційної технології свідчать, що міскантус добре переносить забруднення ґрунту важкими металами [6–7]. Доволі мала врожайність міскантусу в перші роки вирощування є обмеженням [8], але застосування осаду стічних вод швидко оптимізує живлення рослин [9]. Польові експерименти з міскантусом у Польщі показали, що поглинання макроелементів збільшується разом із збільшенням дози осаду стічних вод у діапазоні 10–20 т/га. Поглинання важких металів також було вищим за більшої дози осаду [10]. Серед енергетичних деревних культур тополя є однією з традиційних, що найчастіше вирощується як джерело біомаси для виробництва енергії, зокрема у формі деревної тріски або пелет [11–12]. Виведені клони енергетичної тополі характеризуються швидким ростом та здатністю рости в різноманітних умовах. Деревина тополі має відносно низький вміст вологи, що робить її ефективним джерелом палива. Крім енергетичних якостей, тополі також мають переваги для навколишнього середовища. Вони можуть сприяти поглинанню та поглинанню вуглекислого газу з атмосфери, а їх коренева система може допомогти запобігти ерозії ґрунту та покращити якість ґрунту. Крім того, ці дерева активно беруть участь у поглинанні та секвестрації вуглекислого газу, що є ключовою функцією зниження рівня CO₂ в атмосфері [13]. Останнім часом не тільки деревина, але і листя енергетичних дерев розглядається як потенційна біомаса, яку можна використовувати як альтернативне джерело енергії для виробництва продуктів з доданою вартістю [14–15].

Методи дослідження. Методика дослідження передбачала визначення реакції міскантусу і тополі на внесення у поверхневий шар технозему у якості ґрунтової домішки обробленого флокулянтном ДАМЕТ осаду стічних вод, який був завезений з південної станції очистки стічних вод Дніпровського водоканалу. Досліди з міскантусом і тополлю були закладені у 2020 році на фітомеліорованому лесоподібному суглинку в умовах Покровської навчально-дослідної станції ДДАЕУ. Вміст гумусу у техноземі становив 1,3%.

Флокульований осад стічних вод був внесений в дозах 20, 40 і 60 т/га. Вміст важких металів у біомасі рослин був визначений із застосуванням методу атомно-абсорбційної спектроскопії. Весною 2024 року із зазначених дослідних ділянок був відібраний ґрунт для закладення касетного дослідження з ячменем для визначення чотирирічної післядії стартового внесення ґрунтової домішки.

Виклад основного матеріалу. Дані з вмісту цинку, міді, кобальту та нікелю у надземній масі міскантусу наведені на рисунках 1 та 2. Цинк зріс у 2,8 раз в той час як вміст міді в 1,8 раз за внесення за внесення ОСВ+Ф60. Застосування осаду у цій дозі стічних вод сприяло збільшенню вмісту кобальту, та нікелю у біомасі в 1,1–2,3 рази

Визначення вмісту мікроелементів в листках тополі показало, що додавання осаду стічних вод у дозах 20, 40 та 60 т/га сприяє підвищенню концентрації марганцю, цинку та міді у листяній біомасі (рис. 3).

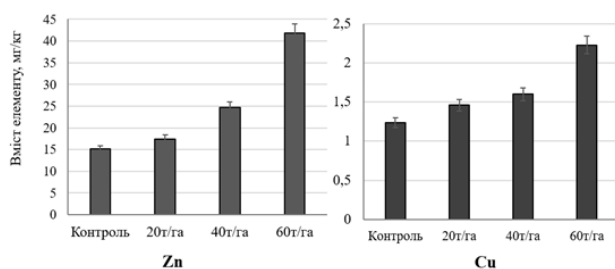


Рис. 1. Вміст цинку та міді у біомасі міскантусу за різних доз внесення осаду стічних вод

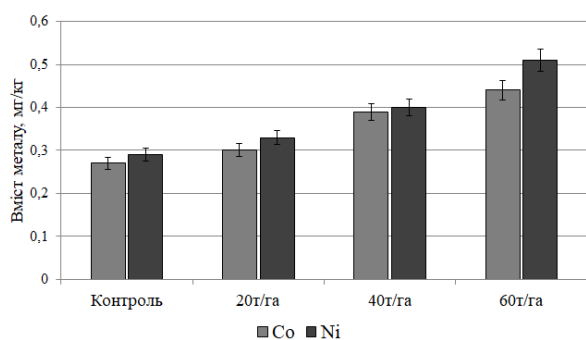


Рис. 2. Вміст кобальту та нікелю у біомасі міскантусу за різних доз внесення осаду стічних вод

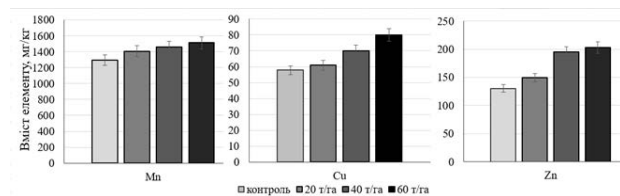


Рис. 3. Вміст есенціальних мікроелементів в листках саджанців енергетичної тополі за різних умов внесення осаду стічних вод

Внесення осаду стічних вод суттєво не вплинуло на вміст кобальту і нікелю у листках тополі (рис. 4)

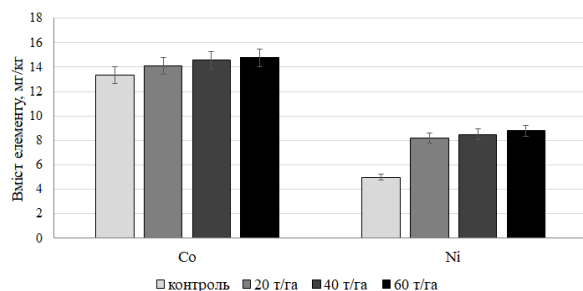


Рис. 4. Вміст важких металів в листках саджанців енергетичної тополі за різних умов внесення осаду стічних вод

Результати визначення біопродуктивності ячменю, як вимогливої до родючості ґрунту рослини, отримані у касетних дослідах наведені на рисунках 5 та 6 відповідно до варіантів доз внесення ОСВ у технозем під міскантус і тополлю.

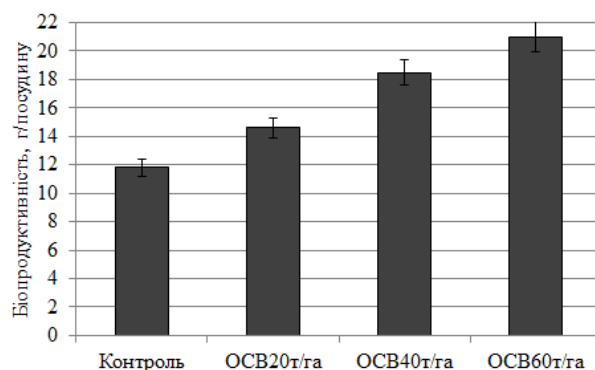


Рис. 5. Біопродуктивність ячменю, вирощеному на техноземі (чотирирічний дослід з міскантусом)

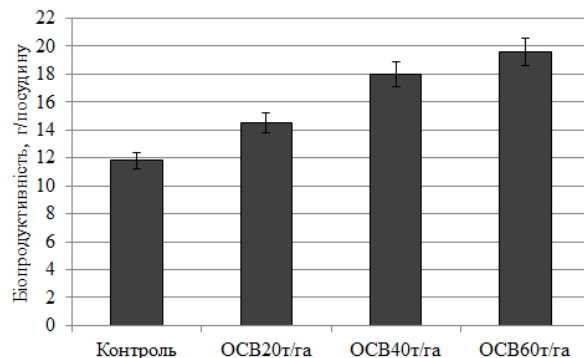


Рис. 6. Біопродуктивність ячменю, вирощеному на техноземі (чотирирічний дослід з тополлю)

З оглядом на отримані результати, можна зробити висновок, що ефективність післядії внесення стартових доз флокульованого осаду стічних вод зазначилася на міскантусі у більшому ступені.

Головні висновки. Внесення осаду стічних вод сприяло збільшенню мікроелементів в біомасі міскантусу та в листі тополі. Цинк в біомасі міскантусу зріс у 2,8 раз в той час як вміст міді в 1,8 раз за внесення за внесення ОСВ+Ф60. Застосування осаду у цій дозі стічних вод сприяло збільшенню вмісту кобальту, та нікелю у біомасі в 1,1–2,3 рази. Внесення осаду стічних вод суттєво не вплинуло на вміст кобальту і нікелю у листках тополі.

З оглядом на отримані результати, можна зробити висновок, що ефективність післядії внесення стартових доз флокульованого осаду стічних вод зазначилася на міскантусі у більшому ступені.

Перспективи використання результатів досліджень. У подальшому матеріали досліджень можуть бути використані при розробці технологій вирощування міскантусу і тополі для забезпечення постійного постачання біосировини для виробництва пеллет та брикетів для міні котельні.

Disclaimer / Дисклеймер

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

Фінансується Європейським Союзом. Однак висловлені погляди та думки належать лише авторам і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з освіти та культури (ЕАСЕА). Ні Європейський Союз, ні орган, що надає гранти, не можуть нести за них відповідальності.

Література

1. Velichka, R., Rimkevichene M., Martsinkyavichene A. Changes in the properties of a loamy Gleyic Cambisol as related to the saturation of crop rotations with rape. *Eurasian Soil Science*. 2006. Vol. 39(9). P. 1002-1010. doi:10.1134/S1064229306090109
2. Heaton E.A., Dohleman F.G., Long S.P. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*. *Global Change Biology*. 2008. Vol. 14. P. 2000-2014. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01662.x>
3. Potential of *Miscanthus x giganteus* grown on highly contaminated Technosols/ Wanat N., Austruy A., Joussem E., and others. *Journal of Geochemical Exploration*. 2013. Vol. 126-127. P. 78-84.
4. Nitrogen and phosphorus fertilizer effects on establishment of giant miscanthus/ Haines S.A., Gehl R.J., Havlin J.L., Ranney T.G. *Bioenergy Research*. 2015. Vol. 8. P. 17-27. <https://doi.org/10.1007/s12155-014-9499-4>
5. Implementing miscanthus into farming systems: A review of agronomic practices, capital and labour demand/ Winkler B., Mangold A., von Cossel M. and others. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 132. 110053 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110053>
6. Phytoremediation as an effective method to remove heavy metals from contaminated area – TG/FT-IR analysis results of the gasification of heavy metal contaminated energy crops/ Werle S., Bisorca D., Katelbach-Wozniak A. and others. *Journal of the Energy Institute*. 2016. Vol. 90. P. 408-417. doi: 10.1016/j.joei.2016.04.002
7. Kocoń A., Jurga B. The evaluation of growth and phytoextraction potential of *Miscanthus x giganteus* and *Sida hermaphrodita* on soil contaminated simultaneously with Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. Vol. 24(5). P. 4990-5000. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8241-5>
8. How to generate yield in the first year – A three-year experiment on *Miscanthus (Miscanthus x giganteus* Greef et Deuter). Establishment under Maize (*Zea mays* L.)/ von Cossel, M., Mangold, A., Iqbal, Y., and others. 2019. *Agronomy* Vol. 9. 237. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050237>
9. Kołodziej B., Antonkiewicz J., Sugier D. *Miscanthus giganteus* as a biomass feedstock grown on municipal sewage sludge. *Industrial Crops and Products*. 2016. Vol. 81. P. 72-82. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.052>
10. Antonkiewicz J., Kołodziej B., Bielińska E.J. The use of reed canary grass and giant miscanthus in the phytoremediation of municipal sewage sludge. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 9505-9517. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6175-6>
11. Manzone M., Airoldi G., Balsari P. Energetic and economic evaluation of a poplar cultivation for the biomass production in Italy. *Biomass and bioenergy*. 2009. Vol. 33(9). P. 1258-1264. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.024>
12. Productivity and biomass characteristics of selected poplar (*Populus* spp.) cultivars under the climatic conditions of northern Poland/ *Biomass and Bioenergy*. 2018. Vol. 111. P. 46-51. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.002>
13. Energetic poplars and their importance for the environment/ Vornicu L., Okros A., Şmuleac L., Paşcalău R., Petcov A., Zoican Ş., Jigau R., Zoican C. *Research Journal of Agricultural Science*. 2023. Vol. 55(2), P. 220-230.
14. Thermal analytical characteristics by TGA-DTA-DSC analysis of *Carica papaya* leaves from Kachchh/ Ram V.R., Ram P.N., Khatri T.T., Vyas S.J., Dave P.N. *International Letters of Natural Sciences*. 2014. Vol. 26, P. 12-20. doi:10.56431/p-14tuu2
15. Winaya I.N.S., Ghurri A., Wirawan I.K.G. Pyrolysis study of coconut leaf's biomass using thermogravimetric analysis. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 539, 012017. doi:10.1088/1757-899X/539/1/012017

КОНТРОЛЬОВАНЕ САМОВІДНОВЛЕННЯ РОСЛИННОСТІ ЯК АЛЬТЕРНАТИВА ЛІСОВОЇ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ

Хом'як І.В., Овдіюк О.М.

Житомирський державний університет імені Івана Франка
вул. Велика Бердичівська, 40, 10005, м. Житомир
ecosystem_lab@ukr.net, 7992750@gmail.com

Стаття присвячена порівнянню прямих прибутків від традиційної рекультивациї та екосистемних послуг, отриманих в процесі самовідновлення рослинності. Метою дослідження є обрахунок суми екосистемних послуг, отриманих в процесі самовідновлення рослинності, та порівняння її із чистим прибутком отриманим від традиційної рекультивациї. Відповідно до мети, було поставлено такі завдання: спрогнозувати зміну рослинності під час процесу самовідновлення; визначити суму екосистемних послуг, отриманих в процесі самовідновлення рослинності; порівняти суму екосистемних послуг, отриманих в процесі самовідновлення рослинності, із чистим прибутком, отриманим від традиційної рекультивациї. Матеріалами дослідження є стандартні геоботанічні описи, створені на території розробки Хмельівської ділянки Майдан Вільського родовища первинних каолінів, жорстви та гранітоїдів. У результаті вперше було здійснено порівняння ефективності традиційних методів рекультивациї із контрольованим самовідновленням природної рослинності. Дослідження дозволило створити довготривалий прогноз зміни рослинних угруповань в результаті самовідновлення рослинності. Прогноз автогенної сукцесії для досліджуваної території вказує на те, що тут спочатку сформується асоціація *Salicetum capreae*, яка поступово заміниться на широколистяні ліси асоціації *Tilio cordatae-Carpinetum*. Такий перехід відбудеться між 50 і 70 роками самовідновлення. На більш вологих ділянках через 15–20 років відбудеться перехід від верболозів асоціації *Salicetum pentandro-cinereae* до вільхових лісів асоціації *Ribesio nigri-Alnetum*. Через 70 років після початку самовідновлення, обсяг екосистемних послуг, які надає ця ділянка досягне 7 млн. грн. на га в рік. Вирощування зернових даватиме 3100, а ділової деревини – 6480 грн. за м³ ділової деревини у рік. Під час самовідновлення рослинності, на цій території об'єм екосистемних послуг зростає відповідно до функції натурального логарифма. **Ключові слова:** компенсаційні заходи, автогенна сукцесія, відновлювана екологія.

Controlled self-regeneration of vegetation as an alternative to forest reclamation. Khomiak I., Ovdiuk O.

The article is devoted to the comparison of direct profits from traditional reclamation and ecosystem services obtained in the process of self-restoration of vegetation. The purpose of the study is to calculate the amount of ecosystem services received in the self-restoration of vegetation and compare it with the net profit received from traditional reclamation. Following the goal, the following tasks were set: To predict the change of vegetation during the self-restoration process; Determine the amount of ecosystem services received in the process of self-restoration of vegetation; Compare the amount of ecosystem services received in the process of self-restoration of vegetation with the net profit received from traditional reclamation. The materials of the study are standard geobotanical descriptions created on the territory of the development of the Khmelivsk site of the Maidan Vilsky deposit of primary kaolins, shale, and granitoids. As a result, for the first time, a comparison of the effectiveness of traditional reclamation methods with controlled self-regeneration of natural vegetation was made. The study made it possible to create a long-term forecast of changes in plant communities as a result of the self-restoration of vegetation. The prediction of autogenous succession for the studied area indicates that the *Salicetum capreae* association will first form here, which will gradually be replaced by broad-leaved forests of the *Tilio cordatae-Carpinetum* association. Such a transition will occur between 50 and 70 years of self-restoration. In wetter areas, in 15–20 years, there will be a transition from verboses of the *Salicetum pentandro-cinereae* association to alder forests of the *Ribesio nigri-Alnetum* association. 70 years after the start of self-recovery, the volume of ecosystem services provided by this area will reach UAH 7 million per hectare per year. Cultivation of cereals will yield 3,100 UAH, and commercial wood – 6,480 UAH per hectare per year. During the self-renewal of vegetation in this area, the volume of ecosystem services increases according to the natural logarithm function. **Key words:** compensatory measures, autogenic succession, restoration ecology.

Постановка проблеми. На сьогодні очевидним є те, що втрата екосистемних послуг є однією із причин глобальної екологічної кризи. Із цієї причини, пропонується велика кількість проєктів, пов'язаних із відновленням стану порушених оселищ. Однак, є дві проблеми, які в останній час стають очевидними. Перша пов'язана із утилітарним принципом відновлення порушених екосистем. Тобто, якщо було порушено сільськогосподарські угіддя, то після відновлення це мають бути агроекосистеми, якщо лісові насадження – лісові екосистеми. При цьому, не враховується величина затрат на цю процедуру і величина прибутків отримана від їхньої експлуатації. Коли мова

іде про екосистемні послуги, які можна отримати від природної екосистеми, яка формується шляхом самовідновлення, то дисбаланс стає ще більш масштабним та більш очевидним.

Актуальність дослідження. Наслідком російської агресії, є порушення великих площ природних та синантропізованих екосистем. Відновлення цих оселищ є надважливою задачею, як по завершенню ведення активних бойових дій, так і на визволених від загарбників території [1]. На сьогодні, є розуміння, що це буде реалізовуватися в умовах обмеженого фінансування, дефіциту часу та ресурсів. При цьому, це буде відбуватися на фоні глобальних змін

клімату та інших проявів глобальної екологічної кризи. Отже, усі проекти відновлення, мають бути не лише найбільш надійними та ефективними, а й зорієнтованими на надання максимуму екосистемних послуг. Саме вони матимуть позитивний опосередкований вплив на інші території, зайняті лісовими насадженнями або сільськогосподарськими угіддями [2].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження направлене на поглиблення теорії динаміки екосистем та вдосконалення підходів до відновлення порушених оселищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Уже у вісімдесятих роках багато вчених стверджувало, що будь-яка рекультивційна ділянка за певний час відновиться природним шляхом. Те, що відбувається природним шляхом, може здатися мало пов'язаним з практичними кроками, які необхідно зробити, коли ми хочемо штучно прискорити процес відновлення рослинності, як це роблять ландшафтні архітектори та інженери. Проте, ці два процеси нерозривно пов'язані, оскільки обидва вони є результатом взаємодії між екологічними характеристиками ділянки та природними потребами рослин. Ми не можемо отримати ефективну рекультивацию, якщо не розуміємо екологію ділянки та матеріалів, які ми хочемо використовувати [7].

У галузі реставраційної екології, що розвивається, визначення концепції рекультивации у порівнянні із природним відновленням, є важливим кроком. Міжнародні стандарти Товариства екологічного відновлення [2], визначають рекультивацию, як «процес перетворення сильно деградованої землі в придатну для обробітку, або стан, придатний для певного використання людиною». Це визначення піддається критиці. Деякі автори роблять його так: «процес сприяння відновленню сильно деградованих екосистем на користь рідної біоти, шляхом створення середовищ існування, популяцій, спільнот або екосистем, схожих, але не обов'язково ідентичних навколишнім та природних екосистем» [8]. Отже, метою рекультивации може бути не лише пряме використання людиною відновленої ділянки, а й екосистемні послуги, які вона із неї отримує.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Стаття присвячується врахуванню показників економічної ефективності та потенціалу надання екосистемних послуг під час планування процедури відновлення порушених оселищ.

Новизна. Уперше було здійснено порівняння ефективності традиційних методів рекультивации із контрольованим самовідновленням природної рослинності.

Методологічне або загальнонаукове значення. У статті наводяться нові методи контролю за процесом самовідновлення природної рослинності. В основі цих методів, лежать алгоритми впливу на суцесійні процеси, розроблені на основі сучасної теорії динаміки екосистем.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є обрахунок суми екосистемних послуг отриманих в процесі самовідновлення рослинності та порівняння її із чистим прибутком отриманим від традиційної рекультивации. Відповідно до мети було поставлено такі завдання:

- Спрогнозувати зміну рослинності під час процесу самовідновлення.
- Визначити суму екосистемних послуг, отриманих в процесі самовідновлення рослинності.
- Порівняти суму екосистемних послуг, отриманих в процесі самовідновлення рослинності, із чистим прибутком, отриманим від традиційної рекультивации.

Матеріали та методи досліджень. Матеріалами дослідження є стандартні геоботанічні описи, створені на території розробки Хмельівської ділянки Майдан Вільського родовища первинних каолінів, жорстви та гранітоїдів. Описи, створені стаціонарними та маршрутно-експедиційними методами [6], в період 2021 по 2024 рр.

Масив описів, було проаналізовано та переведено в базу даних за допомогою програми «Turboveg for Windows». Рослинність була класифікована згідно із принципами швейцарсько-французької геоботанічної школи Браун-Бланке [6]. Показники факторів середовища визначалися із використанням синфітоіндикаційних методів, за допомогою пакету програм «Simargl 1.12» [10].

Витрати на проведення робіт розраховані із використанням економічного аналітичного методу [4]. Матеріалами для розрахунків стали офіційні статистичні зведення для досліджуваного регіону [3]. Екосистемні послуги обраховувались за допомогою непрямих методів, відповідно до принципів проекту «Економіка екосистем і біорізноманіття» [11].

Результати. Територія є перелогоми, які знаходяться на ранніх стадіях відтворення деревної рослинності. Тут переважають молоді похідні березові та осикові ліси із незначною часткою куничникових злаковників і молодих верболозів. Рослинні угруповання та їхня флора типові для Шепетівсько-Баранівського геоботанічного району дубово-соснових лісів орлякових та сосново-зеленомохових Центрального Полісся. Флористичне багатство та фітоценотичне різноманіття низькі, що обумовлено однотипністю екологічних умов. Рослинність досліджуваної території належить до 9 класів, 11 порядків, 14 союзів, 16 асоціацій.

Таблиця 1

Вікова та кількісна характеристика дерев на території планової діяльності

Вид дерева	Вікова група бонітет, вік	Кількість особин
Береза звичайна	Підріст, бонітет IV (вік 1–2 роки)	30000±1000
Береза звичайна	Ювенільні особини, бонітет IV (вік 3–5 років)	65±5
Береза звичайна	Віргінільні особини, бонітет IV (вік 5–15 років)	18
Осика звичайна	Підріст, бонітет IV (вік 1–2 роки)	2500±100
Осика звичайна	Ювенільні особини, бонітет IV (вік 3–5 років)	31
Осика звичайна	Віргінільні особини, бонітет IV (вік 5–15 років)	19
Дуб звичайний	Підріст, бонітет IV (вік 1–2 роки)	170±10
Дуб звичайний	Ювенільні особини, бонітет IV (вік 3–5 років)	7
Липа серцелиста	Ювенільні особини, бонітет IV (вік 3–5 років)	5
Вільха чорна	Підріст, бонітет IV (вік 1–2 роки)	200±10

Таблиця 2

Кількісна характеристика дерев на території планової діяльності

Вид чагарнику	Кількість особин
Верба козяча	340±10
Верба попеляста	260±10
Верба ламка	15
Ліщина звичайна	5
Крушина ламка	1300±100

Максимально можливий запас деревини в такому пралісі сягатиме 300–350 т/га.

Більш зволожена ділянка біля струмка буде розвиватися за іншим сценарієм. Тут, на протязі 15–20 років відбудеться перехід від верболозів асоціації *Salicetum pentandro-cinereae* Pass 1961 класу *Franguletea* Doing ex Westhoff in Westhoff et Den Held 1969 до вільхових лісів класу *Alnetea glutinosae* Br.-Bl. et Tüxen ex Westhoff, Dijk et al. 1946. На першому етапі, це буде асоціація *Ribeso nigri-Alnetum*. Потім, ймовірно є перехід до асоціацій *Carici acutiformis-Alnetum* Scamoni 1935, *Carici elongatae-Alnetum glutinosae* Schwickerath 1933, *Calamagrostio canescenti-Alnetum glutinosae* Mikoška 1956 та *Carici elatae-Alnetum glutinosae* Franz 1990. Через 100–150 років можливим є перехід до стійкого угру-

Найбільші площі займають молоді похідні ліси класу *Robinietaea*. Це різні варіанти асоціації *Salicetum capreae*: *Salicetum capreae* var *Betula pendula*, *Salicetum capreae* var *Populus tremula*, *Salicetum capreae* var *tyricum*. Деревостан формують береза повисла, осика звичайна та верба козяча. Їхній вік коливається від одного до 10 років. У районі понижень (міжвалових депресій) та вздовж каналу, зустрічаються верболози класу *Franguletea*. Це зарості верби попелястої, що формують асоціацію *Salicetum pentandro-cinereae*.

Деревно-чагарникові угруповання займають близько 80% території (13,6 га). Решта території (3,4 га) є ґрунтовими дорогами та злаковниками перелогів. Серед дерев переважають береза повисла, осика звичайна, липа серцелиста, вільха чорна та дуб звичайний. Більшість дерев є підростом. На другому місці за чисельністю є ювенільні особини. Молоді генеративні особини дерев зустрічаються не часто. В основному, це осики віком старші за 10 років (табл. 1).

Представники чагарників зосереджені переважно в східній частині досліджуваної території. Вони локалізовані в районі понижень із високими показниками зволоження. За межами цієї території, зрідка зустрічається типовий чагарник похідних лісів – верба козяча та крушина ламка. Західна частина переважно чагарникова. Тут зустрічаються верба попеляста, верба ламка, ліщина звичайна, а також верба козяча та крушина ламка (табл. 2).

Загальна надземна фітомаса продуцентів досліджуваної території складає 258±50 т. Із неї на дерева та кущі припадає біля 204±50 т. Фітомаса деревини та чагарників із такими віковими та характеристиками та бонітетом, має низьку господарчу чи рекреаційну цінність. Однак, вони цінні, як джерело екосистемних послуг.

За умов збереження рівня антропогенного тиску, на цій території буде продовжуватися відновлення лісової рослинності за сценарієм автогенної сукцесії. На помірно зволжених ділянках відбудеться повний перехід до різних варіантів асоціації *Salicetum capreae*. Цей перехід триватиме до 15–20 років. За цей час сформуються низько бонітетні березові та березово-осикові ліси. Через 50–70 років почнеться випадання основних порід із заміною їх на липу та дуб. Відбудеться перехід до дубово-липових лісів асоціації *Tilio cordatae-Carpinetum* Tracz 1962 класу *Carpino-Fagetea sylvaticae* Jakucs ex Passarge 1968. В деяких місцях локально утворюються асоціації *Galeobdolini luteae-Carpinetum*, *Melampyro nemorosi-Carpinetum* та *Stellario holosteae-Carpinetum*. Через 150–250 років на вирівняних помірно зволжених ділянках усі ці асоціації трансформуються в дубові ліси асоціації *Stellario holosteae-Carpinetum*.

повання заплавлених дібров *Stellario nemorum-Alnetum glutinosae* Lohm 1957.

Під час самовідновлення рослинності на цій території об'єм екосистемних послуг зростає відповідно до функції натурального логарифма за формулою:

$$E_s = a + b \ln t$$

де E_s – сума екосистемних послуг, a – первинний рівень суми екосистемних послуг, b – темп наближення рівня екосистемних послуг до максимуму, для клімаксічних екосистем, t – час із моменту початку самовідновлення.

Максимальний приріст суми екосистемних послуг відбуватиметься перші 50–70 років. Він досягне на цей час близько 7 млн. грн. на гектар. Після цього темп їхнього приросту сповільниться і досягне свого максимуму через 250–450 років. Якщо цю ділянку експлуатувати, як сільськогосподарське угіддя, наприклад, для вирощування зернових, то чистий дохід від одного гектара буде біля 3100 грн. Доходи від отримання ділової деревини будуть одноразовими, і зростатимуть із часом поки лісове насадження не стане перестійним. Для порівняння на 70 рік від висадки сосни звичайної із одного гектара можна буде отримати 6480 грн. чистого прибутку.

Дискусія. Завідувач кафедри ботаніки Ліверпульського університету та ініціатор запровадження нових ідей у відновлюваній екології Ентоні Бредшоу наводить такий приклад [7]. Він розглядає відновлення рослинності на відходах каолінової глини, які є близькими до досліджуваної нами ситуації. Він пише, що тут природне відновлення рослинності, відбувається дуже повільно, і попередні спроби штучно відновити рослинність, були невдалими. Проте, через природу екосистем, все це пов'язано з однією головною проблемою – нестачею поживних речовин для рослин, особливо азоту, – яку можна просто й економічно подолати за допомогою поєднання хімічних і біологічних методів [5]. Може здатися, що всі випадки унікальні, і для забезпечення успіху завжди будуть потрібні складні рішення.

Це правда, що для швидкого досягнення детальних кінцевих точок, можуть знадобитися значні маніпуляції, але дослідження різних місць показує, що саме тоді, коли належне екологічне розуміння поєднується з відповідною технологією, ефективні та самопідтримувані кінцеві продукти, виробляються економічно.

З одного боку, дійсно на самих відвалах відходів видобування каоліну, процес відновлення досить повільний [9]. Однак, ми спостерігаємо на вирівняних ділянках, де ці субстрати змішуються із піском і залишком ґрунту, досить швидке формування лісової рослинності [5].

Разом із тим, існує соціальна проблема, яка заважає робити вибір із пріоритетом отримання саме екосистемних послуг. Власник земельної ділянки, або громада, набагато легше можуть уявити прямий дохід від продажу зерна чи деревини. Численні екосистемні послуги сприймаються ними як даність. Так, ніби, ми їх отримуємо нізвідки і ніщо на їхню кількість та якість не впливає. Повітря яким ми дихаємо, мікроклімат в якому живемо, і наповненість водою річок, здаються нам вічними і безкоштовними. Через це, ми перестаємо їх цінувати і як результат – втрачаємо.

Головні висновки. Прогноз автогенної сукцесії для досліджуваної території, вказує на те, що тут спочатку сформується асоціація *Salicetum capreae*, яка поступово заміниться на широколистяні ліси асоціації *Tilio cordatae-Carpinetum*. Такий перехід відбудеться між 50 і 70 роками самовідновлення. На більш вологих ділянках через 15–20 років відбудеться перехід від верболозів асоціації *Salicetum pentandro-cinereae* до вільхових лісів асоціації *Ribeso nigri-Alnetum*.

Через 70 років після початку самовідновлення, обсяг екосистемних послуг, які надає ця ділянка, досягне 7 млн. грн. на га в рік. Вирощування зернових даватиме 3100, а ділової деревини – 6480 грн. за м³ у рік.

Під час самовідновлення рослинності, на цій території, об'єм екосистемних послуг зростає, відповідно до функції натурального логарифма.

Література

1. Варуха А. Огляд підходів з оцінки екосистемних послуг через призму їхнього застосування для визначення збитків, завданих військовими діями рф на території України / за заг. ред. О. Кравченко. Львів: Компанія "Манускрипт", 2022. 56 с.
2. Василюк О., Варуха А., Куземко А., Мойсієнко І., Коломицев Г. та ін. Екосистемний добробут: методика обрахунку екосистемних Е45 послуг непрямыми методами. Чернівці: Друк Арт, 2023. 184 с.
3. Державна служба статистики України. Головне управління статистики в Хмельницькій області. URL: <https://www.km.ukrstat.gov.ua/ukr/index.htm> (дата звернення: 20.09.2024).
4. Серединська В.М., Загородна О.М., Федорович Р.В. Економічний аналіз: навч. посіб. / за ред. Р.В. Федорович. Тернопіль: Астон, 2010. 624 с.
5. Хом'як І. В. Синтаксономія відновлюваної рослинності кар'єрів Центрального Полісся. *Український ботанічний журнал*. 2022. № 79(3). С. 142-153.
6. Якубенко Б. С., Попович С. Ю., Устименко П. М. Геоботаніка: Підручник. 2-ге вид. К.: Видавництво Ліра-К, 2019. 348 с.
7. Bradshaw A. D. Ecological principles and land reclamation practice. *Landscape planning*. 1984. Vol. 1. № 11. P. 35-48.
8. Gerwing T. G., Hawkes V. C., Gann G. D. & Murphy S. D. Restoration, reclamation, and rehabilitation: on the need for, and positing a definition of, ecological reclamation. *Restoration Ecology*. 2022. Vol. 7. № 30. P. 34-61.

9. Khomiak I. V., Onyshchuk I. P., Vakerych M. M., Hasynets Y. S. & other. Change in the general aboveground phytomass as a basis for modeling dynamics of recovery of vegetative cover. *Biosystems Diversity*. 2024. Vol. 2. № 32. P. 225-232.
10. Khomiak I., Harbar O., Kostiuk V., Demchuk N. & other. Synphytoindication models of the anthropogenic transformation of ecosystems. *Natura Croatica: Periodicum Musei Historiae Naturalis Croatici*. 2024. Vol. 1. № 33. P. 65-77.
11. The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB. *TEEB*. 2010. URL <https://teebweb.org/publications/teebfor/synthesis/> (дата звернення: 10.09.2024).

THEORETICAL BASIS OF CLASSIFICATION OF TERRAFORMING METHODS

Khomiak I.V., Onyshchuk I.P., Vasylenko O.M.
Zhytomyr Ivan Franko State University
Velyka Berdychivska str., 40, 10005, Zhytomyr
ecosystem_lab@ukr.net

The article discusses the problem of finding theoretical foundations for terraforming. At the same time, the meaning of the concept of terraforming expands beyond its narrow understanding as environmental changes on other planets. The research aims to improve and unify the theory of ecosystem dynamics and increase the efficiency of reclamation methods and natural vegetation restoration. The purpose of the study is to develop theoretical foundations for various terraforming procedures. Following the goal, the following tasks are set: to give a general definition of the terraforming process from the standpoint of astroecology and to determine the theoretical basis for the classification of terraforming procedures. The research materials are standard geobotanical descriptions made in the place of restoration of vegetation after disturbances in the period from 2004 to 2024. Descriptions are made using route-expedition and stationary methods according to standard methods. The resulting standard geobotanical descriptions are classified according to the principles of the Brown Blanke ecological and floristic school. In the course of the research, the process of terraforming was considered for the first time in a broad context and its existing procedures were classified. The obtained results can be used during the development of reclamation algorithms, restoration of settlements after violations, and in the process of space exploration. As a result of the study, it was established that terraforming is a local or global change in the environment of the planet or an artificial structure, which shifts the indicators of environmental factors to the optimum of the human ecological spectrum. Terraforming corresponds to evolutionary and successional changes in ecosystems. Initially, it is an allogenic succession that can, under favorable conditions, trigger autogenic and evolutionary processes. The basis for the classification of approaches to terraforming is the spatial characteristics of the territory where it occurs and the controllability of its processes by man. *Key words*: anthropogenic transformation, space expansion astroecology.

Теоретичні основи класифікації методів тераформування. Хом'як І.В., Онищук І.П., Василенко О.М.

У статті обговорюється проблема пошуку теоретичних основ для тераформування. При цьому, смисл поняття тераформування розширюється за межі його вузького розуміння, як зміни навколишнього середовища на інших планетах. Дослідження направлене на вдосконалення та уніфікацію теорії динаміки екосистем, а також на підвищення ефективності методів рекультивації та відновлення природної рослинності. Метою дослідження є розробка теоретичних основ для різних процедур тераформування. Відповідно до мети поставлені такі завдання: дати широке визначення процесу тераформування із позицій астроекології та визначити теоретичну основу для класифікації процедур тераформування. Матеріалами дослідження є стандартні геоботанічні описи зроблені в місці відновлення рослинності після порушень в період із 2004 по 2024 роки. Описи зроблено маршрутно-експедиційними та стаціонарними способами за стандартними методиками. Отримані стандартні геоботанічні описи класифіковано згідно із принципами еколого-флористичної школи Браун Бланке. У процесі дослідження вперше розглянуто процес тераформування в широкому контексті та здійснено класифікацію її існуючих процедур. Отримані результати можна буде використовувати під час розробки алгоритмів рекультивації, відновлення оселищ після порушень та в процесі освоєння космосу. У результаті дослідження встановлено що тераформування – це локальні або глобальні зміни середовища планети або штучної конструкції, які зміщують показники екологічних факторів до оптимуму екологічного спектру людини. Тераформування відповідає еволюційним та сукцесійним змінам в екосистемах. Спочатку воно є алогенною сукцесією, яка може за сприятливих умов запустити автогенні та еволюційні процеси. Основою для класифікації підходів до тераформування є просторові характеристики території, де воно відбувається та керованістю його процесів людиною. *Ключові слова*: антропогенна трансформація, космічна експансія, астроекологія.

Introduction. Statement of the problem. When we talk about the practice of terraforming, we often see it as a perspective of the distant future. However, this is the story of our past and present. Terraforming is often understood as the transformation of another planet into one that will be as close as possible to our home planet [1]. Already in this definition, it is laid down that we understand terraforming very closely. However, we will never get a copy of our planet, in which we will have a combination of a complete set of biogeocenous ecosystems or biomes of the Earth. We will have new ecosystems, some of which will only slightly resemble the ones we are used to. There will be areas that have not

terraformed and completely new ecosystems that have no analogues on our planet. The main thing that we will achieve is a functional exobiosphere, which will allow us to function relatively comfortably and safely in the natural environment of the planet. So, in a broad sense, the concept of terraforming is a change in the environment with the approximation of the indicators of its factors to the optimum of the human organism [2].

The human body evolved in certain environmental conditions and as a result, adapted to it. Its ecological tolerance is somewhat wider under the condition of the primary range, but not enough to explain the global settlement of humanity on the surface of the planet. This was

achieved by changing the conditions of the microenvironment. From clothing and the use of fire to housing and the manufacture of tools – all these changes in the environment are directed towards its optimal primary conditions. Thus, man from the beginning of his history chose expansion using local terraforming of the habitat as one of the main evolutionary advantages [3]. In our time, the practice of building housing, landscape design of settlements, changes in agricultural land, creation of objects of a nature reserve fund, or recreational infrastructure, like the construction of space stations outside our planet, is terraforming in the broadest sense of the word.

However, despite thousands of years of practice, we make mistakes all the time when doing terraforming. This, first of all, is connected with the pressure of earthly chauvinism, born from the frequent forgiveness of our mistakes in the short term from the side of earthly ecosystems. When we move on to more clearly defined tasks, such as the reclamation or restoration of ecosystems, the creation of space stations, or experiments like "Biosphere 2", we understand how superficial and incomplete our theoretical knowledge is. This leads to excessive irrational costs, on individual tasks of terraforming, and the inability to overcome environmental crises and risks during the development of outer space [4].

Research relevance. The study of the theoretical foundations of terraforming is relevant at the national and international levels. Due to the tough military confrontation with the terrorist country, Ukraine faced the difficult task of restoring the elements of the environment affected by hostilities. In the conditions of a critical shortage of finances and technical means, we are forced to carry out the procedures of restoration ecology as efficiently as possible [5]. Also, the high efficiency of such actions should be in the process of assimilation of outer space, which has become more active recently. It is impossible to achieve such efficiency without developing the basic theories of terraforming. In connection with this, the research carried out in this direction is extremely relevant.

The connection of the author's work with important scientific and practical tasks. Our research is aimed at improving and unifying the theory of ecosystem dynamics, as well as improving the effectiveness of methods of reclamation and restoration of natural vegetation.

Analysis of the latest research and publications. From the point of view of astroecology, terraforming is a type of allogenic dynamics of ecosystems [4]. However, it includes elements of the evolution of ecosystems, as a result of the transfer of invasive species of transformers beyond their ranges with the formation of new ecosystems. Also, during terraforming, there are autogenic processes, when transferred species independently transform econiche packages. In other words, we have a combination of allogenic and autogenic successional processes against the background of anthropogenically activated evolution of ecosystems. On the one hand,

according to its energy-dynamic characteristics, this is a typical successional process, but in essence, each link of the successional chain is a new ecosystem that corresponds to the definition of evolution. When this process takes place within the boundaries of the Earth and involves aboriginal species, it will be a classical succession. When this occurs outside the terrestrial natural environment or the introduction of edifiers is used, then this is classic ecosystem evolution.

The process of terraforming combines syngensis, when species coordinate coexistence within a certain ecosystem, and endoecogenesis, when their life activity changes the abiotic environment [6]. These changes will accumulate until a certain critical limit is reached, when the econiches will be restructured with the formation of another ecosystem.

The task of terraforming is such changes in the environment that shift it to the optimal values of most factors of the human ecological spectrum. Based on the evolutionary history of man, it will be the environmental conditions in tropical savannas immediately after the end of the rainy season. These conditions cannot be created even on the entire surface of our planet. That is, these changes will be local.

The fact that humman was able to go beyond the borders of his original area was realized thanks to local terraforming [7]. Humans began to make clothes, build houses, and use fire and hunting tools. These are all also examples of local terraforming. On a larger scale, man most often spontaneously changed his environment, which often led to the depletion of resources, and as a result, the extinction of certain tribes or the stimulation of their further migration. There are also examples of terraforming that is positive for hunting tribes. For example, in North America, certain tribes have struggled with reforestation because bison and other populations of animals are more numerous on the prairies.

Highlighting previously unsolved parts of the general problem, to which the specified article is devoted. Nowadays, local terraforming is carried out within premises or settlements, during the restoration of plant cover disturbed by production or natural disasters. Also, such a demand arises during space exploration. At the same time, there are risks for extraterrestrial aboriginal biota that may not withstand competition with terrestrial species and dangers for astronauts living on space stations [8].

Scientific novelty. For the first time, the process of terraforming in a broad context was considered and its existing procedures were classified.

Methodological or general scientific significance. The results of the research can be used during the development of reclamation algorithms, restoration of habitats after breaches, and in the process of space exploration.

Purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to develop theoretical foundations for various terraforming procedures. Following the goal, the following tasks are set:

Give a broad definition of the terraforming process from the standpoint of astroecology

Determine the theoretical basis for the classification of terraforming procedures

Create a preliminary classification of terraforming procedures

Materials and methods of research. The research materials are standard geobotanical descriptions made in the place of restoration of vegetation after disturbances in the period from 2004 to 2024. Descriptions are made using route-expedition and stationary methods according to standard methods [9]. The resulting standard geobotanical descriptions are classified according to the principles of the ecological and floristic school of Braun Blanke using the «Turboweg» program [10]. Indicators of environmental factors were determined by the synphytoindication methods using the «Simargl» software package [11].

Presentation of the main material. Scientific classification of natural objects or functions is not a simple sorting of them by a set of features. Classification is still a research and forecasting tool. A well-made classification can overtake scientific theories that existed at the time of its creation. A great example is the Mendeleev-Meier classification of chemical elements. Thanks to her, it was possible not only to predict the existence of unknown elements but also to reconcile the position with the quantum theory of the placement of electrons, which was discovered half a century later.

The classification of different types of terraforming is difficult to build based on a minimum of fundamental features. Therefore, in order to cover all varieties of terraforming in the broad sense of the word, we are forced to choose several signs. They are related, first of all, to the spatial characteristics of the territory where terraforming takes place, and the controllability of the processes by humans. As for the latter, we should divide all its types into two groups: spontaneous and planned processes. Life is ubiquitous and resilient enough for extreme travel. Within the limits of our planet, all its surface everything is saturated with its representatives, so as soon as the edaphic and climatic conditions allow it, life quickly settles on its own in unoccupied territory. To keep its resettlement under control, you need to constantly spend a lot of resources. The same thing happens outside the natural part of the biosphere. Despite our best efforts to sterilize spacecraft, terrestrial organisms constantly penetrate them and spread through space. This is especially noticeable in manned spaceships and stations. Therefore, regardless of where we are going to carry out terraforming and how we will do it, its spontaneous processes will act in parallel.

The presence and possibilities of spontaneous terraforming processes allow us to plan our actions taking this into account. In this regard, we can only change the abiotic conditions without deliberately settling selected groups of living organisms on the territory; to populate the biota and not interfere in the course of its settlement, syngensis and

endoechogenesis; combine changes in the abiotic environment with the cultivation of certain groups of biota.

Terraforming can be carried out both in individual local areas or in a conditionally closed space, and in open spaces, even on the scale of the entire planet. In this regard, we can distinguish a number of localities according to their scale and area (table 1).

Table 1

Examples of localities were selected for terraforming, which were classified using features of area and scale

Type of localities	Examples of localities were selected for terraforming
Environment of one organism.	Clothes, space suit
Group environment	Earth vehicle, spacecraft, space station compartment
Local	A house, a residential area, a space station, or a fragment of a natural tract.
Tract.	Quarry, natural tract, local biocenous ecosystem
Landscape	Several tracts are interconnected, such as the headwaters of a river with the catchment basin of the source from which it begins
Biome	A large, relatively uniform area of the planet's surface
All-planetary	The whole planet.

When we talk about different approaches to terraforming, which differ among themselves in terms of spatial characteristics, we must understand that their isolation is conditional, relative, and incomplete. Even from the space station, representatives of the biota will penetrate into the environment. And we have to admit that there is a non-zero probability that they will find a breeding ground for themselves. This probability depends on two factors – the proximity to the optimum indicators of the factors of this environment and the amount of biota that goes beyond the zone for terraforming. In our planet's conditions, this regularity is perfectly illustrated by the use of invasive species of transformers (for example, *Robinia pseudoacacia*) for reclamation or other hydromelioration works. That is why, when using any terraforming method, we must take these risks into account and reduce their probability [12].

On the other hand, the principle of interpenetration of biota and abiotic components between neighboring ecosystems is a guarantee of their more sustainable existence. For example, these are forest strips around agroecosystems, green areas in urban development, or swamps surrounded by forests near the source of the river. Therefore, when carrying out terraforming in order to obtain the necessary environmental conditions in a certain local area, it is desirable to influence the neighboring areas connected with it ([13]).

Main conclusions. Terraforming is a local or global change in the environment of the planet or an artificial structure, which shifts the indicators of environmental factors to the optimum of the human ecological spectrum.

Terraforming corresponds to evolutionary and successional changes in ecosystems. Initially, it is

an allogeneic succession that can, under favorable conditions, trigger autogenic and evolutionary processes.

The basis for the classification of approaches to terraforming is the spatial characteristics of the territory where it occurs and the controllability of its processes by man.

References

1. Hall L.S., Krausman P. R., Morrison, M. L. The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin*. 1997. № 25. P. 173-182.
2. Онищук І. П., Хом'як І. В. Використання комплексної дії екологічних факторів у процесі колонізації космосу. *Екологічні науки*. 2022. № 3(42). С. 107-110.
3. Cockell C. S., Samuels T., Stevens A. H. Habitability is binary, but it is used by astrobiologists to encompass continuous ecological questions. *Astrobiology*. 2022. Volume 1. P. 7-13.
4. Khomiak Ivan, Vasylenko Olha. Using the rules of natural recovery of ecosystems for the process of revegetation and terra forming. *Ekologia i racjonalne zarządzanie przyrodą: edukacja, nauka i praktyka: materiały z międzynarodowej konferencji naukowo-praktycznej*. (Łomża–Żytomierz, 15.11.2023r. 2023). Wydawnictwo: MANS w Łomży, P. 199-203.
5. Хом'як, І. В., Брень, А. Л., Медвідь, О. В., Хом'як, А. К., Максименко, І. Ю. Динаміка рослинності суходолу на території кар'єрів як модель постмілітарного відновлення дикої природи. *Український журнал природничих наук*, 2023. (5), С. 61-69.
6. Khomiak Ivan, Khomiak Oksana. The influence of substrate particle size on the potential for spontaneous spread of biota across the landmass of rocky planets. *Global science: prospects and innovations. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference*. Cognium Publishing House. Liverpool, United Kingdom. 2024. P. 314-319.
7. Malaterre C., Jeancolas C., Nghe P. The origin of life: What is the question? *Astrobiology*. 2022. P. 851-862.
8. Cockell C. S., Harrison J. P., Stevens A. H. A low-diversity microbiota inhabits extreme terrestrial basaltic terrains and their fumaroles: implications for the exploration of Mars. *Astrobiology*. 2019. Volume 19. P. 284-299.
9. Якубенко Б. Є., Попович С. Ю., Устименко П. М., Дубина Д. В., Чурілов А. М. Геоботаніка: методологічні аспекти дослідження. Ліра, 2020. 316 с.
10. Hennekens SM, Schamine'e JHJ. 2001. TURBOVEG, a comprehensive data base management system for vegetation data. *J Veg Sci* 12: 589-591. URL: https://www.researchgate.net/publication/233465308_Large_vegetation_databases_and_information_systems_New_instruments_for_ecological_research_nature_conservation_and_policy_making (дата звернення: 10.09.2024).
11. Хом'як І.В., Василенко О.М., Гарбар Д.А., Андрійчук Т.В., Костюк В.С., Власенко Р.П., Шпаковська Л.В., Демчук Н.С., Гарбар О.В., Онищук І.П., Коцюба І.Ю. Методичні підходи до створення інтегрального синфітоіндикаційного показника антропогенної трансформації. *Екологічні науки*. 2020. 5(32). 1. С. 136-141.
12. Carré L., Zaccai G., Delfosse X., Girard E., Franzetti B. Relevance of earth-bound extremophiles in the search for extraterrestrial life. *Astrobiology*. 2022. Volume 3. P. 322-367.
13. Khomiak Ivan, Khomiak Oksana. Using artificial intelligence for express-analysis of the biotic potential of alien habitat. *Modern research in science and education. Proceedings of the 8th International scientific and practical conference*. BoScience Publisher. Chicago, USA. 2024. P. 203-208.

УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕТНОЕКОЛОГІЧНИЙ ПРОСТІР У МИСТЕЦЬКИХ ТВОРАХ ХУДОЖНЬОЇ ГЕОІКОНІКИ ТА ЕКОГРАФІЇ

Шевченко Р.Ю.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ
azimut90@ukr.net

Досліджується наукова доцільність залучення до баз даних екологічного моніторингу нового фактологічного матеріалу – мистецькі твори художньої геоіконіки та екографії. Вони, як прикладні напрямки, поєднують наукові знання про Землю та природу, вивчаються особливості та закономірності зображення об'єктів, явищ, процесів у навколишньому природному середовищі на предметах історико-культурної спадщини. В даному дослідженні – це картини, що сумарно обґрунтовують екологічний, географічний та астрономічний тематичні змісти еволюції українських національних етнекологічних знань про довкілля, гармонійне природокористування, збалансоване ресурсозабезпечення та екологічний баланс. Проведена класифікація геоіконічних зображень та визначена категорія маловивчених їх груп – антропогліфів. Наведений короткий опис основних стародавніх геоізображень території сучасної України.

Змальована екографічна картинна візуалізація природно-територіального комплексу українського національного населеного пункту (хутору) під загальною назвою «Український Космос» художника Олега Шупляка. Семіотика картин передає значення сил Природи для стародавніх українців. Поданий опис та світлини відповідних картин. Здійснений огляд виставки з експозиції «Екологія та Космос Трипільля» у Державному історико-культурному та етнекологічному заповіднику «Трипільська культура». Зазначена інформація про Тараса Шевченка не лише як художника-пейзажиста ландшафтів, але й географа-картографа, зокрема, представлена карта Аралу та Східного Каспія, що належить до екографії Кобзаря. Поінформовано щодо напрацювань у галузі сакральної геоіконіки та екографії литовської наукової картографічної школи м. Вільнюса.

Матеріали авторських досліджень можуть ефективно слугувати у відповідних програмах організації еколого-туристичних маршрутів та експедицій. *Ключові слова:* геоіконіка, екографія, етнекологія, художня геоіконіка, довкілля, навколишній світ, українська космографія.

Ukrainian National Ethnoecological Space in art geioconic and ecography works. Shevchenko R.

The article discusses the scientific task of adding new factual material to ecological monitoring databases. We include artistic works of artistic geioconics and ecography. Geioconics and ecography, as applied directions that combine knowledge of Earth and Nature Sciences, investigate the peculiarities and regularities of the image of objects, phenomena, processes in the surrounding natural environment on objects of historical and cultural heritage. In this study, these are pictures that combine the ecological, geographic, and astronomical thematic content of the evolution of Ukrainian national ethno-ecological knowledge about the environment, harmonious use of Nature, balanced resource provision, and ecological balance of forces. The classification of geioconic images and the defined category of their little-studied groups are anthropoglyphs. A brief description of the main ancient geoimages of the territory of modern Ukraine is given.

The ecographic pictorial visualization of the natural-territorial complex of the Ukrainian national settlement (farm) under the common name «Ukrainian Space» by the artist Oleg Shuplyak is described. The semiotics of the paintings conveys the meaning of the forces of Nature for the ancient Ukrainians. The description and photos of the corresponding paintings are provided. An overview of the exhibition from the exposition «Ecology and Space of Trypillia» in the State Historical-Cultural and Ethnoecological Reserve «Trypillian Culture» was made. The latest information about Taras Shevchenko is presented, not only as a landscape painter, but also as a geographer-cartographer. For the first time, a map of the Aral Sea and the Eastern Caspian Sea, which belong to Kobzar's ecography, is presented. Information is provided about the work done in the field of sacred geioconics and ecography of the Lithuanian scientific cartographic school in Vilnius.

The material of the article can be useful for programs for the organization of eco-tourism routes and expeditions. *Key words:* geioconics, ecography, ethnoecology, artistic geioconics, environment, the surrounding world, Ukrainian Cosmography.

Постановка проблеми. Геоіконіка – прикладна наука про Землю, досліджує геопросторові об'єкти та природні явища на зображеннях навколишнього природного середовища. Зображення довкілля можуть подаватися у традиційному вигляді: карти природи, аерокосмічні знімки різної спектральної зональності, схеми еколого-освітніх маршрутів, абриси туристичних мандрівок, пікетажні журнали екологічного рекогносцирування, теодолітні ходи, що використовуються для укладання топографічних планів тощо. З метою реалізації програм екологіч-

ного моніторингу, раціонального ресурсо- та природокористування вони повною мірою досліджені за сучасними методиками геодезії, картографії, фотографії та геоінформатики. Поряд із досить наповненим пластом просторових даних знаходяться геоізображення довкілля, що на сьогодні маловивчені, зокрема: *геогліфи* (наскальні та наземні зображення флори та фауни, гідрографічні, еколого-географічні та палеогеоморфологічні об'єкти; *антропогліфи* (графічні ретроспективні дані про довкілля, стародавню інфраструктуру поселень, предмети побуту,

які нанесені на предмети культурної спадщини). До антропогенічних екографічних зображень також відносяться мистецькі твори художньої геоіконіки, що відображають геопросторовий розріз етнонаціональних уявлень про раціональне природокористування та гармонію довкілля у плині часу (екографію).

Актуальність дослідження. Сучасний моніторинг довкілля передбачає інструментарний метод, камеральну (кабінетну) обробку результатів польових вишукувань та комбінований прийом вивчення дистанційних та тактильних, матеріальних та нематеріальних джерел інформації про навколишнє природне середовище. Для уточнення геопросторових даних про динаміку трансформації екологічних систем необхідна екографічна інформація з предметів національної культурної спадщини, а саме: реконструктивної мистецької та ретроспективної художньої геоіконіки (екокосмографіки), що відображає особливості розвитку природно-територіальних систем у просторі та часі, ментальні та матеріальні підходи ставлення до природних ресурсів, гармонійне збалансоване їх використання.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. На сьогодні у тривалій кривавій боротьбі з рф – країною-агресоркою, що здійснила широкомасштабне вторгнення-агресію проти України український народ відстоює свою державну незалежність та існування, самобутність українського етносу. У часи повсюдної відбудови екологічна національна наукова думка потребуватиме радикальної трансформації з точки зору інноваційних природоохоронних підходів щодо переосмислення ставлення до природи, її ресурсного, рекреаційного та релаксаційного потенціалу. Отже, відповідні космоєкоцентричні парадигми мають формуватися на фундаментальних засадах україноцентричних етнонаціональних еколого-космогонічних знань про гармонійне природокористування та захист довкілля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Геоіконіка та екографія навколишнього природного середовища нині зароджується як прикладний напрям етнеоекології та екокосмографії України, що описує національно-етнічну приналежність Українського народу до споконвічних природно-територіальних комплексів, їх динаміку під впливом астрономічних, космологічних, космогонічних явищ через зміни фізико-географічних зон, кліматичних поясів, природних зон, еколого-культурних традицій тощо.

Екологічній геоіконіці та природоохоронній космоєкографії Українства присвячені наукові праці докторів географічних наук, професорів Віктора Шевченка «Дивосвіт геозображень», 2007 р. [5], Генріха Швєбса «Еніогеографія», 2000 р., «Прорив у минуле (еніологія – перспектива XXI століття!)», 1999 р. [4].

Відповідний напрямок наукових досліджень започаткований автором у 2000 р., а саме: «Космологічні закони та передові космічні технології у моніторинзі

та прогнозі екологічних катастроф у м. Києві» [2], «Геософічна (історико-філософська) парадигма моніторингу довкілля-простору» [6] та інші [7].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Вищезазначені дослідження екологічного моніторингу довкілля України не торкалися наукової проблеми етнонаціональних аспектів природозаповідання, охорони природи, гармонійного природокористування, які відображені у екографіці мистецьких творів художньої геоіконіки, що потребує додаткового вивчення.

Новизна. Художні твори, що відображають стан навколишнього природного середовища, ретроспективна демонстрація ландшафтних комплексів та систем у картинах – це повноцінне джерело достовірної екологічної інформації для потреб екологічного моніторингу національного рівня.

Методологічне або загальнонаукове значення. Моніторинг екологічного та природоохоронного контенту на картинах, що демонструють екокосмографію українських етнічних земель (з точки зору уявлень про гармонійне довкілля та природокористування) є подальшим продовженням методологічних розробок з прикладної та загальної екології, викладених у постулатах професорів Г. О. Білявського, В. О. Шевченка, Р. С. Фурдюя та ін.

Викладення основного матеріалу. В Україні на сьогодні достеменно відомі, завдяки здійсненим археологічним вишукуванням, окремі ретроспективні стародавні геозображення, інтерпретовані у вигляді анаморфічних картографічних геоіконіках довкілля. Передусім це карта трипільських поселень, укладена В. Хвойкою у 1894 р. та «Межиріч-мапа» (датована 12000–14000 рр. до н.е.), яка тривалий час демонструвалася у залі Київського обласного археологічного музею у с. Трипілля.

«Межиріч-мапа» відображає територіальні особливості розташування проукраїнського поселення із урахуванням усіх складових гармонійного та раціонального природокористування. Показані населені місця (оселища), локації ріллі, вибіркового полювання, рибальства, а також перші зелені еколого-рекреаційні системи. Карта відображає територіальну організацію поселення на засадах дбайливого ставлення до довкілля (гармонійного природокористування) та циклів еколого-економічної, соціально-природоохоронної та побутової життєдіяльності у відповідності до астрономічних періодичних явищ, подій та інших природних циклів.

Поселення представлене на карті у вигляді великого кола із концентричними малими радіусами в середині ойкумени, а в центрі кожної з них виявлені місцезонації джерел води. Варто підкреслити, що локація українського поселення завжди відрізнялася двома топографічними та гідрографічними особливостями двох еколого-космогонічних стихій: води та землі, які для Українства є сакральними.

Тож не дарма на спеціальній карті України Гійома де Боплана 1648 р. всі українські поселення показані такими, що розміщені на пагорбах та «нанизані як намисто» на лінії річкових систем.

Відповідна космогонічна основа функціонування екологічного поселення представлена у екографічній картинній візуалізації космогонії українського національного оселища під загальною назвою «Український Космос» художника Олега Шупляка. Центральним елементом у національному екологічному поселенні є величезний «Дідух», як космогонічний оберіг та астрономічний годинник життєвого циклу тодішньої етнонаціональної праукраїнської спільноти. Це особливість національно-етнічного коду нації в еколого-природоохоронній системі України, яка була навмисно забута та знищена окупаційною російською та радянською системами.

На картині «Велике гніздо» (рис. 1) зображений типовий український природно-територіальний простір системи розселення населення та навколишньої екосистеми XV – поч. XX стт. Центральним елементом екопоселення є річка (струмок), терновий плетінь-паркан є обмежувальним та захисним фактором від небезпек, які надходили з трьох векторів тогочасної військово-політичної агресії: польської, оттоманської та російської. Остання до сьогодні є активним небезпечним фактором та ризик-азимут на майбутнє. Нищівні війни тих століть, як і зараз наносили непоправної шкоди доквіллю, але теперішня російсько-українська війна є фатальною для природно-заповідних та інших особливо цінних охоронних територій із численними пам'ятками природи. Лелека – екологічний символ України, зображений на емблемах багатьох екологічних організацій нашої держави, наприклад, Громадського об'єднання «Жива планета».

Лелека в українській етнекології – символ поколінного (родовідного) відродження генофонду нації та природи. Не дарма, до 1930-х рр. XX ст. у Наддніпрянщині ковбасихи¹ віщували за часом прильоту лелек про метеорологічні, фенологічні та соціально-економічні особливості подій найближчого часу. Картина містить всі еколого-історичні риси України: млин, визначні сузір'я, лелека, Чумацький шлях, молоко, глечик, криниця, рушник-річка тощо. Вітровий млин символізує (у сучасному розумінні) зелену вітрову генерацію енергії, особливо це має актуальне значення, зважаючи на руйнування енергетичної системи України.

Відповідним екологічним та етноприродоохоронним символізмом приникнені практично всі художні екокосмографічні твори художника Олега Шупляка. Їх геоіконіка вражає своєю багатоплановою екофі-

лософією, природно орієнтованим спрямуванням, інвайроменталістичним сюрреалізмом та одночасно прагматичним екосимволізмом.



Рис. 1. Картина «Велике гніздо», О. Шупляк, 2024 р. Демонструється у арт-просторі в м. Бережани, Тернопільська область (www.shupliak.art)

Еколого-космографічні концепти зображення зоряного неба на картинах Олега Шупляка покладені в основу нових україноцентричних назв сузір'їв небосхилу в проєкті «The Ukrainian Sky project»: «Віз» (Велика Ведмедиця), «Дівчина з відрами» (Орел), «Криниця» (Дельфін), «Курка з курчатами» (Плеяди), «Пастух з герлигою» (Телець) тощо.

У 2024 році під час літньої експедиції з вивчення етнекологічних ландшафтів Наддніпрянської України у селі Легедзине Тальнівського району Черкаської області, неподалік комплексу «Географічний центр України» у Державному історико-культурному та етнекологічному заповіднику «Трипільська культура» автор ознайомився з експозицією «Екологія та Космос Трипілля», що складається з десяти картин художників-сучасників: Володимира Козюка, Олександри Ферендович, Євгенія Божка.

Найзмстовніша, на предмет екології доквілля, – картинна композиція «Народження Трипільської цивілізації» (рис. 2).



Рис. 2. Картина «Народження Трипільської цивілізації», В. Козюк, О. Ферендович (2022 р.), с. Легедзине, Черкащина, (світлина автора)

¹ Ковбасихи – жінки-характерниці, що визначали стан доквілля за зовнішніми ознаками (прикметними явищами в атмосфері, гідросфері, літосфері та соціобіосфері), вміли визначати місцеві аномалії (геопатогенні та геовітальні зони) за магнітним полем Землі (геомантія), прогнозували врожайність тощо.

Семіотика зображення визначає світ спіралеподібним. Відповідна космологічна геометрія повторюється в анатомії усіх біологічних істот (наприклад, вихрове оволосіння голови людини), атмосферних та гідрологічних явищ світового обігу води (циклональні фронти, сила Каріоліса). У центрі художньої геоіконіки – жіноче скульптурне зображення, родовідний початок, як життєдайна сила продовження існування людської цивілізації та зародження праукраїнського етносу (трипільців). У кутах тематичного змісту екографіки впізнаються елементи національного українського побуту стародавньої епохи, що створені з глини – екологічно чистого матеріалу. Глиняна цивілізація праукраїнських трипільців залишила хати-мазанки, глиняний посуд, приладдя ритуального та сакрального призначення. Це визначало наближеність тогочасної людини до Природи в усьому – від побуту до світогляду, навіть підлога у будинках трипільців була глиняна.

На жаль, відповідні екологічні цінності не були збережені до сьогодення і представлені лише у ретроспективно-футуристичних мистецьких творах художньої геоіконіки в музейних установах та провідних арт-центрах нашої держави.

Не можна не згадати екологічний, природооглядовий контент художніх творів Тараса Шевченка, який окрім того, що був лірником, художником, поетом, а також географом-мандрівником та картографом в експедиції О. І. Бутакова (1848–1849 рр.). В Аральській експедиції Кобзареві посилювалося зацікавлення природою, археологічними пам'ятками, етнологією [3].

Понад семи сотень акварелей і малюнків створено за час експедиції, не враховуючи офіційних альбомів та службових замальовок про Аральське море. Багато з них збереглося, зокрема: «Пристань на Сирдар'ї», «Маяк на Кос-Аралі», «Острів Святого Миколи» тощо.

Тарас Шевченко намалював безліч панорамних видів (на кшталт сучасних фототеодолітних знімків) з прив'язкою до астрономічних координат найближчих маяків Аральського моря (наразі щезло). До географіки генія української нації відносять картосхеми східного узбережжя Аралу та Каспію (рис. 3).

Безумовно, екогеографічна карта, співавтором якої є Тарас Шевченко, – є екографічною пам'яткою матеріальної та нематеріальної національної культурної спадщини України, яка відображає територіальні, фізико-географічні, еколого-гідрографічні та геоіконічні особливості акваторій двох морів на середину XIX ст. Враховуючи те, що карта розміщена в Національному музеї Великої Британії, вона викликає інтерес як предмет художнього картографічного мистецтва (геоіконографії) на кшталт того, що був знайдений у 2009 р. на Південному Уралі та отримало іменування «Карта Творця».



Рис. 3. Карта геоіконіки Аральського моря та Східного Каспію (у її укладанні взяв участь Т. Шевченко). Укладена 1849 р., видана у Петербурзі у 1873 р., зберігається у Лондонському музеї мистецтв із 1924 р.

Тарас Шевченко, Микола Гоголь, Іван Котляревський та інші генії української національної культури були збирачами народної етнологічної інформації про надзвичайні природні явища, антропофауну, сакральну зоографію, аномалії в розвитку людини, тварин та рослинного покриву. Їх дослідження супроводжувалися замальовками, картосхемами, оповіданнями. Але жодного разу не були опубліковані в силу політичної та релігійної цензури тих часів. Відповідна інформація була знайдена професоркою Вільнюського університету Лейдикла Гієдрою Беконітою [8]. У 2019 р. під її провідом, на кафедрі картографії та геоінформатики Інституту наук про Землю була укладена «Карта сакральньо-біологічних створінь в Європі», де детально представлена інформація сакрального біорізноманіття на територію сучасної України (рис. 4).



Рис. 4. Територія України на фрагменті карти сакральньо-біологічних істот Європи, Вільнюський державний університет, проф. Б. Беконіте, 2019 р.

Карта – своєрідний об’єкт картографічного та художнього мистецтва панєвропейської етнекологічної геоіконіки та екографії. Це обґрунтовується тим, що в сакральній екології міфи та легенди – складова частин нематеріальної природоохоронної культури та екофілософського надбання народів Європейського Союзу [1]. Карта вперше була надрукована в авторитетному науковому Scopus-журналі «Journal of Maps» [9], де вона отримала нагороду eBest Map у 2013 р. Мірило карти 1 : 7 200 000. Розмір зображення 62,5 * 83 см.

Головні висновки. Геозображення та екографія в екологічних дослідженнях – це дивосвіт ретроспективних та еколого-історичних даних про еволюцію відносин у системі «суспільство-природа». Вони уточнюють та розширюють геоінформаційний кругозір про навколишнє природне середовище.

З огляду на вищевикладене, можна зазначити: *вперше* запроваджено в практику домоніторингових екологічних вишукувань мистецькі твори художньої геоіконіки та екографії, як важливий дослідниць-

кий матеріал з вивчення історії екологічної наукової думки та природознавства, поданий опис ексклюзивних та унікальних матеріалів; *удосконалено* систему екологічних уявлень щодо етнекологічного українського простору найдавніших часів та зв'язок його із сьогоденням; *набули подальшого розвитку* ідеї повоєнного відновлення України на засадах етнекологічної культури праукраїнських сельбищ.

Перспективи використання результатів дослідження. Напрацювання ефективно сприятимуть успішному вирішенню еколого-туристичних завдань, зокрема, під час організації еколого-освітніх, туристсько-рекреаційних, експедиційних та екскурсійно-подорожувальних місій європейськими туристичними провайдерами з промоції унікальності та аносування споживачів країн ЄС новими рекреаційними продуктами та відповідними послугами ретритного відновлення в ексклюзивних природних ландшафтах України, що відображені художньою геоіконікою.

Література

1. Борейко В.С. Священні гаї, заповідність та охорона біорізноманіття. Монографія. Київ. КЕКЦ. 2024. С. 4-11.
2. Герман М.В., Шевченко Р.Ю. Космологічні закони та передові космічні технології у моніторингу та прогнозі екологічних катастроф у м. Києві. Інженерна геодезія. 2000. Вип. 43. С. 146-150.
3. Дрбал А., Радей К. Тарас Шевченко: участь в експедиціях та науки про Землю і Всесвіт. Вісник геодезії та картографії. № 6 (93). 2014. С. 34-42.
4. Швебс Г.І. Еніографія. Прорив у минуле (еніологія – перспектива XXI століття!). Сімферополь: Таврія, 1999. Кн. 2. 1999. 348 с.
5. Шевченко В.О. Дивосвіт геозображень: монографія. Київ: Ніка-Центр, 2007. 252 с.
6. Шевченко Р.Ю., Шевченко З.М. Геософічна (історико-філософська) парадигма моніторингу довкілля-простору. Екологічні науки. 2020. № 3 (30). С. 20-24.
7. Шевченко Р.Ю. Зелений туризм в контексті українських етнонаціональних еколого-космогонічних знань про гармонійне природокористування та захист довкілля. Зелена економіка та низьковуглецевий розвиток: порядок денний для України: матер. IV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 15 грудня 2023 р.). Львів-Торунь : Liha-Pres, 2023. С. 142-146.
8. Giedre Beconyte. The Map of Mythical Cretures in Europe. Vilnius. Vilnius Univercity Press. 2019. ISBN9786094591107.
9. Giedrė Beconytė, Agnė Eismontaitė, Jovita Žemaitienė. Mythical creatures of Europe. Journal of Maps. 2014. Vol. 10. No. 1, P. 53-60, <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2013.867544>

ВИКОРИСТАННЯ ХІМІЧНИХ ДИСЦИПЛІН ЯК ІНТЕГРАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ

Шляніна А.В.¹, Дунаєвська О.Ф.²

¹Житомирський базовий фармацевтичний фаховий коледж
вул. Чуднівська, 99, 10005, м. Житомир

²Поліський національний університет
бульв. Старий, 7, 10008, м. Житомир
shlianina.alla@pharm.zt.ua, oksana_fd@ukr.net

Висвітлено питання ролі освіти у подоланні екологічних проблем сучасності. Наголошено на важливості використання компетентнісного підходу в освітньому процесі. Доведено, що зміст навчальних програм хімічних дисциплін повинен ґрунтуватися на трактуванні основних понять, законів та положень науки хімії, що можуть і повинні сприяти збереженню навколишнього природного середовища. Зазначено, що екологічна освіта є ефективною і результативною за умови спрямованості на безпосереднє розв'язання як навчальних, так і реальних екологічних проблем. Підкреслено, що екологічна компетентність як основа екологічного мислення може бути витлумачена як здатність бачити, формулювати й розв'язувати екологічну проблему в конкретній життєвій ситуації.

Представлено досвід керівництва пошуково-дослідницькою діяльністю здобувачів освіти Житомирського базового фармацевтичного фахового коледжу. Проведена діагностика рівня сформованості екологічної компетентності студентів коледжу та Поліського національного університету. Доведено, що питання екологічного стану навколишнього середовища є важливими для студентської молоді. Так, результатами опитування було встановлено, що занепокоєні екологічним станом навколишнього середовища 89,2% опитаних студентів Житомирського базового фармацевтичного фахового коледжу та 92,6% студентів Поліського національного університету.

Наведено приклади практичних завдань, які доцільно використовувати під час занять з хімічних дисциплін, що сприятимуть формуванню екологічної компетентності. Запропоновано залучати студентів до різних видів навчальної діяльності, впливати на їх уявлення про навколишнє середовище, формувати стратегії гармонійної взаємодії людини з природою, орієнтувати на розв'язання екологічних проблем, використовуючи знання з хімії. Окреслено питання та завдання, що формують наукову основу природоохоронної діяльності.

Важливу роль у формуванні екологічного світогляду має активна участь студентів у роботі наукових гуртків, студентському науковому товаристві, круглих столах, конференціях та змістовні екскурсії. *Ключові слова:* екологічна компетентність, довкілля, сталий розвиток, хімічні дисципліни, пошуково-дослідницька робота.

Use of chemical disciplines as an integration material for formation of environmental competence. Shlianina A., Dunaievskia O.

Issues of education in overcoming environmental problems of the present are highlighted. The importance of using a competent approach in the educational process is emphasized. It is proved that the content of the curriculum of chemical disciplines should be based on the interpretation of the basic concepts, laws and provisions of chemistry science, which can and should contribute to the preservation of the environment. It is stated that environmental education is effective and effective, provided that both educational and real environmental problems directly solve. It is emphasized that environmental competence as a basis for environmental thinking can be interpreted as the ability to see, formulate and solve the environmental problem in a particular life situation.

The experience of managing the search and research activities of the education of Zhytomyr Basic Pharmaceutical Facility College is presented. Diagnosis of the level of environmental competence of students of college and Polissya National University was diagnosed. It is proved that the environmental issues of the environment are important for student youth. Thus, the survey was found that 89.2% of Zhytomyr Basic Pharmaceutical Facility College students surveyed and 92.6% of Polissya National University students concerned with the environmental state of the environment.

Examples of practical tasks that should be used in chemical disciplines that will contribute to the formation of environmental competence are given. It is proposed to involve students in different types of learning activities, to influence their understanding of the environment, to form strategies for harmonious interaction of man with nature, to focus on solving environmental problems, using chemistry knowledge.

The questions and tasks that form the scientific basis of environmental activity are outlined. An important role in the formation of the ecological outlook is the active participation of students in the work of scientific circles, student scientific society, round tables, conferences and meaningful excursions. *Key words:* ecological skills, environment, sustainability, research.

Постановка проблеми. Екологічна освіта є інструментом соціалізації індивіда, його адаптації до життя в урбанізованому середовищі в умовах розвитку громадянського, інформаційного суспільства. Хімія як навчальна дисципліна повинна використати свій інтеграційний потенціал для вирішення питань взаємодії природи й суспільства, сформувати у студентів світоглядні позиції та переконання, які базувалися б на екологічній парадигмі. Екологічна підготовка майбутніх фахівців різних сфер діяльності є вагомим частиним системи виховання суспільства. Формування екологічної свідомості є важливою складовою у взаємодії людини, суспільства, природи і відбувається у поєднанні практично орієнтованого навчання [1].

Актуальність дослідження. Актуальність проблеми формування екологічної компетентності обумовлена загостренням екологічної ситуації в Україні, коли воєнна інтервенція росії руйнує всі сфери навколишнього середовища, екологічно небезпечні промислові об'єкти, використовує хімічну зброю та загрожує радіоактивним забрудненням [2]. Саме хімія як природничу науку інтегрується з гуманітарними й технічними дисциплінами при відборі змісту екологічної освіти; її роль у вирішенні екологічних проблем дедалі більше зростає [3, с. 46].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями полягає у представленні досвіду залучення студентів до різних видів навчальної діяльності, що формує стратегії гармонійної взаємодії людини з природою, орієнтує на розв'язання екологічних проблем, ґрунтуючись на знаннях з хімії та є частиною теми науково-дослідної роботи «Моніторингові дослідження біосфери Українського Полісся», затвердженої у Міністерстві освіти і науки України (державний реєстраційний номер 0124U000645).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Швидка індустріалізація та урбанізація стала однією з головних проблем сучасності, що викликає серйозне занепокоєння і спонукає до активізації екологічного виховання дітей, молоді, всього суспільства в цілому [4]. Науковці світу все частіше присвячують свої дослідження темі екологічної компетентності, що демонструє тенденцію посиленої уваги щодо збереження навколишнього середовища [5].

На основі праць вчених (Г. Білявський, С. Вітвицька, І. Єрмаков, В. Краєвський, М. Мусієнко, О. Овчарук, Н. Олійник, Д. Равен, С. Степаненко, В. Стрельников, Л. Титаренко, С. Толочко, А. Хуторської та ін.) екологічну компетентність можна визначити як інтегрований результат освітньої діяльності здобувачів освіти, який формується передусім завдяки опануванню змісту навчальних дисциплін екологічного спрямування.

Науковці майже однотайно констатують той факт, що екологічне мислення не сумісне з пасивною позицією щодо проблем навколишнього середо-

вища. Кожна людина, яка має екологічну свідомість і мислення, має відчувати свою причетність до того, що відбувається довкола неї, бути здатною приймати рішення, діяти, займати активну природоохоронну позицію.

Збалансований розвиток країн є ключовим принципом. Згідно з ним будь-яку політику країни слід розробляти так, щоб вона враховувала економічні, соціальні та екологічні аспекти [6, 7]. Заклади освіти повинні підтримувати включення стратегії сталого розвитку в освітній процес. Відповідальність та підзвітність мають вирішальне значення для вивчення принципів сталого розвитку в освіті [8]. Від характеру взаємодії з довкіллям на рівні індивіда та соціуму визначаються реальні способи впровадження концепції сталого розвитку, а тому оцінка сучасного стану екологічної освіти в Україні є важливою для суспільства [9, с. 19, 20; 10, с. 40].

Першим соціальним інститутом, в якому формуються екологічні компетентності особистості є сім'я, де значення екологічного виховання повинно бути пов'язане із моральною відповідальністю за майбутнє своєї родини, вулиці, міста, країни... Освіта як стратегічна основа розвитку особистості, суспільства, нації, держави є засобом відтворення і нарощування інтелектуального та духовного потенціалу народу [11, с. 8, 9].

При викладанні хімічних дисциплін є можливість для виконання перерахованих завдань. Основу методики формування екологічної компетентності студентів при цьому становлять системний, компетентнісний, особистісно-орієнтований і діяльнісний підходи до навчання [12]. Ефективність екологічної освіти та виховання залежить у значній мірі від рівня опанування екологічними знаннями та екологічної зрілості викладачів [13].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Концепція сталого розвитку України, яка в теперішній час знаходиться у воєнному стані, не є реалізованою; існує потреба в консолідації суспільства задля запобігання розповсюдження екологічної катастрофи в тих напрямках, де це можливо.

Новизна. У роботі на прикладі Житомирського базового фармацевтичного фахового коледжу (ЖБФФК) представлено досвід реалізації концепції сталого екологічного розвитку в освітній діяльності для зменшення або уникнення негативного впливу на довкілля.

Методологічне або загальнонаукове значення. Україна, як і значна частина міжнародної спільноти, працює над реалізацією стратегії сталого розвитку, що спрямована на пріоритети сьогодення та майбутнього – системне розв'язання глобальних проблем: екологічних, соціальних та економічних. Під час дослідження використано методи аналізу, узагальнення науково-методичної літератури, педагогічне спостереження, діагностичний авторський опиту-

вальник, синтезу, порівняння, статистичної обробки отриманих даних.

Викладення основного матеріалу. Шляніна А.В., як викладач хімічних дисциплін, бере участь у професійній підготовці здобувачів освіти спеціальностей 226 Фармація, промислова фармація та 224 Технології медичної діагностики та лікування. Для формування цілісної системи цінностей, екологічної свідомості хімія як освітній компонент допомагає забезпечити теоретичну та практичну підготовку студентів.

Формування екологічної компетентності здобувачів освіти на заняттях хімічних дисциплін розпочинається з розвитку в них відповідальності за дотримання правил безпечної роботи в лабораторіях цих дисциплін. В ЖБФФК функціонує сім лабораторій хімічних дисциплін: «Хімія», «Неорганічна хімія», «Органічна хімія», «Аналітична хімія», «Біологічна хімія», «Фізична та колоїдна хімія», «Фармацевтична хімія». Організацію роботи кожної лабораторії забезпечують нормативні документи – матеріали охорони праці та безпеки життєдіяльності учасників освітнього процесу.

Зі студентами обов'язково проводяться інструктажі (первинний, вторинний, цільовий) із правил користування хімічними реактивами (кристалічними, рідкими, леткими, концентрованими, прекурсорами), лабораторним посудом, нагрівальними та вимірювальними приладами. Економне використання хімічних реактивів, води, енергоносіїв, робота з леткими хімічними сполуками у витяжній шафі, утилізація відпрацьованих хімічних реактивів закладають основи екологічної культури та свідомості.

Під час занять з хімічних дисциплін здобувачі освіти знайомляться з переліком небезпечних факторів, вплив яких може призвести до погіршення стану здоров'я людини. Обговорення питань шкідливого впливу хімічних реагентів та продуктів хімічних реакцій на організм людини в лабораторії ми пов'язуємо з наслідками можливих та реальних порушень екологічної безпеки за впливу технологічних, виробничих процесів господарської діяльності людини. Розгляд питань надання першої допомоги при хімічних та термічних опіках, алергічних проявах на хімічні речовини, ураженні струмом, травмах закладають компетентності швидкого реагування у разі виникнення подібних станів, спричинених екологічними проблемами та наслідками воєнних дій.

Одним із важливих питань екологічної освіти, яке ми розглядаємо зі здобувачами, є усвідомлення професійної відповідальності майбутніх фахівців медичної та фармацевтичної галузі за правильну утилізацію лікарських засобів, медичних відходів, що мають різний рівень епідеміологічної та екологічної небезпеки залежно від їх складу та ступеня контамінації хімічними, біологічними та радіоактивними компонентами.

Результати опитування як методу дослідження. З метою вивчення рівня екологічної компетентності нами було здійснено анкетне опитування серед здобувачів освіти ЖБФФК та Поліського національного університету (ПНУ). В анкетуванні взяли участь 65 та 232 студентів відповідно.

За результатами опитування було встановлено, що занепокоєні екологічним станом навколишнього середовища 89,2% опитаних студентів ЖБФФК, не замислювалися над екологічними проблемами 7,7% респондентів; близько 3% опитаних студентів не хвилюють екологічні питання взагалі (рис. 1). У студентів ПНУ ці показники становлять 92,6%, 6,9% та 0,5% відповідно.

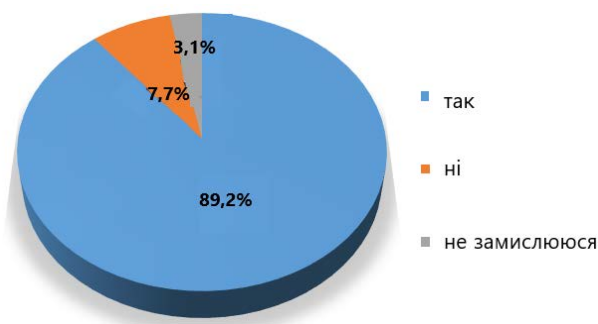


Рис. 1. Результати анкетування здобувачів освіти ЖБФФК (2023 рік)

Серед екологічних проблем, з якими стикаються здобувачі освіти, були вказані: забруднення водойм та повітря, накопичення сміття, вирубка дерев і лісів, спалювання сухоостою, неекономне використання води, енергоносіїв, деградація ґрунтів, зміна клімату та ін.

В Україні масове нерегульоване використання полімерних виробів довготривалого розкладу, і перш за все пакувальних виробів, загострює проблему забруднення навколишнього середовища та благоустрою територій, спричиняє загибель тварин. Майже 37% респондентів ЖБФФК найчастіше використовують паперові пакувальні матеріали, близько 32% – поліетиленові, 21,5% опитаних здобувачів надають перевагу тканинним пакувальним матеріалам, а 9,3% студентам байдуже з якого матеріалу виготовлені певні види пакувань (рис. 2). У студентів ПНУ дані розподілилися наступним чином: 27,3%; 51,3%; 10,2%; 11,2% відповідно.

Працюючи над формуванням екологічної компетентності студентів, окремо виділяємо проблему питної води, яка є дуже важливою. Щорічно близько 2,5 млрд людей у світі страждають від хвороб, спричинених нестачею води або її забрудненням. Як наслідок, значна частина населення використовує для питних потреб недоброякісну воду. Серед опитаних анкетуванням здобувачів ЖБФФК 58,5% вживають джерельну воду, 23,1% – бутильовану воду, 13,8% – воду з водогінної мережі і 4,6% респондентів

використовують колодязну воду (рис. 3). У студентів ПНУ переважає використання доочищеної артезіанської води – 71,7%, криничну воду використовують 62,9% за умови перебування за місцем реєстрації та відпочинку (переважно сільська місцевість), 17,8% – бутильовану вода, 10,4% – вода з водогінної мережі.

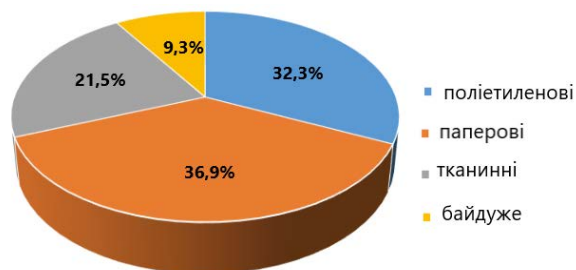


Рис. 2. Використання пакувальних матеріалів за видами

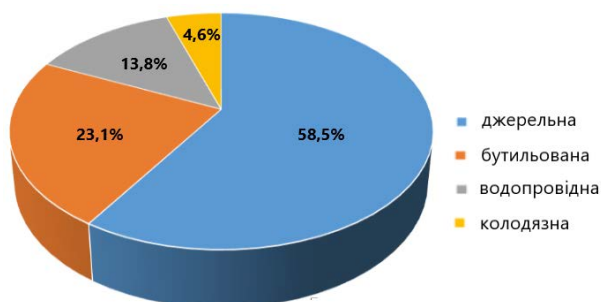


Рис. 3. Джерела використання питної води (2024 рік)

Акцентуємо увагу студентів на екологічну проблему спалювання сухого листя восени. При згорянні однієї тони рослинних залишків у повітря потрапляє близько 30 кг чадного газу – CO, 9 кг мікрочастинок диму (оксиди азоту, важкі метали, канцерогенні сполуки, один з яких – бензопірен, що здатний викликати онкологічні захворювання у людей). При згорянні поліетиленових виробів у повітря вивільняється до 70 різноманітних хімічних сполук, отруйних для людини.

Відповіді на запитання опитувальника «Що потрібно робити кожній людині для підтримання безпечного екологічного середовища?» дали можливість побачити стан сформованості свідомого та відповідального ставлення здобувачів освіти до природних ресурсів. Відповіді були наступні: «Не смітити», «Сортувати сміття», «Компостувати рослини, а не спалювати їх», «Використовувати паперові пакувальні матеріали, уникати поліетиленових», «Не палити», «Довго і важко працювати над собою, щоб змінити звички», «Використовувати електромобілі», «Не палити листя, пластик», «Не виливати в природне середовище хімічні речовини», «Не випускати в повітря повітряні кульки», «Це питання до великих підприємств», «Це майже не можливо».

Результати опитування свідчать про те, що у студентів була встановлена наявність суперечностей між порівняно високим рівнем обізнаності екологічних проблем та невиконанням ними ж правил щоденної природобезпечної діяльності. Певна частина студентів не усвідомлюють себе суб'єктами забруднення довкілля і відповідальність за стан навколишнього середовища покладають не на себе, а державу, промисловість, транспорт, контролюючі та виконавчі органи тощо; декого, на жаль, не хвилюють екологічні проблеми взагалі.

Формування практичних екологічних компетентностей. Студентам було запропоновано виконати проєкт «Екологічна проблема питної води», мета якого: з'ясувати роль чистої прісної води для всіх живих організмів, стан якості водних ресурсів в Україні та світі, шляхи розв'язання проблеми водопостачання питною водою та ін. Для обґрунтування своїх теоретичних пошуково-дослідницьких робіт студенти мали можливість виконати хімічний аналіз води (природної, підземної ґрунтової, водопровідної, джерельної, бутильованої, дистильованої) на вміст солей Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- та ін. Реакції ідентифікації на катіони та аніони неорганічних та органічних сполук здобувачі освіти вивчають і виконують в лабораторних умовах на заняттях з неорганічної хімії, органічної хімії, аналітичної хімії. Для покращення властивостей питної води студенти мають можливість використати оптимальні способи її очищення в лабораторних та домашніх умовах.

Під час навчальної практики з аналітичної хімії «Метод комплексонометрії» здобувачі освіти мають можливість і бажання виконати хімічний аналіз води, яку вони споживають та використовують у побуті. Встановлений у деяких зразках високий показник твердості води (більше 12,0 ммоль/дм³) був підтверджений здобувачами як наслідок наявних хвороб (камені в нирках, гіпертензія, набряки) серед членів їх родини, які споживають її.

Ідеї виконання різних дослідницьких робіт виникають з ініціативи самих здобувачів, якщо обговорення екологічних питань торкається життєвих потреб їх особисто. Так, було проведено експеримент на встановлення у джерельній воді вмісту солей Кальцію та Магнію, одну частину зразка якої заморозили, іншу прокип'ятили, третю залишили для контрольного порівняння. Результати корелювали з інтенсивністю утворення накипу на посуді.

Під час лабораторних занять з хімічних дисциплін студенти мали можливість практично перевірити деякі факти, описані в науковій літературі, відтворити в лабораторних умовах явища, що спостерігаються у природному середовищі в результаті інтенсивної та безгосподарної діяльності людини. Так, при вивченні теми «Кисень» розглядаються питання, що пов'язані з роллю кисню та озону для життя на Землі. На прикладі колообігу Оксигену

в природі продемонстрували взаємозв'язок проблем охорони довкілля й науково-технічного прогресу. В змісті навчальної програми з хімії є питання «Проблема чистого повітря», для розгляду якого студенти виконують пошуково-дослідницькі роботи, проекти, мета яких – розкрити значення певного вмісту кисню та озону для забезпечення здорової життєдіяльності людства.

При вивченні теми «Оксигеновмісні сполуки Сульфуру» досліджено вплив Сульфур (IV) оксиду на рослинні організми й екологічну систему в цілому з виконанням хімічного експерименту, що імітує процес утворення кислотних дощів, які виникають через забруднення атмосфери оксидами Сульфуру, Нітрогену та іншими сполуками. Для цього були виготовлені моделі екологічної системи, на яку впливав розчин концентрованої сульфатної кислоти. За результатами досліджень був зроблений висновок про згубний вплив SO_2 на організми, можливі наслідки порушення природної рівноваги в місцях, де концентрація SO_2 в атмосфері перевищує допустимі норми.

Курс органічної хімії містить достатньо питань для формування екологічної компетентності студентів: вплив на живі організми нафти, нафтопродуктів, синтетичних мийних засобів, спиртів, фенолів як забруднювачів природного середовища. Для простого дослідження негативного впливу нафти на фізіологічні процеси, порушення роботи ферментативного апарату використовували три ємності з водою й водними рослинами. В одну ємність додали невелику кількість нафти, у другу – бензин, третю залишили як контрольний зразок. Через тиждень у воді з добавками змінився колір, прозорість, з'явився запах, відбулась загибель рослин.

При розгляді питання «Природні джерела органічних речовин» акцентується увага студентів на дбайливе ставлення до природних джерел органічних речовин. Наприклад, деревина, головною складовою якої є целюлоза, є одним із найдавніших видів палива. Альтернативним джерелом цінних продуктів (глюкози, етанолу та ін.) можуть бути деревні відходи, солома, лушпиння, відходи бавовняної промисловості, торф, пелет. Наголошено про можливість вторинної переробки сировини, адже існують технології, якими виробляють папір із пластмаси, до складу якої входять поліетилен, поліпропілен, полівінілхлорид та інші полімери.

Обговорюючи зі студентами проблему утилізації полімерів і пластмас ми зосереджуємо увагу на те, що такі матеріали як пластмаси, синтетичні волокна, каучуки, гума, що виготовлені на основі природних або синтетичних високомолекулярних сполук – полімерів шкідливо впливають на людей та екологію всього світу. Одна з умов стійкого екологічного розвитку – створення нових матеріалів на основі біосировини. Завдяки цьому напрямку традиційні матеріали отримують нові унікальні властивості.

Пластичні маси на основі природних полімерів, що біорозкладаються, зменшують несприятливий техногенний вплив на навколишнє середовище. Їх виготовляють, модифікуючи макромолекули крохмалю, целюлози, а також хітозану [14].

Практичною частиною формування екологічної компетентності студентів є участь їх у роботі студентського наукового товариства коледжу, де вони розв'язують проблемні ситуаційні задачі екологічного змісту, наприклад, оцінка стану екосистеми при потраплянні певних доз хімічних речовин або лікарських засобів у навколишнє середовище.

Трагічні події аварії на Чорнобильській АЕС та її екологічні наслідки обговорюються зі студентами під час занять при вивченні тем та питань: «Будова атома», «Ядерні реакції», «Радіоактивність» та ін., а також в позааудиторний час. Так, у квітні 2021 року відбулася II Всеукраїнська студентська науково-практична конференція: «У світі хімії: до 35 річниці аварії на ЧАЕС», організатором проведення якої була циклова комісія хімічних дисциплін ЖБФФК. У роботі конференції взяли участь 30 навчальних закладів із 21 міста України. Всі напрями роботи конференції торкалися проблеми наслідків трагедії в Чорнобилі. Статті студентів, що увійшли до збірника матеріалів конференції мали науково обґрунтований зміст («Небезпечні наслідки радіоактивного забруднення», «Атомна катастрофа та життєдіяльність людини як фактори зміни біоти Чорнобиля», «Рак як наслідок чорнобильської катастрофи», «Наслідки впливу радіоактивного йоду на щитоподібну залозу», «Екологічна чорнобильська катастрофа: медико-біологічний аспект», «Радіація до і після катастрофи», «Забруднення ґрунтів радіоактивними ізотопами внаслідок аварії на ЧАЕС» та ін.).

Повномасштабна війна в Україні відповідає визначенню екоциду. Активні запуски ракет і винищувачів, бомбардування та обстріли, вибухи та пожежі, горіння нафтопродуктів сприяє виділенню канцерогенів, утворенню смогу, речовин, що можуть викликати рак, мають задушливу дію та провокують кислотні дощі. Еколого-епідемічні наслідки стали неконтрольованими і запустили механізми для епідемії. Ці трагічні виклики дають поштовх до обговорення нових питань під час вивчення хімічних дисциплін, а також для нових тем пошуково-дослідницьких робіт студентів. Наукова робота студентів у наукових гуртках та студентському науковому товаристві сприяє формуванню екологічної свідомості [15, 16].

З ініціативи студентської ради ЖБФФК за круглим столом проводяться зібрання студентів для висвітлення та обговорення екологічних проблем. До Всесвітнього дня йододефіцитного захворювання як найбільш поширеного у всьому світі синдромного ураження неінфекційного характеру та до Міжнародного дня відмови від тютюнопаління відбулися презентації постерних доповідей студентів. Знання з хімії про йод як мікроелемент, склад

токсичних речовин, що потрапляють у довкілля та організм людини при тютюнопалінні допомагають краще розуміти сутність проблеми та запобігти їй.

Наочна демонстрація виконання студентами пошуково-дослідницьких робіт на теми: «Сучасні природоохоронні заходи», «Аналіз якості питної води», «Екологічна проблема утилізації відходів» «Компенсація йододефіциту в Україні» та ін. відтворена студентами в ілюстративних альбомах, використання яких під час занять хімії допомагає виконувати освітні завдання.

Знайомство здобувачів з роботою Житомирської екологічної інспекції, що забезпечує охорону навколишнього природного середовища, раціональне використання, відтворення і охорону природних ресурсів, дотримання вимог природоохоронного законодавства доповнює зміст освіти про проблеми довкілля. Під час екскурсії до інспекції студенти практично спостерігають за виконанням лабораторних аналізів, процесом визначення критеріїв ризику – ймовірності виникнення негативних наслідків від провадження господарської діяльності. Здобувачі при цьому оцінюють важливість діяльності органів державного нагляду, що здійснюють контроль суб'єктів господарювання та забезпечують захист безпечного життя.

Сучасний прогрес збільшує коло питань і проблем, які впливають на якість життя кожної людини. При формуванні екологічної компетентності важливим є мотиваційний компонент, що формується

на основі ціннісного ставлення до природи, виробленні потреб у розумінні основних заходів щодо збереження біорізноманіття на землі. Важливою складовою свідомості сучасної молоді має стати формування екологічної компетентності та безпосередньої причетності до проблем найближчого до них довкілля. В іншому випадку суперечності екологічної освіти можуть залишатися нездоланими.

Головні висновки. Хімічні дисципліни є своєрідною освітньою платформою для набуття студентами екологічної компетентності, досвіду застосування хімічних знань у різних сферах життєдіяльності, усвідомлення особистісного внеску в забруднення або збереження довкілля. Перспективу подальших наукових досліджень вбачаємо у пошуку новітніх підходів щодо змісту, форм, методів екологічної освіти та виховання в контексті побудови ефективної моделі формування екологічної компетентності студентів засобами освітніх компонентів, зокрема хімічних. Переважна більшість студентів знають про екологічні проблеми та основні шляхи їх усунення.

Перспективи використання результатів дослідження. Використаний досвід розвитку екологічної компетентності сприяє активізації пошуково-дослідницької діяльності здобувачів, формує наукову основу природоохоронної діяльності. Освіта створює передумови для формування еліти, здатної реалізувати всі можливі потужні можливості на користь своєму народу, що особливо важливо для розбудови нашої країни у післявоєнний період.

Література

1. Волошок О. Екологічна свідомість студентської молоді та шляхи її формування. *Вісник Львівського університету. Серія психологічні науки*. 2020. Вип. 6. С. 32-37.
2. Дунаєвська О.Ф., Сокульський І.М., Мельник Н.В., Піціль А.О Екологічні проблеми сільського господарства в умовах воєнного стану. *Екологічні науки*. 2024. № 1 (52). С. 22-27. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.3>
3. Бербец Т. Роль екологічної освіти у формуванні особистості підлітка в процесі технологічної підготовки. *SWorldJournal*. 2022. № 3 (13-03). С. 43-48. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2022-13-03-044>
4. Ali H., Khan E. Environmental chemistry in the twenty-first century. *Environ Chem Lett*. 2017. Vol. 15, pp. 329-346. DOI: 10.1007/s10311-016-0601-3.
5. Nicole M. Ardoin, Alison W. Bowers, Noelle Wyman Roth & Nicole Holthuis. Environmental education and K-12 student outcomes: A review and analysis of research, *The Journal of Environmental Education*. 2018. № 49 (1). pp. 1-17, DOI: 10.1080/00958964.2017.1366155.
6. Blasco N., Brusca I., Labrador M. Assessing sustainability and its performance implications: an empirical analysis in Spanish public universities. *Sustainability* (Switzerland). 2019. Vol. 11, № 19. pp. 5302-5321. DOI: [10.3390/su11195302](https://doi.org/10.3390/su11195302).
7. Lozano R. Barreiro-Gen M. Analysing the factors affecting the incorporation of sustainable development into European higher education institutions curricula. *Sustainable Development*. 2019. Vol. 27, № 5. pp. 965-975. DOI: 10.1002/sd.1987
8. Macheridis N., Paulsson A. Greening higher education? From responsabilization to accountabilization in the incorporation of sustainability in higher education. *International Journal of Sustainability in Higher Education*. 2021. Vol. 22, № 8. pp. 208-222. DOI: 10.1108/IJSHE-09-2020-0338.
9. Борщук С. Освіта, як інструмент забезпечення сталого розвитку соціально-економічних систем. *Collection of Scientific Papers «ЛОГОС»*. Cambridge, United Kingdom). 2022. P. 19-20. DOI: <https://doi.org/10.36074/logos-20.05.2022.003>
10. Сафранов Т. Вища екологічна освіта України: становлення і сучасний стан. *Освітнологічний дискурс*. Київ: Київський університет ім. Б. Грінченка. 2021. Вип.1 (32). С. 39-51. DOI: 10.28925/2312-5829.2021.1.3.
11. Юрченко Л.І., Гонтаренко Л.О. Соціально-екологічне виховання в сім'ї як початок формування засад екологічної компетентності сучасної особистості. *Scientific Journal of Khortytsia National Academy*. 2022. С. 7-16. DOI: <https://doi.org/10.51706/2707-3076-2022-7-1>
12. Швец О. Г., Осьмук Н. Г., Ліцман Ю. В. Формування екологічної компетентності фахівця XXI століття в процесі вивчення хімії. *Science and Education a New Dimension. Pedagogy and Psychology*. Budapest, 2019. VII (86). С. 49-52. DOI: 10.31174/SEND-PP2019-209VII86-11.

13. Alvarez-García O., Sureda-Negre J., Comas-Forgas R. Assessing environmental competencies of primary education pre-service teachers in Spain: A comparative study between two universities. *International Journal of Sustainability in Higher Education*. 2018. Vol. 19, № 1. pp. 15-31. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJSHE-12-2016-0227>
14. Крайняк О. В. Роль хімії та суспільства в розв'язанні глобальних екологічних проблем. *Хімія*. 2013. № 20. С. 13-15.
15. Студентські наукові гуртки як активна складова формування фахових компетентностей здобувачів освіти. Дунаєвська О.Ф., Луцак І.В., Умінська К.А., Зубрицька Л.О., Довженко Л.В. та ін. *Перспективи та інновації науки (Серія «Педагогіка»)*. 2023. № 4 (22). С. 71-84. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2023-4\(22\)-71-84](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2023-4(22)-71-84)
16. Дунаєвська О.Ф., Луцак І.В., Умінська К.А., Шляніна А.В., Сокульський І.М. Студентське наукове товариство як складова формування наукового світогляду та реалізації науково-дослідного потенціалу здобувачів освіти. *Вісник науки та освіти*. 2023. № 2 (8). С. 383-396. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2023-2\(8\)-383-396](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2023-2(8)-383-396)

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Алпатова Оксана Миколаївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Бабенко Михайло Григорович (Дніпро) – кандидат сільськогосподарських наук, провідний науковий співробітник, Дніпровський державний аграрно-економічний університет;

Березняк Олександр Олександрович (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Бессонова Валентина Петрівна (Дніпро) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри садово-паркового мистецтва та ландшафтного дизайну, Дніпровський державний аграрно-економічний університет;

Бондар Олександр Іванович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, член-кореспондент Національної академії аграрних наук України, заслужений діяч науки і техніки України, ректор, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління;

Бутенко Елеонора Олегівна (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри хімічної технології та інженерії, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»;

Буяльська Наталія Павлівна (Чернігів) – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології, Національний університет «Чернігівська політехніка»;

Валерко Руслана Анатоліївна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Василишин Юрій Богданович (Київ) – студент II курсу магістратури, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» імені Ігоря Сікорського;

Вергеліс Вікторія Ігорівна (Вінниця) – асистент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Вінницький національний аграрний університет;

Висоцька Тетяна Іванівна (Київ) – кандидат хімічних наук, доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Київський інститут залізничного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій МОН України;

Вишневський Анатолій Васильович (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри лісівництва, лісових культур і таксації лісу, декан факультету лісового господарства та екології, Поліський національний університет;

Власенко Олег Васильович (Київ) – аспірант кафедри екологічного аудиту та технологій захисту довкілля, науковий співробітник проблемної науково-дослідної лабораторії прикладної екології, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління;

Вовкунович Михайло Олексійович (Ужгород) – аспірант кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет»;

Волошин В'ячеслав Степанович (Дніпро) – доктор технічних наук, професор кафедри охорони праці і навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»;

Воробйов Богдан Віталійович (Харків) – доктор філософії, завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Гавриленко Ксенія В'ячеславівна (Запоріжжя) – старший викладач кафедри медбіології, паразитології та генетики, Запорізький державний медико-фармацевтичний університет;

Гадаєва Юлія Сергіївна (Харків) – аспірантка кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Гайдучек Олександр Григорович (Харків) – кандидат технічних наук, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Герасимчук Людмила Олександрівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Гойванович Наталія Костянтинівна (Дрогобич) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри біології та хімії, Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка;

Горбенко Наталія Євгенівна (Львів) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри ботаніки, деревинознавства та недревних ресурсів лісу, Національний лісотехнічний університет України;

Гуліна Оксана Сергіївна (Запоріжжя) – асистент кафедри мікробіології, вірусології та імунології, Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, аспірант біологічного факультету, Запорізький національний університет;

Гулько Світлана Олександрівна (Дніпро) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри геоботаніки, ґрунтознавства та екології, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара;

Денисов Данііл Юрійович (Чернігів) – студент II курсу, Навчально-науковий інститут електронних та інформаційних технологій Національного університету «Чернігівська політехніка»;

Денисова Наталя Миколаївна (Чернігів) – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та екології, Національний університет «Чернігівська політехніка»;

Долженкова Олена Вікторівна (Дніпро) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри безпеки життєдіяльності, Дніпровський державний університет імені Олеся Гончара;

Дунаєвська Оксана Феліксівна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор кафедри екології, Поліський національний університет;

Житова Олена Петрівна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри лісівництва, лісових культур та таксації лісу, Поліський національний університет;

Заїменко Наталія Василівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, член-кореспондент Національної академії наук України, директор, Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України;

Золотовська Олена Володимирівна (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент кафедри тракторів і сільськогосподарських машин, Дніпровський державний аграрно-економічний університет;

Іваненко Ігор Борисович (Київ) – кандидат хімічних наук, проректор, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління;

Івашкіна Оксана Леонідівна (Житомир) – асистент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Іващенко Ірина Вікторівна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри здоров'я фітоценозів і трофології, Поліський національний університет;

Іщук Оксана Василівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри біоресурсів, аквакультури та природничих наук, Поліський національний університет;

Кагукіна Анастасія Максимівна (Житомир) – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, асистент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Кануннікова Надія Олександрівна (Харків) – доктор філософії, старший науковий співробітник кафедри мікро- та наноелектроніки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Кірсанова Валентина Василівна (Ізмаїл) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри управління в транспортній галузі, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»;

Клочанюк Вікторія Василівна (Київ) – аспірантка, Інститут агроекології і природокористування Національної академії аграрних наук України;

Ковтунов Олександр Володимирович (Київ) – аспірант кафедри екологічного аудиту та технологій захисту довкілля, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління; заступник голови, Дарницька районна в місті Києві державна адміністрація;

Котюк Віктор Сергійович (Житомир) – магістр спеціальності 101 Екологія, Поліський національний університет;

Котюк Людмила Анатоліївна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри екології, Поліський національний університет;

Краснолуцький Олександр Васильович (Київ) – Перший заступник Міністра захисту довкілля та природних ресурсів України;

Крисінська Діана Олександрівна (Миколаїв) – кандидат технічних наук, доцент (б.в.з.) кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили;

Ларьков Сергій Миколайович (Київ) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри космічної інженерії, Інститут аерокосмічних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Левон Володимир Федорович (Київ) – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник відділу акліматизації плодових рослин, Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України;

Левчик Наталія Яківна (Київ) – кандидат біологічних наук, науковий співробітник, Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України;

Лемєга Надія Михайлівна (Львів) – кандидат географічних наук, асистент кафедри туризму, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Бабенко Михайло Григорович (Покров) – кандидат сільськогосподарських наук, провідний науковий співробітник, Дніпровський державний аграрно-економічний університет;

Берія Віталій Джонійович (Київ) – здобувач, Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини»;

Біланюк Володимир Іванович (Львів) – кандидат географічних наук, доцент, декан географічного факультету, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Боголюбов Володимир Миколайович (Київ) – доктор педагогічних наук, професор кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Божко Тетяна Василівна (Харків) – науковий співробітник, Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», начальник, Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області;

Бондар Катерина Олександрівна (Київ) – аспірантка кафедри екології, Український державний університет імені Михайла Драгоманова;

Бондар Олександр Іванович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, член-кореспондент Національної академії аграрних наук України, ректор, Державна екологічна академія;

Бондарчук Василь Миколайович (Житомир) – старший викладач кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації імені професора Б.Б. Самотокіна, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Бондарь Валерія Іванівна (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Бредун Віктор Іванович (Полтава) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри прикладної екології та природокористування, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Бургаз Олексій Анатолійович (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент, завідувач кафедри екологічного права і контролю, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Валерко Руслана Анатоліївна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Василенко Ольга Миколаївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та географії, Житомирський державний університет імені Івана Франка;

Васильєва Людмила Анатоліївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент (б.в.з.) кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Васютинська Катерина Анатоліївна (Одеса) – кандидат хімічних наук, доцент, завідувачка кафедри екологічної безпеки і гідравліки, Національний університет «Одеська політехніка»;

Внукова Наталія Володимирівна (Харків) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології, Харківський національний автомобільно-дорожній університет;

Войналович Ірина Миколаївна (Житомир) – асистент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Войціцький Володимир Михайлович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Волошин В'ячеслав Степанович (Дніпро) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри охорони праці та навколишнього середовища, Приазовський державний технічний університет;

Волошин Олексій Григорович (Чернігів) – аспірант кафедри екології, географії та природокористування, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка;

Волошина Наталія Олексіївна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри екології, Український державний університет імені Михайла Драгоманова;

Вольчин Ігор Альбінович (Київ) – доктор технічних наук, професор, заступник директора інституту з наукової роботи, Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України;

Гай Анжела Євгенівна (Київ) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри екології, Національний авіаційний університет;

Гандзюра Володимир Петрович (Київ) – доктор біологічних наук, професор кафедри екології та зоології, Навчально-науковий центр «Інститут біології та медицини»;

Гарабазій Тетяна Анатоліївна (Одеса) – старший викладач кафедри екологічного права і контролю, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Герасимчук Людмила Олександрівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Герасимчук Олена Леонтіївна (Житомир) – кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Головань Лариса Володимирівна (Харків) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, завідувачка кафедри екології та біотехнологій в рослинництві, Державний біотехнологічний університет;

Горбачова Олена Сергіївна (Київ) – аспірант кафедри екології, Національний авіаційний університет;

Д'яченко Наталя Олександрівна (Київ) – кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри екологічної безпеки, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління;

Давибіда Лідія Іванівна (Івано-Франківськ) – кандидат геологічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

Демидов Олександр Анатолійович (Центральне) – доктор сільськогосподарських наук, професор, академік Національної академії аграрних наук України, директор, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України;

Джумеля Ельвіра Анатоліївна (Львів) – доктор філософії, асистент кафедри програмного забезпечення, Інститут комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»;

Довбиш Олена Борисівна (Київ) – науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Дунаєвська Оксана Феліксівна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор кафедри екології, Поліський національний університет;

Євтушенко Ольга Володимирівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики та професійної безпеки, Національний університет харчових технологій;

Жук Аліна Володимирівна (Чернівці) – кандидат біологічних наук, докторант, доцент кафедри екології та біомоніторингу, Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Іванов Євген Анатолійович (Львів) – доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Ігнатюк Роман Мирославович (Житомир) – аспірант, асистент кафедри гірничих технологій та будівництва імені професора Бакка М.Т., Державний університет «Житомирська політехніка»;

Ілляш Оксана Едуардівна (Полтава) – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри прикладної екології та природокористування, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Кізілова Наталія Миколаївна (Харків) – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри прикладної математики, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна;

Кірейцева Ганна Вікторівна (Житомир) – кандидат економічних наук, доцент, докторант, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Клепко Алла Володимирівна (Київ) – доктор біологічних наук, завідувачка кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Клімкіна Ірина Іванівна (Дніпро) – кандидат біологічних наук, провідний науковий співробітник, Дніпровський державний аграрно-економічний університет;

Коваленко Юлія Олександрівна (Київ) – доктор філософії, молодший науковий співробітник відділу іхтіології та гідробіології річкових систем, Інститут гідробіології Національної академії аграрних наук України;

Козуля Тетяна Володимирівна (Харків) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, Навчально-науковий інститут механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Коляда Ольга Василівна (Харків) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та біотехнологій в рослинництві, Державний біотехнологічний університет;

Корнієнко Валентина Іванівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, директор Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Кривошеєв Сергій Іванович (Київ) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут теплоенергетичних технологій Національної академії наук України;

Куришук Андрій Дмитрович (Чернівці) – незалежний дослідник, ГО ТГЗБ «Терра»;

Легета Уляна Володимирівна (Чернівці) – кандидат біологічних наук, докторант, доцент кафедри екології та біомоніторингу, Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Лемєга Надія Михайлівна (Львів) – кандидат географічних наук, асистент кафедри туризму, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Лопушанська Марія Романівна (Львів) – аспірантка кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка, еколог ТОВ «Нордік-Буд», голова комітету оцінки впливу на довкілля та стратегічної екологічної оцінки Асоціації професіоналів довкілля «РАЕВ»;

Магась Наталія Іванівна (Миколаїв) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова;

Максюта Наталія Сергіївна (Полтава) – доктор філософії, старший викладач кафедри прикладної екології та природокористування, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Мартинова Надія Валентинівна (Дніпро) – кандидат біологічних наук, завідувач лабораторії природної флори, Ботанічний сад Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара;

Мартюхін Антон Володимирович (Київ) – аспірант кафедри екології, Український державний університет імені Михайла Драгоманова;

Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Михайло Якович Ігнатенко (Харків) – аспірант, провідний інженер, Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем», хімік 1 категорії, Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області;

Мідик Світлана Вікторівна (Київ) – кандидат ветеринарних наук, старший дослідник, завідувач науково-дослідного відділу моніторингу безпеки продукції агропромислового комплексу Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Москалик Галина Георгіївна (Чернівці) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та біомоніторингу, Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Москалик Ігор Миколайович (Чернівці) – аспірант екології та біомоніторингу, Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Овдіюк Олена Миколаївна (Житомир) – кандидат економічних наук, доцент кафедри екології та географії, Житомирський державний університет імені Івана Франка;

Онищук Ірина Петрівна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та географії, Житомирський державний університет імені Івана Франка;

Павлюх Леся Іванівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри екології, Національний авіаційний університет;

Паславський Михайло Михайлович (Львів) – кандидат технічних наук, асистент кафедри комп'ютерних наук, Національний лісотехнічний університет України;

Пацева Ірина Григорівна (Житомир) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Петруша Юлія Юрївна (Запоріжжя) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технології, Національний університет «Запорізька політехніка»;

Пикало Сергій Володимирович (Центральне) – кандидат біологічних наук, провідний науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України;

Пилипович Ольга Василівна (Львів) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Поліщук Михайло Миколайович (Київ) – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Причепя Микола Володимирович (Київ) – кандидат біологічних наук, науковий співробітник відділу іхтіології та гідробіології річкових систем, Інститут гідробіології Національної академії аграрних наук України;

Пушкарьова Єлизавета Русланівна (Запоріжжя) – випускниця спеціальності 132 «Матеріалознавство», Національний університет «Запорізька політехніка»;

Ревуцька Наталія Віталіївна (Львів) – кандидат економічних наук, доцент, провідний фахівець, ПрАТ «Львівобленерго», координаторка, ГО «Жіночий енергетичний клуб України»;

Риженко Наталія Олександрівна (Київ) – доктор біологічних наук, завідувачка кафедри екології та екологічного контролю, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління;

Ричак Наталія Львівна (Харків) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та менеджменту довкілля, Навчально-науковий інститут екології Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна;

Ролік Олександр Іванович (Київ) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем та технологій, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Руда Марія Віталіївна (Львів) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності, Національний університет «Львівська політехніка»;

Сакун Антоніна Олегівна (Харків) – доктор філософії (PhD), доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Навчально-науковий інститут механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Сапронов Роман Сергійович (Житомир) – здобувач, Житомирський державний університет імені Івана Франка;

Серга Тетяна Миколаївна (Полтава) – асистент кафедри прикладної екології та природокористування, аспірантка, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Ситнікова Ірина Олександрівна (Чернівці) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та біомоніторингу, Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Сірик Аліна Олегівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики та професійної безпеки, Національний університет харчових технологій;

Скиба Галина Віталіївна (Житомир) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Соколов Армен Валерійович (Київ) – аспірант кафедри екологічної безпеки, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління;

Сорочинська Олена Леонідівна (Київ) – кандидат історичних наук, доцент, в. о. завідувача кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Державний університет інфраструктури та технологій;

Сохрякова Ірина Миколаївна (Запоріжжя) – завідувач навчальної лабораторії хімічних методів дослідження, Національний університет «Запорізька політехніка»;

Сталінська Ірина Вікторівна (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Сургай Людмила Леонідівна (Харків) – студентка II курсу магістратури факультету біотехнологій, Державний біотехнологічний університет;

Суслова Олена Петрівна (Кривий Ріг) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу інтродукції та акліматизації рослин, Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України;

Тимошук Марина Олександрівна (Одеса) – старший викладач кафедри екологічного права і контролю, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Улицький Олег Андрійович (Київ) – доктор геологічних наук, професор, директор, Навчально-науковий інститут екобезпеки та управління Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління;

Федоряк Марія Михайлівна (Чернівці) – доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри екології та біомоніторингу, Навчально-науковий інститут біології, хімії та біоресурсів Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;

Хандогіна Ольга Вадимівна (Харків) – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Харитонов Микола Миколайович (Дніпро) – доктор сільськогосподарських наук, професор, головний науковий співробітник, Дніпровський державний аграрно-економічний університет;

Харченко Михайло Володимирович (Центральне) – кандидат сільськогосподарських наук, науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України;

Хижняк Світлана Володимирівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Хом'як Іван Владиславович (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та географії, Житомирський державний університет імені Івана Франка;

Хоменко Світлана Володимирівна (Житомир) – аспірант, асистент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Циганенко-Дзюбенко Ілля Юрійович (Житомир) – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, асистент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Циганок Людмила Василівна (Львів) – президентка, Асоціація професіоналів довкілля «РАЕВ»;

Чепурко Юлія Володимирівна (Базилівщина) – інженер з екологічної та радіаційної безпеки, Філія дочірньої компанії Укргазвидобування Національної Акціонерної Компанії «Нафтогаз України» Управління з переробки газу та газового конденсату;

Черлінка Василь Романович (Кошице, Словаччина) – доктор біологічних наук, доцент, дослідник, Інститут географії Університету Павла Йозефа Шафарика, ґрунтознавець, EOS Data Analytics;

Черлінка Любов Василівна (Чернівці) – незалежний дослідник, ГО ТГЗБ «Терра»;

Четвериков Володимир Валентинович (Київ) – кандидат технічних наук, завідувач лабораторії поводження із небезпечними речовинами та відходами, Інститут газу Національної академії наук України;

Чуприна Юлія Юрївна (Харків) – доктор PhD з екології, старший викладач кафедри екології та біотехнологій в рослинництві, Державний біотехнологічний університет;

Шамрай Володимир Ігорович (Житомир) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих технологій та будівництва імені професора Бакка М.Т., Державний університет «Житомирська політехніка»;

Шевченко Роман Юрійович (Київ) – кандидат географічних наук, доцент кафедри заповідної справи та рекреаційної діяльності, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління;

Шевчук Лариса Миколаївна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Шибанова Алла Миколаївна (Львів) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності, Національний університет «Львівська політехніка»;

Шляніна Алла Володимирівна (Житомир) – викладач-методист, викладач вищої кваліфікаційної категорії, циклова комісія хімічних дисциплін, Житомирський базовий фармацевтичний фаховий коледж;

Юрченко Тетяна Василівна (Центральне) – кандидат сільськогосподарських наук, завідувачка відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України;

Якименко Ганна Миколаївна (Київ) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології, Національний авіаційний університет.

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

4(55)

- **Загальні питання екологічної безпеки**
- **Екологічний моніторинг**
- **Екологія агровиробництва**
- **Екологія водних ресурсів**
- **Екологія земельних ресурсів**
- **Екологія і виробництво**
- **Екологічні наслідки воєнних дій**
- **Інноваційні технології у сфері захисту довкілля**
- **Збереження біологічного і ландшафтного різноманіття**
- **Управління відходами**
- **Питання сталого розвитку**
- **Теоретична екологія**
- **Екологічна освіта**

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 11.10.2024. Формат 64x84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 29,76. Тираж 100. Замовлення № 1124/757.
Ціна договірна. Віддруковано з готового оригінал-макета