

Волинський національний університет
імені Лесі Українки

ПРОБЛЕМИ ХІМІЇ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Випуск 3



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Марушко Лариса Петрівна – доктор педагогічних наук, доцент, декан факультету хімії та екології Волинського національного університету імені Лесі Українки (головний редактор);

Анічкіна Олена Василівна – кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри хімії Житомирського державного університету імені Івана Франка;

Бедункова Ольга Олександрівна – доктор біологічних наук (03.00.16 – Екологія), доцент, професор кафедри екології, технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства Національного університету водного господарства та природокористування;

Боярин Марія Володимирівна – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Гулай Любомир Дмитрович – доктор хімічних наук, професор, завідувач кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Гулай Ольга Іванівна – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри цифрових освітніх технологій та кафедри харчових технологій та хімії Луцького національного технічного університету;

Казакова Наталія Вікторівна – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри педагогіки Хмельницької гуманітарно-педагогічної академії;

Калаур Світлана Миколаївна – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри соціальної роботи та менеджменту соціокультурної діяльності, керівник Центру післядипломної освіти Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка;

Караїм Ольга Анатоліївна – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Клименко Олександр Миколайович – доктор сільськогосподарських наук (03.00.16 – Екологія), професор, професор кафедри екології, технології захисту навколишнього середовища та лісового господарства Національного університету водного господарства та природокористування;

Когут Юрій Миколайович – кандидат хімічних наук, старший викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Лукашук Микола Миколайович – кандидат педагогічних наук, викладач з предметів хімія і біологія Комунального закладу вищої освіти «Рівненська медична академія» Рівненської обласної ради;

Марчук Олег Васильович – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Піскач Людмила Василівна – кандидат хімічних наук, професор, професор кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Романишина Оксана Ярославівна – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри інформатики та методики навчання Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка;

Романюк Ярослав Євгенійович – PhD, керівник наукової групи Швейцарської федеральної лабораторії матеріалознавства і технологій (ЕМРА) (Швейцарія);

Савицька Вікторія Василівна – кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри освітології і педагогіки Західноукраїнського національного університету

Салісва Леся Миколаївна – кандидат хімічних наук, доцент кафедри органічної та фармацевтичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Сливка Наталія Юрївна – доктор хімічних наук, доцент, завідувач кафедри органічної та фармацевтичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Смітюх Олександр Вікторович – кандидат хімічних наук, старший викладач кафедри неорганічної та фізичної хімії Волинського національного університету імені Лесі Українки;

Сонько Сергій Петрович – доктор географічних наук (08.00.06 – Економіка природо-користування та охорони навколишнього середовища), професор, завідувач кафедри екології та безпеки життєдіяльності Уманського національного університету садівництва.

Стучинська Наталія Василівна – доктор педагогічних наук, кандидат фізико-математичних наук, професор, професор кафедри медичної і біологічної фізики та інформатики Національного медичного університету ім. О.О. Богомольця.

Тюріна Валентина Олександрівна – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри соціології та психології Харківського національного університету внутрішніх справ.

Журнал ухвалено до друку Вченою радою
Волинського національного університету імені Лесі Українки
26 червня 2025 р., протокол № 8

Науковий журнал «Проблеми хімії та сталого розвитку» зареєстровано Національною радою України
з питань телебачення і радіомовлення (Рішення № 1834 від 21.12.2023 року. Ідентифікатор медіа: R30-02341)

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Волинський національний університет імені Лесі Українки
(просп. Волі, буд. 13, м. Луцьк Волинської обл., 43025, post@vnu.edu.ua, тел. (0332) 720123).

Періодичність: 4 рази на рік.

«Проблеми хімії та сталого розвитку» включено до Переліку наукових фахових видань України категорії Б
у галузі знань природничі науки (спеціальності Е2 – Екологія; Е3 – Хімія),
педагогічні науки А1 – Освітні, педагогічні науки; А5 – Професійна освіта (за спеціалізаціями))
відповідно до Наказу МОН України № 735 від 29 червня 2021 року (додаток 4),
Наказу МОН України № 1166 від 23 грудня 2022 року (додаток 3)

Офіційний сайт видання: www.journals.vnu.volyn.ua/index.php/chemistry

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

ISSN 2786-4669 (Print)
ISSN 2786-4677 (Online)

© Волинський національний університет імені Лесі Українки, 2025

ХІМІЯ

УДК 543.422.7:547.97

DOI

Олена ЄВДОЧЕНКО

доктор філософії у галузі освіти та педагогіки, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0001-6338-5372

Scopus Author ID: 59242263100

Олександр КАМІНСЬКИЙ

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0003-1971-8437

Scopus Author ID: 55644133300

Сніжана КУЧЕРУК

доктор філософії у галузі хімії та біоінженерії, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0002-5978-487X

Scopus Author ID: 57365874700

Роман ДЕНИСЮК

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0003-3077-3795

Scopus Author ID: 57200563715

Микола ЧАЙКА

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0001-5356-9856

Scopus Author ID: 57200568202

Юлія ЧАЙКА

кандидат біологічних наук, старший викладач кафедри медико-біологічних дисциплін, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0002-3965-6088

Scopus Author ID: 57221502558

Ольга АВДЕЄВА

доктор філософії у галузі знань освітніх, педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Університетська, 42, м. Житомир, Україна, 10008

ORCID: 0000-0001-6550-0776

Scopus Author ID: 59242263300

Бібліографічний опис статті: Євдоченко, О., Камінський, О., Кучерук, С., Денисюк, Р., Чайка, М., Чайка, Ю., Авдєєва, О. (2025). Фотодеструкція харчових барвників з водних розчинів під дією УФ-випромінювання. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 3–9, doi:

ФОТОДЕСТРУКЦІЯ ХАРЧОВИХ БАРВНИКІВ З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ПІД ДІЄЮ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ

Відповідно до Директиви ЄС «Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption» одним із важливих харчових продуктів визнано питну воду, для якої прийняті стандарти вмісту різноманітних забруднювачів, серед яких барвники. Також слід відмітити, що однією з ключових цілей на 2030 рік країн ЄС є гарантування доступності та довгострокового забезпечення водопостачання та санітарії для всіх (шоста ціль сталого розвитку (ЦСР)).

Сучасна промисловість випускає понад 10^7 тон різноманітних синтетичних барвників, 15–20% яких потрапляють у стічні води. Тому проблема очистки водоїм від барвників залишається актуальною.

У роботі проведено порівняльний аналіз фотодеструкції харчових барвників, що входять до складу льодяників червоного, зеленого та жовтого кольорів торгових марок «Mintex+», «Вім Вот», «Дюшес», «Citrus Mix» та «Juice Mix».

Показано, що ступінь стійкості червоних барвників до ультрафіолетового випромінювання варіюється залежно від зразка. Найвищу стійкість продемонстрував барвник, застосований у льодяниках «Citrus Mix», тоді як найнижчу – у зразку «Juice Mix». Визначено, що червоні барвники загалом характеризуються відносно високою стійкістю до фотодеструкції.

Подібна тенденція спостерігається і для зелених барвників, хоча їх стійкість до УФ-випромінювання виявилася меншою. Найбільш стабільним виявився барвник, що використовується в продукті «Дюшес», а найменш стійким – у льодяниках «Вім Вот». Визначено, що зелені барвники є більш вразливими до процесів фотодеструкції у порівнянні з червоними.

Визначено варіативність стійкості жовтих барвників до УФ-випромінювання. Встановлено, що найвищу стійкість продемонстрував барвник із льодяників «Вім Вот», найменшу – зразок «Juice Mix». Відповідно до отриманих результатів, за ступенем стійкості до фотодеструкції барвники можна розмістити в такій послідовності: червоні < жовті < зелені. Одержані результати можна пояснити хімічною природою синтетичних барвників та їх здатності до процесів фотодеструкції.

Ключові слова: харчові барвники, фотодеструкція, ступінь фотодеструкції, фотоколориметрія, харчова хімія.

Olena YEVDCHENKO

Doctor of Philosophy in Education and Pedagogy, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0001-6338-5372

Scopus Author ID: 59242263100

Oleksandr KAMINSKYI

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0003-1971-8437

Scopus Author ID: 55644133300

Snizhana KUCHERUK

Doctor of Philosophy in Chemistry and Bioengineering, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0002-5978-487X

Scopus Author ID: 57365874700

Roman DENYSIUK

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0003-3077-3795

Scopus Author ID: 57200563715

Mykola CHAIKA

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0001-5356-9856

Scopus Author ID: 57200568202

Yuliia CHAIKA

Candidate of Biological Sciences, Senior Lecturer at the Department of Medical and Biological Disciplines, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0002-3965-6088

Scopus Author ID: 57221502558

Olha AVDIEIEVA

Doctor of Philosophy in Education and Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Chemistry, Ivan Franko Zhytomyr State University, 42 Universytetska str., Zhytomyr, Ukraine, 10008

ORCID: 0000-0001-6550-0776

Scopus Author ID: 59242263300

To cite this article: Yevdochenko, O., Kaminskyi, O., Kucheruk, S., Denysiuk, R., Chaika, M., Chaika, Yu., Avdieieva, O. (2025). Fotodestruktsiya kharchovykh barvnykiv z vodnykh rozchyniv pid diyeyu UF-vyprominyuvannya [Photodestruction of food dyes from aqueous solutions under the influence of UV radiation]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 3–9, doi:

PHOTODESTRUCTION OF FOOD DYES FROM AQUEOUS SOLUTIONS UNDER THE INFLUENCE OF UV RADIATION

In accordance with the EU Directive "Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption", drinking water is recognized as one of the important food products, for which standards for the content of various pollutants, including dyes, have been adopted. It should also be noted that one of the key goals for 2030 of the EU countries is to guarantee accessibility and long-term provision of water supply and sanitation for all (the sixth Sustainable Development Goal (SDG)).

Modern industry produces more than 107 tons of various synthetic dyes, 15–20% of which end up in wastewater. Therefore, the problem of cleaning water bodies from dyes remains relevant.

The paper presents a comparative analysis of the photodegradation of food dyes included in the red, green and yellow candies of the brands «Mintex+», «Bim Bom», «Duchess», «Citrus Mix» and «Juice Mix».

It is shown that the degree of resistance of red dyes to ultraviolet radiation varies depending on the sample. The highest resistance was demonstrated by the dye used in «Citrus Mix» candies, while the lowest was demonstrated in the «Juice Mix» sample. It was determined that red dyes are generally characterized by relatively high resistance to photodegradation.

A similar trend is observed for green dyes, although their resistance to UV radiation was lower. The dye used in the product «Duchess» was the most stable, and the least stable was in the «Bim Bom» candies. It was determined that green dyes are more vulnerable to photodegradation processes compared to red ones.

The variability of the resistance of yellow dyes to UV radiation was determined. It was found that the dye from the «Bim Bom» lollipops demonstrated the highest resistance, the «Juice Mix» sample the lowest. According to the results obtained, the dyes can be placed in the following sequence in terms of the degree of resistance to photodegradation: red < yellow < green. The results obtained can be explained by the chemical nature of synthetic dyes and their ability to photodegradation processes.

Key words: food dyes, photodegradation, degree of photodegradation, photocolormetry, food chemistry.

Вступ. Наявність кольору є однією з основних характеристик, яка впливає на підвищення споживчої привабливості харчових продуктів, зокрема таких як: солодоші, цукерки, карамель та газовані напої. У сучасному харчовому

виробництві спостерігається зростаюча тенденція до використання синтетичних барвників, які сприяють покращенню зовнішнього вигляду продукції, забезпечують яскравість, стабільність і контрастність кольорів. Крім того, штучні

барвники мають значно нижчу собівартість порівняно з натуральними аналогами.

Різні категорії харчових продуктів зокрема: цукерки, льодяники, желе, мармелад, драже, зефір, морозиво тощо, а також солодкі безалкогольні напої можуть містити як заборонені в країнах Європейського Союзу синтетичні барвники, так і надмірну кількість дозволених речовин. Варто зауважити, що в окремих зразках кондитерської продукції виявлено наявність барвників, у тому числі, текстильного походження [1–3], які становлять потенційну загрозу для здоров'я людини, викликаючи такі негативні наслідки як: мутагенні ефекти, онкологічні захворювання, зниження рівня гемоглобіну, алергічні реакції тощо [4–5].

Також слід відмітити, що харчові барвники, які потрапляють у навколишнє середовище у процесі викидів їх надлишку підприємствами або не правильної утилізації харчових продуктів, у яких закінчився строк придатності, призводить до забруднення у першу чергу водойм. Тому пошук ефективних методів очистки водойм від барвників залишається актуальною проблемою сьогодення.

Аналіз літератури. Авторами у роботі [6] розроблено декілька способів колориметричного аналізу лаккази на основі харчових барвників, які можна використовувати для порівняння відносної активності лаккази між різними штамми *S. neoformans*. Виявлено, що фенольна деградація кольору залежить від кількості глюкози, що може відображати зміни у відновних властивостях середовища. Колориметричний аналіз на основі харчових барвників має кілька переваг, включаючи нижчу вартість, незворотність та відсутність потреби в постійному моніторингу, порівняно з поширеним аналізом 2,2'-азино-біс(3-етилбензотіазолін-6-сульфоною кислотою (ABTS), який використовується для визначення активності лаккази. Показано, що розроблені методики можуть використовуватися для біоремедіації забруднювачів води, окрім його використання для визначення експресії фактора вірулентності лаккази.

У дослідженні [7] авторами виконано порівняльний аналіз фотостабільності трьох органічних червоних барвників у водних розчинах та розчинах безалкогольних напоїв: Red 40 (алура червоний АС), бетаніну та кармінової кислоти. Показано, що фотодеградація, досліджена за

допомогою абсорбційної спектроскопії, добре відповідає кінетиці першого порядку. У водному розчині спостерігаються дві різні часові шкали, одна з яких є швидша дестабілізація в матриці безалкогольного напою. Визначено, що бетанін є найменш стабільним барвником в обох середовищах розчинників, а Red 40 демонструє найбільшу дестабілізацію в розчині безалкогольного напою.

У роботі [8] досліджено вплив різних значень рН та термічної обробки на стабільність препаратів барвників з квітів блакитного гороху та порівняно з препаратами зі спіруліни. Загальний вміст антоціанів, загальний вміст фенолів, антиоксидантну активність та загальну зміну кольору (ΔE) визначали з інтервалами в 6 днів за різного значення рН (рН 3, 4, 5 та 6 протягом 30 днів при 4 та 26 °C) та після термічної обробки (60, 80 та 100 °C протягом 10 та 30 хвилин). Виявлено високу стабільність препаратів барвників з квітів блакитного гороху під час їх зберігання при рН 3 та 4 за 4 °C протягом 30 днів та вищу термічну стабільність, ніж спіруліни, за таких самих умов термічної обробки. Показано, що при зберіганні в холодильнику антиоксидантна активність препаратів барвників з квітів блакитного гороху за всіх умов рН була вищою, ніж у спіруліни.

У оглядовій роботі [9] проведено порівняльний аналіз ефективності фотокаталізу як методу очистки промислових стічних вод від текстильних барвників. Підкреслено необхідність вирішення кількох проблем фотокаталізу, таких як: часу контакту, рН, УФ-випромінювання, механізмів фотодеструкції, дослідження стічних вод змішаних барвників, вивчення впливу побічних продуктів, що утворюються у процесі фотокаталізу, на навколишнє середовище тощо.

Проте, дослідження процесів фотодеструкції харчових барвників у водних розчинах вивчено недостатньо.

Метою даної роботи є: порівняльний аналіз процесів фотодеструкції барвників, що входять до складу льодяників червоного, зеленого та жовтого кольорів торгових марок «Mintex+», «Bim Bom», «Дюшес», «Citrus Mix» та «Juice Mix».

Експериментальна частина. У якості об'єктів дослідження використано зразки льодяників червоного, зеленого та жовтого кольорів торгових марок «Mintex+», «Bim Bom», «Дюшес», «Citrus Mix» та «Juice Mix».

Зразок льодяника певного кольору масою 5 г подрібнювали на шматочки, переносили у колбу та додавали 50 мл дистильованої води. Шляхом періодичного перемішування розчиняли зразки протягом 1-2 годин. Оптичну густину барвників у розчині до та після фотодеструкції визначали за допомогою фотоколориметра КФК-2 з товщиною кварцової кювети 2 см. У якості розчину для порівняння використовували дистильовану воду.

З метою перевірки стійкості барвників різних кольорів до дії УФ-випромінювання використано установку, зображену на рис. 1.

Відміряли 25 мл розчину відповідного барвника та опромінювали за допомогою УФ-лампи потужністю 40 Вт ($\lambda = 365\text{--}400$ нм) протягом 10 хвилин без перемішування. Оптичну густину розчинів барвників до та після фотодеструкції визначали фотометрично.

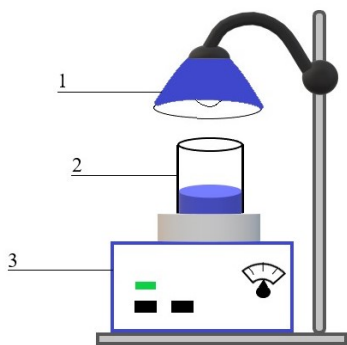


Рис. 1. Установка для проведення фотодеструкції барвників [10]

Установка для проведення фотодеструкції складається з таких основних частин: 1. УФ-лампа; 2. склянка з розчином барвника; 3. електромішалка.

Ступінь фотодеструкції барвників розраховували за формулою:

$$X, \% = \frac{(D_0 - D_1)}{D_0} \cdot 100\%,$$

де $X, \%$ – ступінь фотодеструкції, D_0 та D_1 – оптична густина до та після фотодеструкції барвника відповідно.

Результати та їх обговорення. На рис. 2 показано діаграму залежності ступеня фотодеструкції червоного барвника від марки виробника льодяників (довжина хвилі 490 нм).

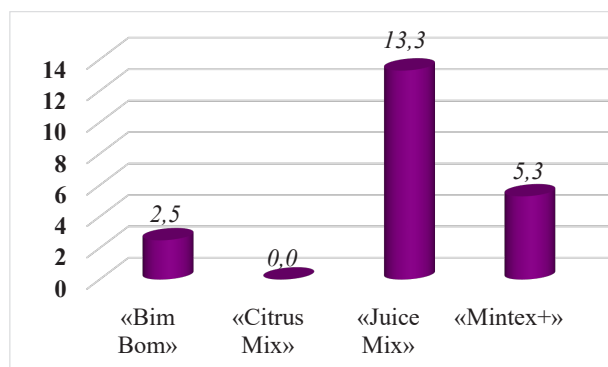


Рис. 2. Діаграма залежності ступеня фотодеструкції червоного барвника від марки виробника льодяників

Визначено, що стійкість червоних барвників до УФ-випромінювання різна. Найбільш стійким є барвник у льодяниках марки «Citrus Mix», а найменш стійким – «Juice Mix». Слід зазначити, що червоні барвники досить важко піддаються процесам фотодеструкції, що видно із величин ступеня фотодеструкції.

На рис. 3. показано діаграму залежності ступеня фотодеструкції зеленого барвника від марки виробника льодяників (довжина хвилі 400 нм).

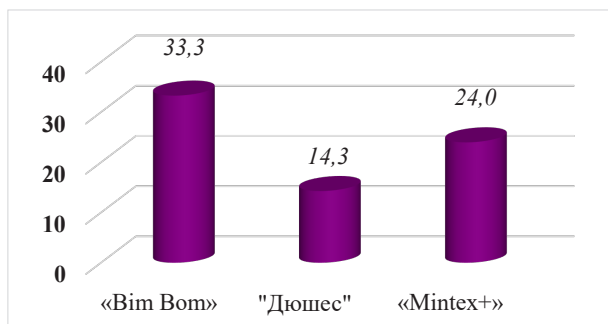


Рис. 3. Діаграма залежності ступеня фотодеструкції зеленого барвника від марки виробника льодяників

Показано, що стійкість зелених барвників до УФ-випромінювання також різна. Найбільш стійким є барвник, що міститься у льодяниках марки «Дюшес», а найменш стійким – «Bim Bom». Визначено, що у порівнянні з червоними барвниками зелені барвники більш схильні до фотодеструкції, що можна помітити із величин

ступеня фотодеструкції. Таку залежність можна пояснити тим, що зелені барвники утворені змішуванням інших кольорів, які більш чутливі до УФ-випромінювання.

Помічено, що у процесі фотодеструкції розчини жовтого барвника, які утворені із льодяників марок «Vim Bom» та «Juice Mix» святяться блакитнуватим світлом під дією УФ-випромінювання, розчини барвника з льодяників «Citrus Mix» має блакитно-салатове свічення, а барвник з льодяників «Mintex+» світиться жовто-салатовим свіченням.

На рис. 4 показано діаграму залежності ступеня фотодеструкції жовтого барвника від марки виробника льодяників (довжина хвилі 364 nm).

Визначено, що стійкість жовтих барвників до УФ-випромінювання також різна. Найбільш стійким є барвник з льодяників марки «Vim Bom», а найменш стійким – «Juice Mix».

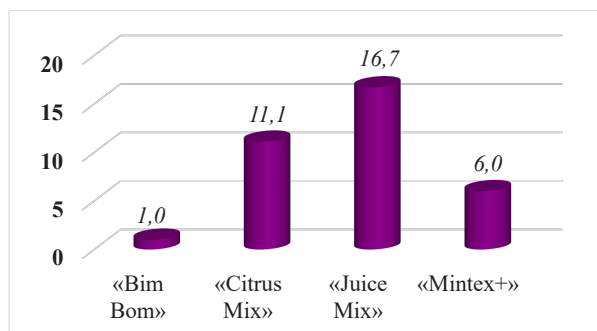


Рис. 4. Діаграма залежності ступеня фотодеструкції жовтого барвника від марки виробника льодяників

За величиною ступеня фотодеструкції барвники можна розташувати у таку залежність: **червоний < жовтий < зелений**.

Висновки. У роботі проведено порівняльний аналіз процесів фотодеструкції водних розчинів харчових барвників червоного, зеленого та жовтого кольорів, виготовлених з льодяників різних марок. Виявлено, що стійкість червоних барвників до УФ-випромінювання різна. Найбільш стійким є барвник, який використовується в льодяниках марки «Citrus Mix», а найменш стійким – «Juice Mix». Слід зазначити, що червоні барвники досить важко піддаються процесам фотодеструкції, що видно із величин ступеня фотодеструкції.

Визначено, що стійкість зелених барвників до УФ-випромінювання також різна. Найбільш стійким є барвник, який міститься у льодяниках марки «Дюшес», а найменш стійким – «Vim Bom». Встановлено, що у порівнянні з червоними барвниками зелені барвники більш схильні до фотодеструкції.

Показано, що стійкість жовтих барвників до УФ-випромінювання також відрізняється залежно від марки льодяників. Найбільш стійким є барвник, який використовується в льодяниках «Vim Bom», а найменш стійким – «Juice Mix». Визначено, що стійкість барвників до фотодеструкції зменшується у такій послідовності: **червоний < жовтий < зелений**.

У роботі показано перспективність використання УФ-випромінювання для фотодеструкції харчових барвників у модельних розчинах.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Vishnu G., et al. Photodegradation of methylene blue dye using light driven photocatalyst-green cobalt doped cadmium ferrite nanoparticles as antibacterial agents. *Journal of Cleaner Production*. 2023. Vol. 404. 136977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136977>.
2. Мельник С. Р., Мельник Ю. Р., Дзіняк Б. О., Піх З. Г. Контроль якості та безпечності харчових продуктів. Навч. посіб. Львів : Видавництво «Левада». 2018. 224 с.
3. Савчук Т. І., Кормош Ж. О., Корольчук С. І. Визначення харчових барвників у газованих напоях. *Товарознавчий вісник*. Вип. 14. 2021. С. 78–87.
4. Haki M. A., Imgharn A., Aarab N., et al. Efficient removal of crystal violet dye from aqueous solutions using sodium hydroxide-modified avocado shells: kinetics and isotherms modeling. *Water Sci Technol*. 2022. Vol. 85(1). P. 433–448. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.451>
5. Sadoq M., Atlas H., Imane S., et al. Elimination of crystal violet from aqueous solution by adsorption on naturel polysaccharide: Kinetic, isotherm, thermodynamic studies and mechanism analysis. *Arabian Journal of Chemistry*. 2024. Vol. 17, Is. 1. 105453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105453>
6. Ramirez L. S., Dragotakes Q., Casadevall A. A food color-based colorimetric assay for *Cryptococcus neoformans* laccase activity. *Microbiology Spectrum*. 2024. Vol. 12, Is. 8. DOI: <https://doi.org/10.1128/spectrum.00442-24>.
7. Boyles C., Schmidtke Sobek S. J. Photostability of organic red food dyes. *Food Chemistry*. 2020. Vol. 315. 126249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126249>.

8. Vidana Gamage G. C., Goh J. K., Choo W. S. Natural blue colourant preparations from blue pea flower and spirulina: A comparison stability study. *Food Chemistry Advances*. 2023. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100457>.
9. Bopape D. A., Ntsendwana B., Mabasa F. D. Photocatalysis as a pre-discharge treatment to improve the effect of textile dyes on human health: A critical review. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, Is. 20. e39316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39316>.
10. Pysarenko S., Kaminskyi O., Chyhyrynets O., Denysiuk R., Chernenko V. Photocatalytic destruction and adsorptive processes of methylene blue by potassium titanate. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62(15). P. 7754-7758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.476>.

REFERENCES:

1. Vishnu, G., et al. (2023). Photodegradation of methylene blue dye using light driven photocatalyst-green cobalt doped cadmium ferrite nanoparticles as antibacterial agents. *Journal of Cleaner Production*, 404, 136977. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136977>.
2. Melnyk, S. R., Melnyk, YU. R., Dzinyak, B. O., & Pikh, Z. H. (2018). Kontrol yakosti ta bezpechnosti kharchovykh produktiv [Quality and safety control of food products]. Navch. posib. Lviv : Vydavnytstvo «Levada» – Publisher «Levada», 224. [in Ukrainian].
3. Savchuk, T. I., Kormosh, ZH. O., & Korolchuk, S. I. (2021). Vyznachennya kharchovykh barvnykiv u hazovanykh napoyakh [Determination of food dyes in carbonated beverages]. *Tovaroznavchyy visnyk – Commodity Bulletin*. 14, 78–87. [in Ukrainian].
4. Haki, M. A., Imgharn, A., Aarab, N., et al. (2022). Efficient removal of crystal violet dye from aqueous solutions using sodium hydroxide-modified avocado shells: kinetics and isotherms modeling. *Water Sci Technol*, 85(1), 433–448. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2021.451>.
5. Sadoq, M., Atlas, H., Imane, S., et al. (2024). Elimination of crystal violet from aqueous solution by adsorption on naturel polysaccharide: Kinetic, isotherm, thermodynamic studies and mechanism analysis. *Arabian Journal of Chemistry*, 17(1), 105453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105453>.
6. Ramirez, L. S., Dragotakes, Q., & Casadevall, A. (2024). A food color-based colorimetric assay for *Cryptococcus neoformans* laccase activity. *Microbiology Spectrum*, 12(8). DOI: <https://doi.org/10.1128/spectrum.00442-24>.
7. Boyles, C., Schmidtke Sobeck, S. J. (2020). Photostability of organic red food dyes. *Food Chemistry*, 315, 126249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126249>.
8. Vidana Gamage, G. C., Goh, J. K., & Choo, W. S. (2023). Natural blue colourant preparations from blue pea flower and spirulina: A comparison stability study. *Food Chemistry Advances*, 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100457>.
9. Bopape, D. A., Ntsendwana, B., & Mabasa, F. D. (2024). Photocatalysis as a pre-discharge treatment to improve the effect of textile dyes on human health: A critical review. *Heliyon*, 10(20), e39316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39316>.
10. Pysarenko, S., Kaminskyi, O., Chyhyrynets, O., Denysiuk, R., & Chernenko, V. (2022). Photocatalytic destruction and adsorptive processes of methylene blue by potassium titanate. *Materials Today: Proceedings*, 62(15), 7754–7758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.476>.

Стаття надійшла: 26.08.2025

Прийнято: 05.09.2025

Опубліковано:

UDC 678.744:532.135:544.7

DOI

Hanna TKACHUK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Chemistry and Chemical Engineering, Khmelnytskyi National University, 11 Instytutska str., Khmelnytskyi, Ukraine, 29016

ORCID: 0000-0003-3502-0557

Scopus Author ID: 57208406668

Andrii TKACHUK

Senior Teacher at the Department of Physics and Electrical Engineering, Khmelnytskyi National University, 11 Instytutska str., Khmelnytskyi, Ukraine, 29016

ORCID: 0000-0003-0865-9603

Scopus Author ID: 59921056100

Oksana HERTSYK

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor at the Department of Physical and Colloid Chemistry, Ivan Franko Lviv National University, 6/8 Kyryla i Mefodia str., Lviv, Ukraine, 79005

ORCID: 0000-0001-5243-4757

Scopus Author ID: 6603364236

Myroslava TASHAK

Senior Lecturer at a Higher Education Institution at the Department of Civil Safety, Lviv Polytechnic National University, 12 Bandery str., Lviv, Ukraine, 29013

ORCID: 0000-0003-4581-5732

Scopus Author ID: 57207912938

Oleh MARCHUK

Doctor of Chemical Sciences, Professor, Professor at the Department of Inorganic and Physical Chemistry, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn Region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-5618-7156

Scopus Author ID: 57191781842

To cite this article: Tkachuk, H., Tkachuk, A., Hertsyk O., Tashak, M., Marchuk, O. (2025). Reolohichni vlastyvyosti koloidnykh system polivinilatsetaliv [Rheological properties of polyvinyl acetals colloidal systems]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 10–16, doi:

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF POLYVINYLACETAL COLLOIDAL SYSTEMS

This study investigates the dynamic viscosity and thixotropic recovery of polyvinylacetal colloidal systems.

Rotational viscometry was employed to determine the dependence of dynamic viscosity (η) on polymer concentration and shear stress (τ). The rheological properties of the polymers examined exhibited a common pattern: viscosity increases with concentration as a result of intensified intermolecular interactions.

Detailed analysis of flow curves for polyvinyl butyral solutions revealed pseudoplastic behavior at low shear stresses. With increasing shear stress, a transition to Newtonian flow was observed, where the dynamic viscosity reached a minimum and stabilized. This effect is attributed to the breakdown of macromolecular structural conglomerates, which form in the resting state through hydrogen bonding with water molecules in the dispersion medium.

A key finding is the demonstrated ability of polyvinylacetal gels to rapidly restore their structure through thixotropic recovery. The degree of thixotropic recovery (α), calculated as the ratio of effective viscosities during reverse and forward measurement runs, increased substantially with polymer concentration, reaching 94.58%. This property ensures that,

© H. Tkachuk, A. Tkachuk, O. Hertsyk, M. Tashak, O. Marchuk, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

following mechanical disruption during application, the polymer layer quickly regains its structural integrity and adhesive performance, which is of practical significance.

The obtained results confirm the high efficiency of polyvinylacetals as adhesives and highlight the prospects for further research aimed at optimizing their compositions, exploring the influence of external factors, and elucidating adhesion mechanisms at the molecular level. Such efforts may lead to the development of novel, more advanced materials for the textile industry.

Key words: dynamic viscosity, shear stress, rotational viscometry, polyvinylacetal, polyvinyl butyral, polyvinyl ethylal, polyvinyl formal, rheological curve, thixotropic recovery.

Ганна ТКАЧУК

кандидат технічних наук, доцент кафедри хімії та хімічної інженерії,

Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

ORCID: 0000-0003-3502-0557

Scopus Author ID: 57208406668

Андрій ТКАЧУК

старший викладач кафедри фізики і електротехніки, Хмельницький національний університет,

вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016

ORCID: 0000-0003-0865-9603

Scopus Author ID: 59921056100

Оксана ГЕРЦИК

кандидат хімічних наук, доцент кафедри фізичної та колоїдної хімії,

Львівський національний університет імені Івана Франка, вул. Кирила і Мефодія, 6, м. Львів, Україна, 79005

ORCID: 0000-0001-5243-4757

Scopus Author ID: 6603364236

Мирослава ТАШАК

старший викладач закладу вищої освіти кафедри цивільної безпеки, Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, Україна, 29013

ORCID: 0000-0003-4581-5732

Scopus Author ID: 57207912938

Олег МАРЧУК

доктор хімічних наук, професор, професор кафедри неорганічної та фізичної хімії, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-5618-7156

Scopus Author ID: 57191781842

Бібліографічний опис статті: Ткачук, Г., Ткачук, А., Герцик, О., Ташак, М., Марчук, О. (2025). Реологічні властивості колоїдних систем полівінілацеталів. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 10–16, doi:

РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОЛОЇДНИХ СИСТЕМ ПОЛІВІНІЛАЦЕТАЛІВ

У цій праці автори досліджували динамічну в'язкість та тиксотропне відновлення колоїдних систем полівінілацеталів.

Для досягнення поставленої мети були застосовані методи ротаційної віскозиметрії, що дозволило визначити залежність динамічної в'язкості (η) від концентрації полімеру та дотичного напруження зсуву (τ). Встановлено, що реологічні властивості досліджуваних полімерів мають схожий характер: в'язкість зростає зі збільшенням концентрації, що є наслідком посилення міжмолекулярної взаємодії.

Детальне вивчення кривих течії для розчинів полівінілбутиралу продемонструвало їхню псевдопластичну поведінку при малих напруженнях зсуву. Зі зростанням напруження зсуву спостерігається перехід до ньютонівської течії, коли динамічна в'язкість набуває мінімального і стабільного значення. Цей ефект пояснюється руй-

нуванням структурних конгломератів макромолекул, які утворюються у стані спокою завдяки водневим зв'язкам з молекулами дисперсійного середовища (води).

Ключовим результатом є виявлення здатності гелів полівінілацеталів до швидкого тиксотропного відновлення їхньої структури. Ступінь тиксотропного відновлення (α), розрахований як відношення сум ефективних в'язкостей при зворотному і прямому ходах вимірювання, значно зростає зі збільшенням концентрації полімеру, досягаючи 94,58%. Ця здатність гарантує, що після механічного руйнування структури в процесі нанесення, полімерний шар швидко відновлює свою міцність та адгезійні властивості, що є важливим.

Отримані результати підтверджують високу ефективність полівінілацеталів як адгезивів і вказують на перспективи подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію їхніх композицій, вивчення впливу зовнішніх факторів та механізмів адгезії на молекулярному рівні для розробки нових, більш досконалих матеріалів для текстильної промисловості.

Ключові слова: динамічна в'язкість, дотичне напруження зсуву, метод ротаційної віскозиметрії, полівінілацеталь, полівінілбутираль, полівінілетилаль, полівінілформаль, реологічна крива, тиксотропне відновлення.

One important area of polymer solution application is their use as adhesives in the preparatory stages of weaving production, particularly for sizing warp yarns. The effectiveness of the applied polymer solution on the yarn determines the quality of all subsequent stages of textile manufacturing. Adhesives are predominantly based on aqueous solutions of natural or synthetic polymers and their various blends; among these, polyvinylacetal solutions have proven to be particularly effective. A key property of polymer solutions is their dynamic viscosity, which depends on temperature, concentration, and the molecular weight of the film-forming polymer. Consequently, the study of the rheological properties of polyvinylacetals is of high practical relevance.

The rheology of polymer solutions reflects the combined effects of intermolecular interactions between macromolecules. Due to their relatively large geometric dimensions, polymer macromolecules in solution undergo a variety of processes under flow conditions – either spontaneous or externally induced. In solution, macromolecular aggregates continuously form and disintegrate (Mezger, 2011).

When a highly diluted polymer solution is examined, its viscosity is nearly identical to that of the solvent. However, even at low concentrations, under shear stress the viscosity of the system increases, being directly proportional to the polymer's volume fraction.

Upon extrapolating reduced viscosity to zero concentration, which corresponds to infinite dilution, the contribution of intermolecular interactions to the hydrodynamic behavior becomes negligible. In this regime, viscosity is determined solely by the intrinsic properties of the macromolecules and their interaction with the solvent (Sangroniz et al., 2023). Colloidal solutions at very

low concentrations behave as Newtonian fluids, albeit with higher viscosity. At higher concentrations, however, mutual orientation, structuring and breakdown of macromolecules occur, accompanied by the transformation from laminar to turbulent flow. The properties of such highly structured dispersions depend on both the number of intermolecular interactions per unit volume and the strength of interparticle bonding.

The presence of water molecules adsorbed on polymer fragments is critical to the behavior of polymer solutions. The structure and stability of the resulting macromolecular conglomerates depend on the intrinsic molecular properties, the specifics of their interaction in aqueous medium, and the influence of external forces. These conglomerates determine the amount of water they retain; when they span the entire volume of the colloidal dispersion, only a small fraction of free water remains. Under such conditions, low shear stresses are insufficient to destabilize the system, and the viscosity of the polymer gel approaches its limiting value (Xu et al., 2024).

Polyvinylacetal macromolecules possess extended surfaces capable of retaining large volumes of water. As a result, the amount of free solvent decreases while the fraction of macromolecular conglomerates increases, forming a quasi-static structure. When subjected to sufficiently high shear stress to disrupt these conglomerates, flow begins. This point corresponds to the critical viscosity and shear stress. Beyond this threshold, the viscosity of the polymer gel decreases and gradually approaches a minimum, where it becomes independent of shear stress and the solution behaves as a Newtonian fluid. The decrease in dynamic viscosity is associated with the progressive release of water molecules during flow and the effective reduction of polymer concentration.

However, once shear stress is removed, the structure of macromolecular conglomerates gradually rebuilds over time, leading to an increase in viscosity through thixotropic recovery. This property is particularly important for the use of polyvinylacetals as adhesives in yarn sizing (Wang et al., 2024).

The aim of this study is to investigate the viscous-rheological properties of polyvinylacetal colloidal systems. The objectives include analyzing the structure and dynamic viscosity of aqueous polyvinylacetal solutions, constructing flow curves, and determining the degree of thixotropic recovery of polyvinylacetal gels. Rotational viscometry was employed for this purpose.

The dynamic viscosity η (Pa·s) of polyvinylacetal solutions with a low degree of acetalization – polyvinyl formal (PVF), polyvinyl ethylal (PVE), and polyvinyl butyral (PVB) – was calculated based on shear stress τ (Pa), measured using a Rheotest-2 rotational viscometer.

We established the dependence of dynamic viscosity for PVF, PVE, and PVB solutions on polymer concentration. Solutions were prepared as follows: water was poured into a beaker, polymer was added while stirring for 15...20 minutes, followed by heating to approximately 50°C with continuous agitation until complete dissolution was achieved.

The rheological properties of PVF, PVE, and PVB gels (Fig. 1) demonstrated a common trend: viscosity increases with increasing polymer concentration. The higher the concentration, the stronger the intermolecular interactions (Kalyanasundaram et al., 2000).

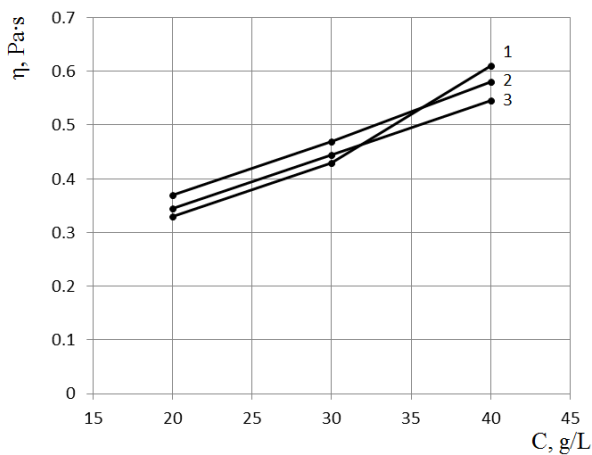


Fig. 1. Dependence of dynamic viscosity on the concentration of aqueous solutions:
1 – PVF; 2 – PVB; 3 – PVE

Subsequently, PVB solutions were investigated at concentrations (g/L): 1) 20, 2) 25, 3) 30, 4) 35, and 5) 40. In the previous experiment, PVB exhibited similar behavior; however, this polymer is the most readily soluble in water. Figures 2–5 present the plots of the following dependencies: $\eta = f(\tau)$, $\ln \eta = f(\ln \tau)$, $\gamma = f(\eta)$, and $\gamma = f(\tau)$. The viscosity values increase systematically with polymer concentration in the gel. The flow behavior indicates that at low shear stresses the system exhibits pseudoplastic characteristics, subsequently transitioning into Newtonian flow (Sangroniz et al., 2023). However, concentrated polymer solutions may behave as Bingham – Shvedov bodies. The corresponding equation describes this type of flow, where the strength of the undisturbed gel structure can be quantitatively recorded.

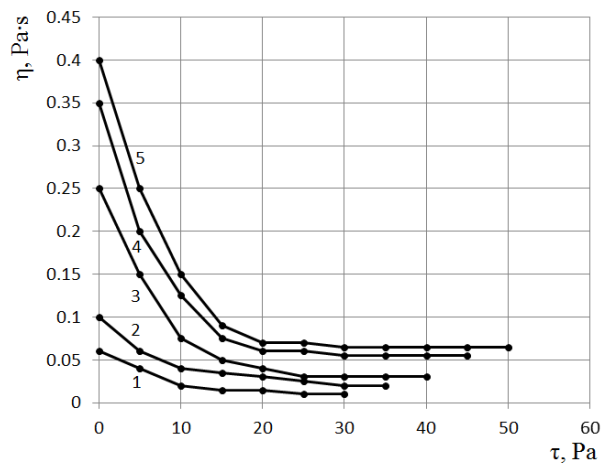


Fig. 2. Dependence of the dynamic viscosity of aqueous PVB solutions on shear stress

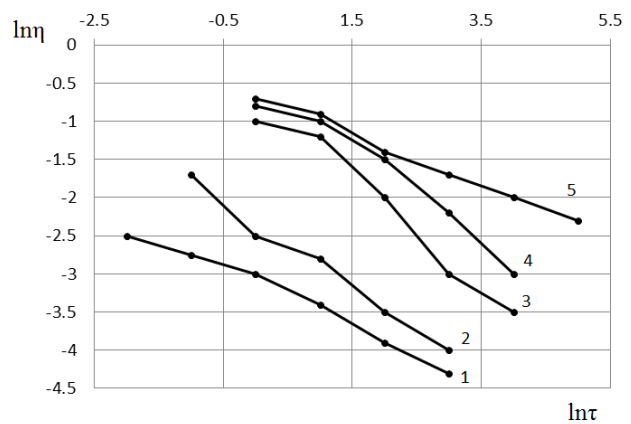


Fig. 3. Logarithmic dependence of the dynamic viscosity of aqueous PVB solutions on shear stress

Since we have identified the flow behavior as pseudoplastic, the Ostwald – de Waele equation describing it can be expressed as:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

where $\dot{\gamma}$ is the shear rate under steady-state flow, $[\text{s}^{-1}]$;

K is the consistency coefficient;

n is the flow behavior index.

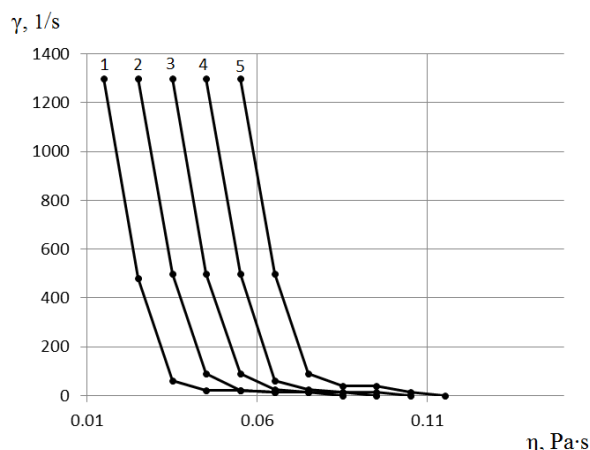


Fig. 4. Dependence of the shear rate on the dynamic viscosity of PVB solutions at various concentrations

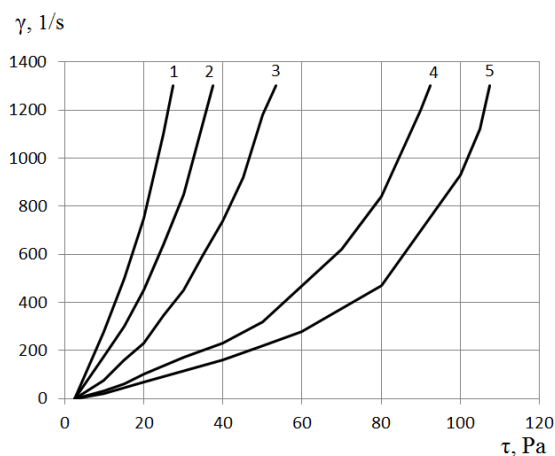


Fig. 5. Dependence of the shear rate on the shear stress of PVB solutions at various concentrations

At all concentrations, the flow behavior of PVB gels is similar; however, in every case, viscosity depends on polymer concentration. The power-law expression (1) describes pseudoplastic gels, where $\eta = f(\tau)$. Consequently, the obtained graphical dependencies $\ln \eta = f(\ln \tau)$ appear as lines approximating straight lines. As can be seen from all curves in Fig. 2, at certain shear stresses the dynamic viscosity of PVB gels reaches a

minimal constant value and no longer depends on the applied force. In other words, at these levels of shear stress, and across all studied concentrations, PVB gels behave as Newtonian fluids (Farmer et al., 1990). At lower stresses, however, they exhibit pseudoplastic behavior.

Polymer solutions, which exist as gels in a resting state, form structural three-dimensional conglomerates that involve not only polymer macromolecules but also molecules of the dispersion medium, namely water. Within the internal structure of polymer macromolecules, water molecules establish hydrogen bonds in such a way that the resulting spatial conglomerate is highly stable at rest (Li-Ping et al., 2021). When shear forces are applied to such systems, this structure can be partially or completely disrupted. Nevertheless, colloidal spatial networks gradually rebuild their structure over time, undergoing thixotropic recovery.

PVB gels demonstrated a pronounced ability to restore their structure via thixotropy. The molecular conglomerates of PVB reorganize, with macromolecules aligning along the direction of shear stress during flow. The thixotropic recovery process occurs rapidly, indicating a high degree of structural stability of the PVB gel. Attempts to fix the strength of the system at the point of complete structural breakdown were unsuccessful, as the polymeric conglomerate began its recovery almost immediately.

The greater the PVB content in the studied gel, the higher the degree of thixotropic recovery. At such levels of structural self-restoration, the recovery of disrupted polymer conglomerates proceeds even at low shear rates. As a result, the dynamic viscosity of the gel increases, and this effect becomes more pronounced with higher polymer concentrations. The degree of thixotropic recovery of PVB gels was calculated as the ratio of the sum of effective viscosity values recorded during the reverse measurement run to those obtained during the forward run, as shown in Table 1 and Fig. 6.

The rheological properties of polyvinyl acetal (PVAc) gels, as vinyl polymers, exhibit characteristics analogous to polyvinyl alcohol, particularly their ability for thixotropic recovery (Bassan et al., 2023). During the dissolution of PVAc, the spatial configuration and molecular structure remain essentially unchanged. This assumption is supported by the fact that the gel is capable of structural recovery under small shear deformations,

while simultaneously orienting its flow in the direction of applied stress. With increasing thixotropic recovery capacity, the quantitative and qualitative performance of the polymer as a film-forming agent improves, which is critical in preparatory stages of textile manufacturing.

Table 1
Dependence of the thixotropic recovery degree of PVB gel on its concentration

PVB Content, g/L	Degree of the Thixotropic Recovery, α , %
20	80.46
25	86.19
30	92.47
35	93.56
40	94.58

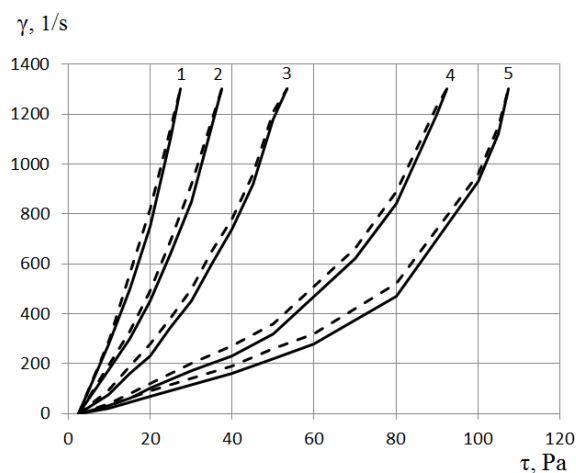


Fig. 6. Flow rheograms of PVB solutions at various concentrations. Solid line – forward run of the instrument, dashed line – reverse run

Experimental investigations of aqueous PVAc solutions confirmed their suitability as adhesives

for textile applications. The dynamic viscosity of the solutions was found to correlate directly with polymer concentration. At low shear stresses, the solutions exhibit pseudoplastic behavior, while at higher stresses they transition toward Newtonian flow. This behavior can be attributed to the formation and disruption of supramolecular aggregates of macromolecules, incorporating water molecules bound through hydrogen interactions.

A key conclusion is the pronounced ability of polyvinyl acetal gels to undergo rapid thixotropic recovery, which is particularly advantageous in sizing processes. The degree of thixotropic recovery increases with polymer concentration, indicating the high stability of structural assemblies. This property ensures that, following mechanical impact (e.g., structural disruption during application), the polymeric film rapidly regains its strength and adhesive capacity, thus providing effective protection for warp yarns. Structural recovery occurs under relatively low shear deformation rates, positively influencing the quality and uniformity of the film-forming layer.

Considering the results obtained, further research may focus on optimizing the formulation of composite adhesives based on polyvinyl acetals, particularly through the incorporation of plasticizers or other modifiers. Promising directions include examining the effects of temperature and pH on rheological behavior and recovery kinetics, as well as investigating the adhesion mechanisms of these polymers to different textile fibers at the molecular level. Identifying optimal conditions for maximizing film strength would enable the development of novel, more efficient, and environmentally safe adhesives for textile industry applications (Tkachuk et al., 2025).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Mezger T.G. The Rheology Handbook, 3rd revised edition. Hanover: Vincentz Network, 2011. 30 p.
2. Sangroniz L., Fernández M., Santamaria A. Polymers and rheology: A tale of give and take. *Polymer*. 2023. Vol. 271. P. 125811. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125811>
3. Xu C., Guo H., Lv C., Chen W., Li L., Cui K. Structure and dynamics heterogeneity in poly(vinyl acetal)s: The effect of side group length. *Polymer*. 2024. Vol. 295. P. 126741. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126741>
4. Wang K., Wang J., Gao W. Enhancing warp sizing effect and quality: A comprehensive review of the squeezing process and future research. *Textile Research Journal*. 2024. Vol. 94. Issue 19-20. P. 2296–2315. <https://doi.org/10.1177/00405175241235400>
5. Kalyanasundaram S., Sundaresan B., Hemalatha J. Study on the viscosity of polymer solutions. *Journal of Polymer Materials*. 2000. Vol. 17(1). P. 91–95.
6. Farmer P.H., Jemmott B.A. Polyvinyl Acetal Adhesives. In I. Skeist (Ed.), *Handbook of Adhesives*. Springer, 1990. P. 433–444. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0671-9_24
7. Li-Ping Guo, Xue Han, Yun Lei, Lei Wang, Peng-Fei Yu, Shuang Shi. Study on the thixotropy and structural recovery characteristics of waxy crude oil emulsion. *Petroleum Science*. 2021. Vol. 18. Issue 4. P. 1195–1202. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.07.003>

8. Bassan R., Varshney M., Roy S. An Amino Acid-Based Thixotropic Hydrogel: Tuning of Gel Recovery Time by Mechanical Shaking. *ChemistrySelect*. 2023. Vol. 8. Issue 5. P. e202203317. <https://doi.org/10.1002/slct.202203317>
9. Tkachuk H., Romanuke V., Tkachuk A. Optimal selection of cotton warp sizing parameters under system research limitation. *System research and information technologies*. 2025. № 1. P. 89–103. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2025.1.07>

REFERENCES:

1. Mezger, T. G. (2011). *The rheology handbook* (3rd rev. ed.). Hanover: Vincentz Network.
2. Sangroniz, L., Fernández, M., & Santamaria, A. (2023). Polymers and rheology: A tale of give and take. *Polymer*, 271, 125811. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.125811>
3. Xu, C., Guo, H., Lv, C., Chen, W., Li, L., & Cui, K. (2024). Structure and dynamics heterogeneity in poly(vinyl acetal)s: The effect of side group length. *Polymer*, 295, 126741. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.126741>
4. Wang, K., Wang, J., & Gao, W. (2024). Enhancing warp sizing effect and quality: A comprehensive review of the squeezing process and future research. *Textile Research Journal*, 94(19–20), 2296–2315. <https://doi.org/10.1177/00405175241235400>
5. Kalyanasundaram, S., Sundaresan, B., & Hemalatha, J. (2000). Study on the viscosity of polymer solutions. *Journal of Polymer Materials*, 17(1), 91–95.
6. Farmer, P. H., & Jemmott, B. A. (1990). Polyvinyl acetal adhesives. In I. Skeist (Ed.), *Handbook of adhesives* (pp. 433–444). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0671-9_24
7. Guo, L.-P., Han, X., Lei, Y., Wang, L., Yu, P.-F., & Shi, S. (2021). Study on the thixotropy and structural recovery characteristics of waxy crude oil emulsion. *Petroleum Science*, 18(4), 1195–1202. <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.07.003>
8. Bassan, R., Varshney, M., & Roy, S. (2023). An amino acid-based thixotropic hydrogel: Tuning of gel recovery time by mechanical shaking. *ChemistrySelect*, 8(5), e202203317. <https://doi.org/10.1002/slct.202203317>
9. Tkachuk, H., Romanuke, V., & Tkachuk, A. (2025). Optimal selection of cotton warp sizing parameters under system research limitation. *System Research and Information Technologies*, 1, 89–103. <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2025.1.07>

Стаття надійшла: 14.08.2025

Прийнято: 01.09.2025

Опубліковано:

ЕКОЛОГІЯ

UDC 628.543: 541.11

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-3-3>

Karina BELOKON

Candidate of Technical Science, Associate Professor, Deputy Director for Research of the Engineering Educational and Scientific Institute by name of Yu.M. Potebnya, Part-Time Associate Professor at the Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technogenic Safety, Zaporizhzhia National University, 66 Universytetska str., Zaporizhzhia, Ukraine, 69011

ORCID: 0000-0003-2000-4052

Scopus Author ID: 56196099400

Genadij KOZHEMYAKIN

Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technogenic Safety, Zaporizhzhia National University, 66 Universytetska str., Zaporizhzhia, Ukraine, 69011

ORCID: 0000-0002-2960-1331

Scopus Author ID: 57191165525

Vladyslav BENDIUH

Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Artificial Intelligence, Educational and Research Institute for Applied System Analysis, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056

ORCID: 0000-0003-3295-4637

Scopus Author ID: 57433852300

Bohdana KOMARYSTA

Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Artificial Intelligence, Educational and Research Institute for Applied System Analysis, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056

ORCID: 0000-0001-9542-6597

Scopus Author ID: 26654832900

Mykyta ZHAVORONKOV

Postgraduate Student at the Department of Metallurgical Technologies, Ecology and Technogenic Safety, Engineering Educational and Scientific Institute by name of Yu. M. Potebnya, Zaporizhzhia National University, 66 Universytetska str., Zaporizhzhia, Ukraine, 69011

ORCID: 0009-0009-5396-8406

Ihor KARIYAKA

Graduate student of the Department of Metallurgical Technologies, Ecology, and Technogenic Safety, Institute by name of Yu.M. Potebnya, Zaporizhzhia National University, 66 Universytetska str., Zaporizhzhia, Ukraine, 69011

To cite this article: Belokon, K., Kozhemyakin, G., Bendiu, V., Komarysta, B., Zhavoronkov, M., Kariyaka, I. (2025). Doslidzhennia sposobu termichnoho zneskhodzhennia vysokomineralizovanykh stichnykh vod promyslovykh vyrobnytstv [Study of the thermal treatment method for highly mineralized wastewater from industrial production]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 17–28, doi:

© K. Belokon, G. Kozhemyakin, V. Bendiu, B. Komarysta, M. Zhavoronkov, I. Kariyaka, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

STUDY OF THE THERMAL TREATMENT METHOD FOR HIGHLY MINERALIZED WASTEWATER FROM INDUSTRIAL PRODUCTION

Highly mineralized wastewater from industrial enterprises is one of the main pollutants of the natural environment. This type of liquid waste is contaminated with mineral substances such as salts of calcium, sodium, magnesium, etc. Despite the widespread implementation of recirculating water supply and new low-waste technologies, the volume of contaminated wastewater remains significant. Therefore, the purification of liquid waste from mineral contaminants is a major problem.

A method for thermal neutralisation of highly mineralised liquid industrial waste using intermediate solid heat transfer has been proposed, offering promising prospects for application in metallurgy, chemistry, coal mining, energy and other industrial sectors. Laboratory equipment was developed, with an electric heater and an evaporation column containing an inert heat transfer medium in the form of metal balls. This work investigated the hydrodynamic regime of the evaporation apparatus during the disposal of highly mineralized wastewater on an intermediate solid heat carrier. Experiments were conducted on a granular packing with ball diameters of 10 and 15 mm. During the evaporation process, water was fed cyclically at a speed of 2, 2.5, and 3 m/s. As a result, it was found that the hydraulic resistance of the evaporation apparatus depends on the speed of the hot heat carrier and the type of packing (dry or wet).

The conducted laboratory studies showed that the cyclical evaporation of highly mineralized wastewater using an intermediate solid heat carrier (metal balls) allows for reduced energy consumption and the effective removal of mineral contaminants from the water. However, the formation of a salt film on the packing elements reduces the porosity of the layer and increases hydraulic resistance. To ensure the efficient operation of the evaporation apparatus, it is necessary to maintain an optimal level of porosity.

Key words: liquid waste, wastewater, thermal treatment, brines, evaporation, evaporators, intermediate heat carrier, hydraulic resistance.

Каріна БЕЛОКОНЬ

кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи Інженерного навчально-наукового інституту імені Ю.М. Потебні, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки за сумісництвом, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, м. Запоріжжя, Україна, 69011

ORCID: 0000-0003-2000-4052

Scopus Author ID: 56196099400

Геннадій КОЖЕМЯКІН

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, м. Запоріжжя, Україна, 69011

ORCID: 0000-0002-2960-1331

Scopus Author ID: 57191165525

Владислав БЕНДЮГ

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри штучного інтелекту Навчально-наукового інституту прикладного системного аналізу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056

ORCID: 0000-0003-3295-4637

Scopus Author ID: 57433852300

Богдана КОМАРИСТА

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри штучного інтелекту Навчально-наукового інституту прикладного системного аналізу, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056

ORCID: 0000-0001-9542-6597

Scopus Author ID: 26654832900

Микита ЖАВОРОНКОВ

аспірант кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерного навчально-наукового інституту імені Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, м. Запоріжжя, Україна, 69011

ORCID: 0009-0009-5396-8406

Ігор КАРЯКА

здобувач вищої освіти кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки Інженерного навчально-наукового інституту імені Ю.М. Потебні, Запорізький національний університет, вул. Університетська, 66, м. Запоріжжя, Україна, 69011

Бібліографічний опис статті: Белоконь, К., Кожемякін, Г., Бендюг, В., Комариста, Б., Жаворонков, М., Каряка, І. (2025). Дослідження способу термічного знешкодження високомінералізованих стічних вод промислових виробництв. Проблеми хімії та сталого розвитку, 3, 17–28, doi:

Одними з основних забруднювачів навколишнього природного середовища є високомінералізовані стічні води промислових підприємств. Цей вид рідких відходів забруднений такими мінеральними речовинами, як солі кальцію, натрію, магнію тощо. Попри широке впровадження оборотного водопостачання та нових маловідходних технологій, обсяг забруднених стічних вод залишається значним. Тому важливою проблемою є очищення рідких відходів від мінеральних забруднень. Запропоновано спосіб термічного знешкодження високомінералізованих рідких відходів промислових виробництв на проміжному твердому теплоносії, який є перспективним для застосування в металургійній, хімічній, вугільній, енергетичній та інших промислових галузях. Було створено лабораторну установку, що складається з електропідігрівача і випарної колони, в якій знаходиться інертний теплоносій у вигляді металевих куль. У роботі було досліджено гідродинамічний режим випарного апарату при знешкодженні високомінералізованих стічних вод на проміжному твердому теплоносії. Досліди були проведені на зернистій насадці з різними діаметрами куль 10 та 15 мм. У процесі випарювання вода подавалася циклічно зі швидкістю 2, 2,5 та 3 м/с. Внаслідок чого було виявлено, що гідрравлічний опір випарного апарату залежить від швидкості гарячого теплоносія та типу насадки (суха або мокра). Проведені лабораторні дослідження показали, що циклічне випарювання високомінералізованих стічних вод з використанням проміжного твердого теплоносія (металевих куль) дозволяє знижувати енергетичні витрати та ефективно вилучати мінеральні забруднення з води. Однак, утворення плівки солей на елементах завантаження знижує порізність шару і підвищує гідрравлічний опір. Для забезпечення ефективної роботи випарного апарату необхідно підтримувати оптимальний рівень порізності.

Ключові слова: рідкі відходи, стічні води, термічне знешкодження, розсоли, випарювання, випарні установки, проміжний теплоносій, гідрравлічний опір.

Urgency of the problem. One of the main challenges in modern industry is the development of measures to protect the environment from pollutants that enter water bodies and soils with industrial wastewater. In this regard, an important task is the treatment of industrial wastewater and the replenishment of fresh water resources through its purification. Despite the widespread implementation of water recycling systems and new low-waste technologies, the amount of contaminated industrial wastewater remains significant (Khanafar D. et al., 2024).

Common components of industrial wastewater are various mineral substances, such as calcium, sodium, and magnesium salts. They are formed either as a result of neutralization reactions involving acids and alkalis, which are frequently used in metallurgical production, or during the purification

of various gases (Hafiz Zahid Shafia et al., 2018). In addition, mineral contaminants enter wastewater through the contact of liquids with various products containing salts in a solid state or in solution. Mineralized solutions are also formed in systems for the treatment of industrial wastewater containing acids, alkalis, and organic compounds (Kumar Avinash et al., 2023).

The currently developed plants for purifying water from these substances produce solutions and sludges that, in a number of cases, cannot be discharged into natural sources and must be neutralized. The growth in the production of various industrial goods leads to an increase in the amount of mineralized wastewater discharged. This increases the concentration of salts in water bodies and soil, causing irreparable damage to the environment. Therefore, the problem of purifying

highly mineralized wastewater must be solved only by considering the utilization of the resulting brines.

It should be noted that the underground disposal of brines is associated with many negative consequences, some of which are already being observed, while others may manifest in the distant future. For example, due to the migration of groundwater and tectonic changes in the earth's crust, brines may appear in water intake wells located far from their injection site. Therefore, the best option when treating highly mineralized liquid waste is to obtain solid salts rather than highly concentrated brines, which is convenient for both transportation and disposal.

In ferrous metallurgy enterprises, the concentration of salts in water increases due to the use of soluble substances in metallurgical technology and water treatment, leaching in water processes, and evaporation in water supply systems. The main sources of highly mineralized liquid waste are water treatment plants (WTP); steam generators (blowdown water); pickling departments (rinse water after pickling and degreasing); mining and ore enterprises (quarry and mine water); and local water supply systems (blowdown water) (Ostapenko, N. et al., 2019).

The listed sources can be conditionally classified as sources with controlled discharge; besides them, there are uncontrolled ways of removing

salts from water supply systems – wind drift, filtration from hydraulic structures, removal with moist slag and sludge, and others (Iliev I. K. et al., 2023). Approximately 80% of the total amount of salts discharged in the industry as a whole, and about 60% at enterprises with a full metallurgical cycle, is removed through controlled discharge. A general characteristic of mineralized wastewater from ferrous metallurgy enterprises is given in Table 1.

The currently developed plants for purifying water from these substances produce solutions and sludges that, in a number of cases, cannot be discharged into natural sources and must be neutralized. The growth in the production of various industrial goods leads to an increase in the amount of mineralized wastewater discharged. This increases the concentration of salts in water bodies and soil, causing irreparable damage to the environment. Therefore, the problem of purifying highly mineralized wastewater must be solved only by considering the utilization of the resulting brines (Babich O. V. et al., 2022).

It should be noted that the underground disposal of brines is associated with many negative consequences, some of which are already being observed, while others may manifest in the distant future. For example, due to the migration of groundwater and tectonic changes in the earth's crust, brines may appear in water intake wells located far from their injection site. Therefore,

Table 1

General characteristics of mineralized liquid waste from ferrous metallurgy enterprises

Type of Wastewater, Source of Origin	Annual Discharge, million m ³	Share in Total Salt Discharge, %	Composition of Main Salt Components
Regeneration and rinse waters from sodium-cation filters	30	13.30 – 15.30	NaCl, CaCl ₂ , MgCl ₃
The same, hydrogen-cation filters	2	0.56 – 0.58	CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄
The same, ion-exchange desalinating units	3	1.10 – 1.15	CaSO ₄ , MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ SiO ₃
Blowdown waters of steam generators	40	5.60 – 7.70	Na ₂ SO ₄ , NaCl, Na ₂ CO ₃ , NaOH, Na ₂ SiO ₃ , Na ₃ PO ₄
Neutralized rinse waters after metal pickling	25	5.20 – 5.40	CaSO ₄ , Na ₂ SO ₄ , NaCl, CaCl ₂ , Ca(NO ₃) ₂ , NaNO ₃
Rinse waters after metal degreasing	5	0.56 – 0.77	Na ₂ CO ₃ , NaOH, Na ₃ PO ₄ , Na ₂ SiO ₃
Blowdown waters of local water supply systems	50	18.50 – 19.20	Na ₂ SO ₄ , NaCl, CaSO ₄ , Ca(HCO ₃) ₂ , Mg(HCO ₃) ₂
Quarry and mine waters of mining enterprises	150	51.80 – 53.70	NaCl, Na ₂ SO ₄ , CaSO ₄ , MgSO ₄ , K ₂ SO ₄ , Ca(HCO ₃) ₂ , Mg(HCO ₃) ₂

the best option when treating highly mineralized wastewater is to obtain not highly concentrated brines, but solid salts, which is convenient for both transportation and disposal (Reinvald B. S. et al., 2023, Yalova A. M. & Bondar N. V., 2024).

Analysis of recent research and publications.

Many scientists are engaged in research on water purification. Their work is aimed at increasing the efficiency of water treatment in various sectors of the economy.

To protect the environment from pollution by insufficiently treated wastewater, it has been proposed to improve the technology of coagulation water treatment, in particular, the use of the soda-lime method in natural water purification systems (Trofimenko M. O. et al., 2011). However, according to the authors of the study, the implementation of this technology is not possible without prior refinement in the wastewater treatment technology, which has a significant impact on the process efficiency.

The main problem is the presence of impurities in the wastewater that are not incorporated into the crystal structure of the precipitate during crystallization. These impurities require an additional amount of reagents compared to classic doses, which, in turn, increases the cost of the purification process. Considering this, the authors propose a new approach for a more accurate calculation of the required amount of reagents, particularly soda, when using the soda-lime method for treating wastewater with a high salt content.

The proposed formula takes into account the amount of magnesium contained in the wastewater and allows for an adjustment to calculate the additional dose of soda. This is particularly relevant when the magnesium content exceeds 10% of the calcium content in the water. Calculations based on this formula can significantly increase the accuracy of reagent dosing and, consequently, improve the efficiency of the water softening process.

An important aspect of the work is identifying the impact of additional magnesium impurities on the purification process, which helps to optimize technological parameters and reduce reagent costs. The authors emphasize that to achieve effective water purification, it is necessary to consider not only traditional parameters but also the specific properties of the wastewater, such as magnesium content.

The works of I. M. Trus et al. (Trus I. M. & Homelia D. M., 2021, Trus I. M. et al. 2020) are

dedicated to the development of methods for the stabilization treatment of low- and high-mineralized waters in baromembrane desalination processes to increase purification efficiency and extend the service life of membranes. The work considers the use of various membranes and reagents to improve the results of baromembrane water desalination.

Specifically, for the purification of low-mineralized waters and waters with a NaCl concentration of up to 10%, the authors recommend using the weakly acidic cation exchanger Dowex MAC-3. This cation exchanger effectively removes hardness ions, which improves water quality at the pre-treatment stage before membrane processes. However, for the desalination of highly mineralized waters with higher levels of mineralization, the authors suggest using the reverse osmosis membrane Filmtec TW30-1812-50, which provides effective salt removal from water. For the purification of low-mineralized waters, the nanofiltration membrane OPMN-P is more suitable.

One of the important aspects of the work is the treatment of concentrates formed during baromembrane purification processes. The authors recommend using reagent methods to reduce the mineralization of solutions to levels permissible for discharge into sewers or surface water bodies. This helps to reduce the environmental impact and facilitate the disposal of waste from baromembrane processes.

To achieve maximum purification efficiency, work (Salli V. S. et al., 2020) proposes the use of reverse osmosis, with a comprehensive pre-treatment process applied before the main desalination process. This complex includes the following stages: screening, coagulation, flocculation, softening, and sedimentation (settling) of water. This prepares the water for treatment by reverse osmosis membranes, which are vulnerable to high turbidity, the presence of chlorides, heavy metals, organic compounds, and hard water.

The application of such an approach significantly increases the efficiency of mine water purification, which allows for the evaluation of mine water not only as waste but also as a potential resource for further use. As a result, the proposed technology is of great importance for improving the environmental efficiency and economic benefits of mine water treatment, especially in the context of mine closures and the possibility of their preservation.

All these studies in the field of purification are important for improving the ecological state of water resources, reducing the impact on the environment, and increasing the efficiency of industrial processes (Bosiuk A. & Shestopalov O., 2023). The implementation of such technologies will help solve the problem of utilizing highly mineralized liquid waste and ensure the sustainable development of industrial enterprises, taking into account modern environmental standards (Strutynska, A. V. et al., 2009, Budenkova N. M. & Korchyk N. M., 2023).

However, the wide variety of salt compositions in wastewater and the differences in the capacity and intended purpose of treatment plants do not allow for the selection of a single universal purification method that could be applied with maximum economic efficiency in virtually any conditions.

Currently, a large number of different types of plants for the treatment of highly mineralized liquid waste have been created, differing from each other in the organization of the boiling process, the pressure at which the distillation process occurs, heat regeneration, the concentration factor of the purified water, the connection to the power plant cycle, the structural design, and a number of other features.

One attempt to increase the efficiency of treating concentrated solutions is associated with the creation of multi-stage plants in which the solution is heated or evaporated upon contact with hydrophobic heat carriers. The problem of scaling does not arise in such surface-free evaporation plants, as heat transfer in them occurs through direct contact between the heated heat carrier and the water being purified.

During preliminary experiments, good results were obtained when using granulated blast-furnace slag from the «Zaporizhstal» plant as a packing material for the maximum deposition of salts. The wastewater used was from the Zaporizhzhia Titanium-Magnesium Plant with a salt content of 12–15 g/L. The maximum possible amount of salts deposited in the bed was 20–23% of the packing weight. However, this packing has the following disadvantages: the difficulty of separating the precipitated salts from the slag; during the irrigation of the slag with the solution, it breaks down, and fine particles are carried away with the solution, leading to contamination of the effluent.

These disadvantages are substantially eliminated by using metal balls as the intermediate heat

carrier packing. They are convenient for processing in a ball mill and have good thermal conductivity. The mass of salt deposits is 8–10% of the packing mass.

The process of evaporating highly mineralized solutions can be divided into three stages: heating the balls with hot gas; irrigating the balls with the solution, which leads to their cooling and partial evaporation of the solutions; and evaporating the solution from the surface of the intermediate heat carrier. The limiting stages in terms of time and heat transfer conditions are the first and third.

Based on the research, a principal technological scheme for a plant for treating highly mineralized wastewater is proposed (Fig. 1). The intermediate heat carrier, consisting of metal balls with a diameter of 10–20 mm, is placed in a heating chamber on a grid.

Hot gas is supplied to the chamber, heating the bed of the granular intermediate heat carrier. The solution is supplied through nozzles in portions, as the packing dries. The application of the solution to the bed leads to its partial evaporation and the cooling of the balls. A film of crystals, covered by a layer of moisture, forms on the surface of the grains. As it dries, the layer of crystals grows. The amount of salts deposited on the solid intermediate heat carrier in one cycle is small, so the solution is applied several times. After this, the ball packing with the film of salt crystals is removed from the heating chamber and sent for mechanical processing in a ball mill. The extracted metal balls are returned to the desalination cycle after regeneration.

The heat transfer coefficient for this plant design is in the range of 80–120 W/m²·K. In plants with a fluidized bed, this coefficient is in the range of 65–100 W/m²·K. The energy consumption in this process is about 1600–1800 kJ/kg of evaporated moisture, and according to expert estimates, it could be around 550 kJ/kg of evaporated water in the future.

Thus, the above-considered plant for the treatment of highly mineralized wastewater is the most effective and promising, as it eliminates the disadvantages of plants with a liquid hydrophobic heat carrier, namely: metal balls, unlike a viscous heat carrier, are not difficult to separate from salt crystals; high intensity of heat exchange due to the high thermal conductivity of the heat carrier; the need to separate the heat carrier from the solution is eliminated.

The advantages of the plant are: high evaporation intensity with periodic solution feed; low energy consumption, as the largest layer of product builds up with periodic circulation; the metal balls do not break down and contaminate the effluent when irrigated with the solution; in the ball mill, the balls are not destroyed during cleaning from scale due to their strength; this treatment method allows the use of secondary low-potential energy resources.

The developed method for treating highly mineralized liquid waste is promising for application in various industries. The use of thermal treatment with an intermediate solid heat carrier can significantly increase the efficiency of the purification process, reduce energy costs, and minimize the environmental impact.

Results and discussion. To study the hydrodynamic processes of evaporating highly mineralized wastewater on an inert intermediate heat carrier, a laboratory setup was created, the scheme of which is shown in Fig. 2.

The laboratory setup consists of an electric heater 1 and an evaporation column 4, which contains an inert heat carrier 6 in the form of metal balls with a diameter of 10–15 mm. The supplied air is heated in the heater 1 and fed through a pipe 2 and a grid 5 into the chamber 4. The solution from the circulation tank 7, under pressure created by the air pump 10, is fed into the column 4, where part of it evaporates, and part flows down through the distribution chamber 3 and the hydraulic seal 8 into a measuring vessel 9. The water remaining

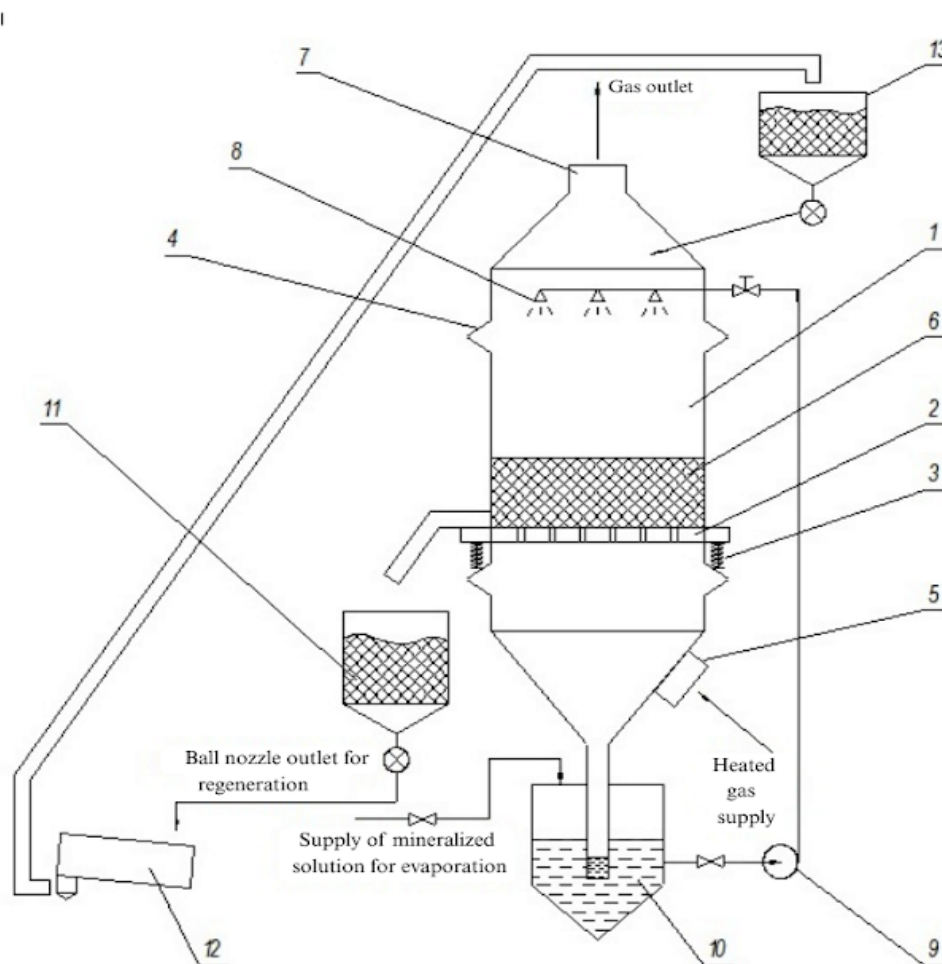


Fig. 1. Principal technological scheme for evaporating highly mineralized wastewater using an intermediate solid heat carrier
 1 – heating chamber;
 2 – support grate; 3 – springs; 4 – compensator; 5 – gas inlet pipe; 6 – ball nozzle; 7 – gas outlet pipe; 8 – irrigation system; 9 – pump; 10 – circulation tank; 11 – bunker for receiving balls for regeneration; 12 – ball mill; 13 – balls after regeneration

on the heat carrier is evaporated by the incoming heated air.

Air, preheated by an electric heater to a temperature of at least 200°C , is supplied to the heating chamber. The heated air, passing through the layer of balls, gives off heat and is discharged through a pipe. The heated air is supplied by a fan through the pipe until the air temperature at the outlet of the pipe is not less than 110°C and the average temperature of the packing is 140°C . The higher the temperature of the balls, the more intense the evaporation. With continuous heating of the intermediate heat carrier, after reaching the required temperature of the balls, we perform cyclic irrigation of the packing with the solution until the concentration of the solution at the outlet of the chamber is equal to or slightly exceeds the concentration of the solution at the inlet to the heating chamber. In this process, part of the water evaporates, part wets the packing, and the remaining water returns to the circulation tank. Under the action of the hot gaseous heat carrier, film evaporation of the mineralized solution first occurs, forming a salt scale on the surface of the metal balls, and then the balls of the solid heat carrier are heated. Then the process is repeated.

The study investigated the hydrodynamic regime of the evaporation apparatus during the treatment of highly mineralized wastewater on an

intermediate solid heat carrier. The experiments were conducted on a granular packing with different ball diameters of 10 and 15 mm. During the evaporation process, water was supplied cyclically at speeds of 2, 2.5, and 3 m/s. As a result, it was found that the hydraulic resistance of the evaporation apparatus depends on the speed of the hot heat carrier and the type of packing (dry or wet).

All controlled parameters during the experiment are recorded in Table 2. The dependence of the increase in the hydraulic resistance of the heat carrier bed on the gas flow velocity is presented in Fig. 3.

During the laboratory study, a dependency was observed – as the speed of the hot heat carrier increased, the hydraulic resistance of the evaporation apparatus also increased. Moreover, on balls with a diameter of 10 mm, the increase in resistance was greater than on the packing with a ball diameter of 15 mm. The porosity of the bed between balls with a diameter of 10 mm decreases faster than with a diameter of 15 mm as the speed of the hot heat carrier increases.

A dependence of the hydraulic resistance on the type of packing was also observed. The hydraulic resistance of the evaporation apparatus increases faster on wet packing than on dry packing. This is because when the balls are irrigated with the solution, the liquid fills the voids between the balls, which reduces the porosity of the bed and increases the hydraulic resistance.

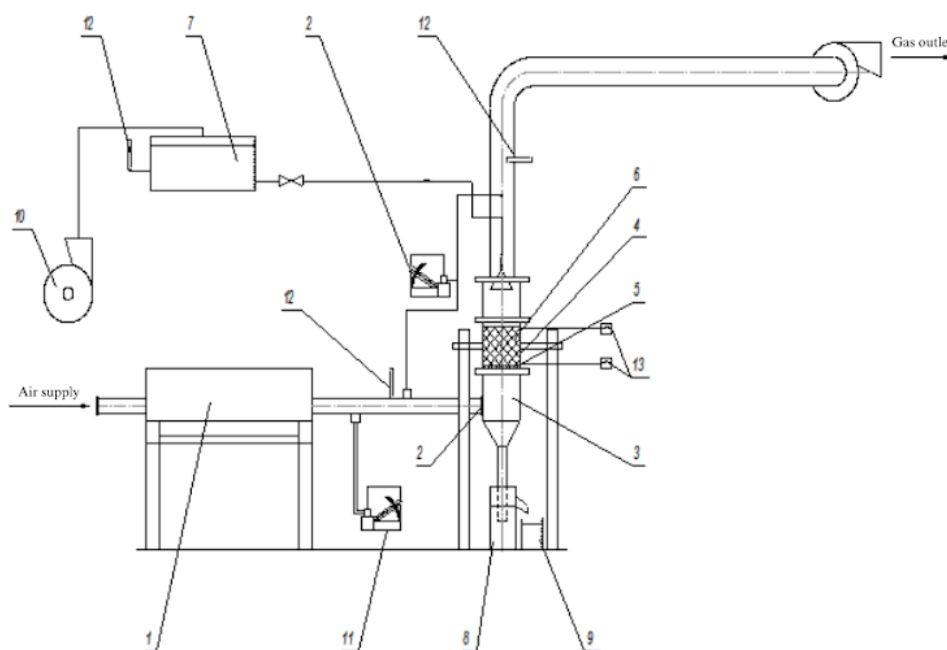


Fig. 2. Laboratory setup for evaporation of highly mineralized wastewater

Table 2

Results of experimental studies

№	Ball diameter, d, mm	Gas velocity, W_g , m/s	Nozzle Type	Hydraulic Resistance	
				Δp , Pa	Δp_a , Pa
1	10	2	dry	17	17
2			wet	20	25
3				22	
4				26	
5				28	
6				31	
7		2,5	dry	48	48
8			wet	54	81
9				67	
10				81	
11				98	
12				104	
13		3	dry	109	109
14			wet	127	176
15				153	
16				175	
17				203	
18				224	
19	15	2	dry	15	15
20			wet	18	23
21				21	
22				23	
23				25	
24				28	
25		2,5	dry	36	36
26			wet	42	62
27				51	
28				62	
29				73	
30				82	
31		3	dry	96	96
32			wet	105	147
33				127	
34				149	
35				163	
36				192	

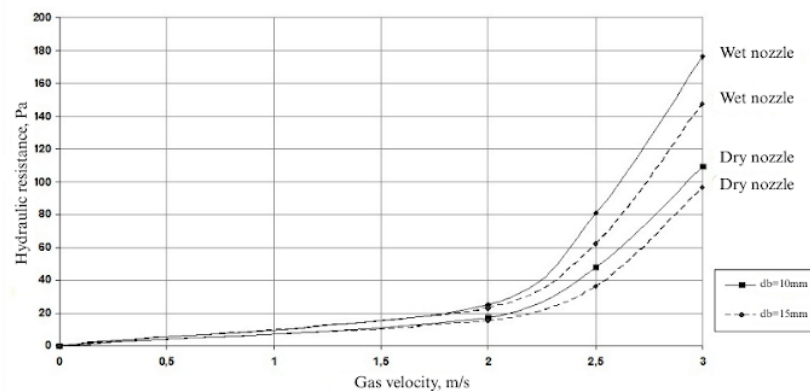


Fig. 3. Dependence of the growth of hydraulic resistance of the coolant layer on the gas flow rate

Overall, according to the research results, the cyclic evaporation of highly mineralized solutions on an intermediate solid heat carrier leads to the formation and growth of a salt film on the packing elements. Thus, the porosity of the bed decreases to a critical value, and the hydraulic resistance of the intermediate solid heat carrier increases. For the further effective operation of the evaporation apparatus, it is necessary that the porosity of the granular bed during the evaporation process be as large as possible above its critical value. Therefore, the intermediate solid heat carrier must be regenerated – removed from the apparatus and sent for mechanical processing to remove the salt layer. It is then reused for evaporation.

Conclusions and directions for future research. The creation of effective systems for treating industrial wastewater is important for many industries: metallurgical, chemical, coal, energy, and others. The wide variety of salt compositions in wastewater and the differences in the capacity and intended purpose of treatment plants do not allow for the selection of a single universal purification method.

The use of most traditional methods for treating highly mineralized liquid waste is usually associated with the need to solve a number of problems, the main ones being the disposal of highly concentrated brines, the high cost of desalination, and high energy consumption. However, the most promising method is thermal treatment using an intermediate

heat carrier and utilizing secondary low-potential energy resources. Thanks to this, the problem of scale formation is eliminated, as the technological process ensures the targeted deposition of salts on the packing bed.

As an intermediate heat carrier, it is most acceptable to use metal balls, as they are convenient for processing in a ball mill, have good thermal conductivity and strength. The main advantage of this method is the ability to extract mineral contaminants contained in wastewater in solid form, as well as the use of secondary low-potential energy resources as a heat carrier.

The main characteristics of the heat carrier that affect the hydrodynamic regime of the evaporation apparatus were considered. To study this regime of evaporating highly mineralized wastewater on an intermediate solid heat carrier, a laboratory setup was manufactured, and a methodology for conducting the evaporation process was determined. According to the research results, the cyclic evaporation of highly mineralized solutions on an intermediate solid heat carrier leads to the formation and growth of a salt film on the packing elements. Thus, the porosity of the bed decreases to a critical value, and the hydraulic resistance of the intermediate solid heat carrier increases. For the further effective operation of the evaporation apparatus, it is necessary that the porosity of the granular bed during the evaporation process be as far as possible above its critical value.

BIBLIOGRAPHY:

1. Daoud Khanafer, Ali Altaee, Alaa H. Hawari, John Zhou, Lilyan Alsaka. Innovative stimuli-responsive membrane MSF brine rejection dilution by tertiary treated sewage effluent. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 365. 121517. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121517>
2. Hafiz Zahid Shafia, Faizur-Rahmana, Syed M. Zubaira, Asif Matina, Omer Alnoord, Feras Kafiah, Arshad Mahmood. Concentrate management technologies for desalination processes leading to zero liquid discharge: technologies, recent trends and future outlook. *Desalination and Water Treatment*. 2018. Vol. 105. P. 92–118. doi: 10.5004/dwt.2018.22015
3. Kumar Avinash, A. Sudharshan Reddy, Swatantra P. Singh. Near-Zero Liquid Discharge for Wastewater Through Membrane Technology. *Energy, Environment, and Sustainability*. 2023. P. 447–477. DOI: 10.1007/978-981-99-2062-4_18
4. Остапенко Н., Бондаренко Л., Кириченко В. До питання поліпшення стану вод річки Дніпро шляхом обезсолення високомінералізованих шахтних вод. *Екологічний стан водних ресурсів України та перспективи забезпечення населення питною водою* : матеріали II міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпро, 2 лип. 2019 р. Дніпро, 2019. С. 26–29.
5. Iliev I. K., Chichirov A. A., Filimonova A. A., Chichirova N. D., Pechenkin A. V., Beloev I. H. Development of Hybrid Membrane Systems for Highly Mineralized Waste Utilization in the Power Industry. *Energies*. 2023. Vol. 16 (17). 6166. <https://doi.org/10.3390/en16176166>
6. Впровадження сучасних технологій локального очищення висококонцентрованих стічних вод для покращення екологічного стану водних об'єктів / О. В. Бабіч та ін. *Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. присвяч. 100-річчю ХНУМГ ім. О. М. Бекет., м. Харків, 7 лип. 2022 р. Харків, 2022. С. 25. URL: https://eprints.kname.edu.ua/62598/1/Conference_chemistry_2022_репоз.pdf#page=25

7. Рейнвальд Б. С., Шилін М. О., Горносталь С. А. Захист навколишнього середовища від забруднення недостатньо очищеними стічними водами. *Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements : IV International Scientific and Theoretical Conference*, м. Stockholm, 10 листоп. 2023 р. Stockholm, 2023. С. 96–98.
8. Ялова А.М., Бондар Н. В. Моніторинг коагуляційного очищення стічних вод процесів металургійного виробництва. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2024. Т. 173, № 2. С. 33–38. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-33-38>
9. Трофіменко М. О., Зеленська Л. О., Гаряга О. В. Екологічна експертиза процесу очищення високомінералізованих стічних вод хімцеха ТЕЦ. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2011. № 36(2). С. 229–234.
10. Трус І. М., Гомеля Д. М. Методи стабілізаційної обробки низько- та високомінералізованих вод в процесах її баромембранного опріснення. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021) : матеріали тез доп. XI Міжнар. науково-практ. конф.*, м. Чернігів, 26-27 трав. 2021 р. Чернігів, 2021. С. 133–135.
11. Розробка технологій опріснення високомінералізованих вод / І. М. Трус та ін. *Сучасний рух науки : тези доп. X міжнар. науково-практ. інтернет-конф.*, м. Дніпро, 2-3 квіт. 2020 р. Дніпро, 2020. С. 506–511.
12. Саллі В. С., Мамайкін О. Р., Хорольський А. О. Дослідження технології опріснення високо мінералізованих стічних вод, як складової продуктивних потоків вугільних шахт. *Геотехнічні проблеми розробки родовищ : Матеріали XVIII конф. молодих вчен.*, м. Дніпро, 8 жовт. 2020 р. Дніпро, 2020. С. 63–67.
13. Босюк А., Шестопапов О. Дослідження фізико-хімічних методів очищення стічних вод машинобудівного підприємства, які містять змащувально-охолоджувальні рідини. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2023. Т. 143, № 6. С. 49–59. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.6.6>
14. Струтинська А. В., Косоголова Л. О., Гаркава К. Г., Нежанківська В. Є. Сучасні підходи очищення стічної води біотехнологічних виробництв. II Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю (Екологія/Ecology 2009). *Збірник наукових статей*. Вінниця, 23-26 вересня 2009 року. Вінниця : ФОП Данилюк, 2009. С. 55–58.
15. Буденкова Н. М., Корчик Н. М. Вилучення окремих компонентів із супутніх вод нафтових родовищ. *Вісник НУВГП*. 2023. № 1 (101). С. 68–78. <https://doi.org/10.31713/vt120236>

REFERENCES:

1. Daoud Khanafer, Ali Altaee, Alaa H. Hawari, John Zhou, Lilyan Alsaka. (2024). Innovative stimuli-responsive membrane MSF brine rejection dilution by tertiary treated sewage effluent. *Journal of Environmental Management*, 365, 121517. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121517.
2. Hafiz Zahid Shafia, Faizur-Rahmana, Syed M. Zubaira, Asif Matina, Omer Alnoord, Feras Kafiah, Arshad Mahmood. (2018). Concentrate management technologies for desalination processes leading to zero liquid discharge: technologies, recent trends and future outlook. *Desalination and Water Treatment*, 105, 92–118. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22015>.
3. Kumar Avinash, A. Sudharshan Reddy, Swatantra P. Singh. (2023). Near-Zero Liquid Discharge for Wastewater Through Membrane Technology. *Energy, Environment, and Sustainability*, 447–477. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2062-4_18.
4. Ostapenko, N., Bondarenko, L., & Kyrychenko, V. (2019). Do pytannia polipshennia stanu vod richky Dnipro shliakhom obezsolennia vysokominealizovanykh shakhtnykh vod [Improving the water quality of the Dnieper River by desalinating highly mineralized mine water]. In *Ekolohichnyi stan vodnykh resursiv Ukrainy ta perspektyvy zabezpechennia naselennia pytnoiu vodoiu – Ecological state of water resources of Ukraine and prospects for providing the population with drinking water: Materialy II mizhnar. nauk.-prakt. konf.* (pp. 26-29). Dnipro [in Ukrainian].
5. Iliev, I. K., Chichirov, A. A., Filimonova, A. A., Chichirova, N. D., Pechenkin, A. V., Beloev, I. H. (2023). Development of Hybrid Membrane Systems for Highly Mineralized Waste Utilization in the Power Industry. *Energies*, 16 (17), 6166. <https://doi.org/10.3390/en16176166>.
6. Babich, O. V., et al. (2022). Vprovadzhenniasuchasnykh tekhnolohii lokalnoho ochyshchennia vysokokontsentrovanykh stichnykh vod dlia pokrashchennia ekolohichnoho stanu vodnykh ob'ektiv [Implementation of modern technologies for local purification of highly concentrated wastewater to improve the ecological state of water bodies]. In *Aktualni pytannia khimii ta integrovanykh tekhnolohii – Current issues of chemistry and integrated technologies: Materialy mizhnar. nauk.-prakt. konf. prysviach. 100-richchuu KhNUMH im. O. M. Beketova* (p. 25). Kharkiv. Retrieved from https://eprints.kname.edu.ua/62598/1/Conference_chemistry_2022_repoz.pdf#page=25 [in Ukrainian].
7. Reinvald, B. S., Shylyn, M. O., & Hornostal, S. A. (2023). Zakhyst navkolyshnoho seredovyshcha vid zabrudnennia nedostatno ochyshchenymy stichnymy vodamy [Protection of the environment from pollution by insufficiently treated wastewater]. In *Technologies and strategies for the implementation of scientific achievements: IV International Scientific and Theoretical Conference* (pp. 96-98). Stockholm [in Ukrainian].

8. Yalova, A. M., & Bondar, N. V. (2024). Monitoring koahuatsiinoho ochyshchennia stichnykh vod protsesiv metalurhiinoho vyrobnytstva [Monitoring of the coagulation purification of wastewater from metallurgical production processes]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnogo instytutu – Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, 173(2), 33–38. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-173-2-33-38> [in Ukrainian].
9. Trofimenko, M. O., Zelenska, L. O., & Hariaga, O. V. (2011). Ekolohichna ekspertyza protsesu ochyshchennia vysokomineralizovanykh stichnykh vod khimtsekha TETs [Environmental expertise of the process of purifying highly mineralized wastewater from the chemical workshop of a thermal power plant]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu – Collection of scientific papers of the National Mining University*, 36(2), 229–234 [in Ukrainian].
10. Trus, I. M., & Homelia, D. M. (2021). Metody stabilizatsiinoi obrobky nyzko- ta vysokomineralizovanykh vod v protsesakh yii baromembrannoho opresnennia [Methods of stabilization treatment of low- and highly-mineralized waters in the processes of their baro-membrane desalination]. In *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZIATPS – 2021) – Comprehensive quality assurance of technological processes and systems: Materialy tez dop. XI Mizhnar. nauково-prakt. konf.* (pp. 133–135). Chernihiv [in Ukrainian].
11. Trus, I. M., et al. (2020). Rozrobka tekhnolohii opresnennia vysokomineralizovanykh vod [Development of technologies for desalination of highly mineralized waters]. In *Suchasnyi rukh nauky – Modern science movement: Tezy dop. X mizhnar. nauково-prakt. internet-konf.* (pp. 506–511). Dnipro [in Ukrainian].
12. Salli, V. S., Mamaikin, O. R., & Khorolskyi, A. O. (2020). Doslidzhennia tekhnolohii opresnennia vysoko mineralizovanykh stichnykh vod, yak skladovoi produktyvnykh potokiv vuhilnykh shakht [Research into the technology of desalination of highly mineralized wastewater as a component of productive flows of coal mines]. In *Heotekhnichni problemy rozrobky rodovysch – Geotechnical problems of field development: Materialy XVIII konf. molodykh vchen.* (pp. 63–67). Dnipro [in Ukrainian].
13. Bosiuk, A., & Shestopalov, O. (2023). Doslidzhennia fizyko-khimichnykh metodiv ochyshchennia stichnykh vod mashynobudivnoho pidpriemstva, yaki mistiat zmaschuvalno-okholodzhualni ridyny [A study of physicochemical methods for the purification of wastewater from a machine-building enterprise containing lubricating and cooling fluids]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradsky National University*, 143(6), 49–59. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.6.6>
14. Strutynska, A. V., Kosoholova, L. O., Harkava, K. H., & Nezhankivska, V. Ye. (2009). Suchasni pidkhody ochyshchennia stichnoi vody biotekhnolohichnykh vyrobnytstv [Modern approaches to the purification of wastewater from biotechnological productions]. In *Zbirnyk naukovykh statei: II Vseukrainskyi z'ezd ekolohiv z mizhnarodnoi uchastiu (Ekolohiia/Ecology2009) – II All-Ukrainian Congress of Ecologists with International Participation (Ecology2009).* (pp. 55–58). FOP Danyliuk [in Ukrainian].
15. Budenkova, N. M., & Korchyk, N. M. (2023). Viluchennia okremykh komponentiv iz suputnykh vod naftovykh rodovysch [Extraction of certain components from produced water of oil fields]. *Visnyk NUVHP – Bulletin of the National University of Water Management and Environmental Management*, 1(101), 68–78. <https://doi.org/10.31713/vt120236> [in Ukrainian].

Стаття надійшла: 12.08.2025

Прийнято: 28.08.2025

Опубліковано:

УДК 556.3;502-047.44) (477.73)

DOI

Наталія ГНАТЮК*кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, вул. Інститутська, 1, м. Умань, Черкаська обл., Україна, 20301***ORCID:** 0000-0002-4159-9924

Бібліографічний опис статті: Гнатюк, Н. (2025). Екологічна оцінка підземних вод Кривоозерського району, Миколаївської області. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 29–35, doi:

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ПІДЗЕМНИХ ВОД КРИВООЗЕРСЬКОГО РАЙОНУ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ ЗА ВПЛИВУ ТОКСИКАНТІВ

У статті представлені результати комплексного дослідження підземних вод артезіанської свердловини № 104-Е, розташованої в смт Криве Озеро Кривоозерського району, Миколаївської області. Дослідження проводилося з метою оцінки якості води для господарсько-питного використання та визначення впливу токсикантів на водоносний горизонт у межах тріщинуватих гранітів докембрію. У статті детально описано географічне розташування свердловини, її технічні характеристики, конструкцію стовбура та устя, а також геологічний розріз, який включає п'ять основних літологічних шарів: суглинки, піски, щільну глину, водоносний тріщинуватий граніт і нижні слабо тріщинуваті граніти, що не мають суттєвого водоносного значення. Абсолютна відмітка гирла свердловини становить 87,0 м, статичний рівень води – 5,5 м, а динамічний рівень під час відкачки – 69,0 м, що свідчить про високий потенціал водоносного горизонту та його придатність для господарсько-питного водопостачання.

Проведено детальні фізико-хімічні, мікробіологічні та радіологічні дослідження води за 2021–2023 роки, які показали стабільну високу якість води та відповідність усіх показників ДСанПіН 2.2.4-171-10. Перевищень гранично допустимих концентрацій (ГДК) токсикантів та шкідливих речовин не виявлено. Рівні нітратів, нітритів, амонію, а також радіонуклідів (^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{137}Cs , ^{90}Sr) перебувають у межах природного фону або нормативних значень, що свідчить про відсутність суттєвого антропогенного забруднення водоносного горизонту. Мікробіологічні показники демонструють відсутність загальних коліформ, *E. coli* та патогенних ентеробактерій, при цьому загальна мікробна чисельність не перевищує гранично допустимі значення, що підтверджує безпечність води для споживання населення.

Особлива увага приділена експлуатаційним аспектам свердловини, включаючи оптимальні режими роботи насосного обладнання, профілактичне очищення та промивки насосів, а також створення зони санітарного захисту навколо свердловини. Ці заходи дозволяють забезпечити тривалу стабільність якості води та захистити водоносний горизонт від потенційного забруднення.

Перспективними напрямками подальших досліджень визначено регулярний моніторинг підземних вод для своєчасного виявлення змін у складі, зокрема динаміки накопичення токсикантів, впливу сезонних та кліматичних факторів на якість води, а також застосування біотестування для оцінки фітотоксичності та комплексної безпечності водних ресурсів. Реалізація цих заходів дозволить підтвердити безпечність води для господарсько-питного використання, оптимізувати режими експлуатації свердловини та розробити науково обґрунтовані рекомендації щодо охорони водоносних горизонтів Кривоозерського району, Миколаївської області.

Ключові слова: підземні води, артезіанська свердловина, якість води, токсиканти, Кривоозерський район, Миколаївська область, ДСанПіН 2.2.4-171-10, гідрогеологічні умови, радіологічні дослідження, мікробіологічні показники, моніторинг довкілля, господарсько-питне водопостачання.

Nataliia HNATIUK*Candidate of Biological Sciences, Associate Professor at the Department of Ecology and Life Safety, Uman National University, 1 Institut'skaya str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20301***ORCID:** 0000-0002-4159-9924

To cite this article: Hnatiuk, N. (2025). [Ecological assessment of groundwater in the Kryvoozerskyi district of the Mykolaiv region for the impact of toxicants]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 29–35, doi:

ECOLOGICAL ASSESSMENT OF GROUNDWATER IN THE KRIVOOZERSKY DISTRICT OF THE MYKOLAIV REGION FOR THE IMPACT OF TOXICANTS

The article presents the results of a comprehensive study of groundwater from artesian well No. 104-E, located in Kryve Ozero, Kryvoozerskyi District, Mykolaiv Oblast. The research aimed to assess the water quality for domestic and drinking purposes and to determine the impact of toxicants on the aquifer within the fractured Precambrian granite. The article provides a detailed description of the well's geographical location, technical characteristics, shaft and mouth design, as well as the geological section, which includes five main lithological layers: loams, sands, dense clay, fractured aquifer granite, and lower weakly fractured granites of negligible hydrogeological significance. The absolute elevation of the wellhead is 87.0 m, the static water level is 5.5 m, and the dynamic water level during pumping is 69.0 m, indicating a high potential of the aquifer and its suitability for domestic and drinking water supply.

*Detailed physicochemical, microbiological, and radiological studies of water from 2021–2023 were conducted, demonstrating consistently high water quality and compliance with all indicators of DSANPiN 2.2.4-171-10. No exceedances of the maximum permissible concentrations (MPC) of toxicants and harmful substances were detected. Nitrate, nitrite, ammonium, and radionuclide (^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{137}Cs , ^{90}Sr) levels are within natural background or regulatory limits, indicating the absence of significant anthropogenic contamination of the aquifer. Microbiological indicators show no total coliforms, *E. coli*, or pathogenic enterobacteria, while the total microbial count does not exceed permissible limits, confirming the water's safety for consumption.*

Special attention was given to operational aspects of the well, including optimal pump operation modes, preventive cleaning and flushing, and the establishment of a sanitary protection zone around the well. These measures ensure long-term stability of water quality and protect the aquifer from potential contamination.

Promising directions for further research include regular groundwater monitoring to detect changes in composition, particularly the dynamics of toxicant accumulation, the influence of seasonal and climatic factors on water quality, and the use of biotesting to evaluate phytotoxicity and overall safety of water resources. Implementing these measures will confirm the safety of water for domestic and drinking purposes, optimize well operation regimes, and provide scientifically based recommendations for aquifer protection in Kryvoozerskyi District, Mykolaiv Oblast.

Key words: groundwater, artesian well, water quality, toxicants, Kryvoozerskyi District, Mykolaiv Oblast, DSANPiN 2.2.4-171-10, hydrogeological conditions, radiological studies, microbiological indicators, environmental monitoring, domestic and drinking water supply.

Актуальність проблеми. Підземні води Кривоозерського району Миколаївської області є важливим джерелом водопостачання для населення та аграрного виробництва. Інтенсивне використання земель та техногенне навантаження спричиняють накопичення токсикантів у водних горизонтах. Забруднення підземних вод негативно впливає на здоров'я людей та стан екосистем регіону. Тому системна екологічна оцінка вод із визначенням рівня токсикантів є надзвичайно актуальною для забезпечення безпечного водопостачання та сталого природокористування, використання водних ресурсів у регіоні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кривоозерський район розташований в північно-західній частині Миколаївської області, а саме у зоні контакту Українського басейну тріщинних вод і Причорноморського артезіанського басейну.

Прогнозоване використання ресурсів підземних вод у 2021–2024 роках становило 11,10 тис. м³/добу. Водовідбір з працюючих свердловин складав: у 2021 році – 0,421 тис. м³/добу, у 2022 році – 0,447 тис. м³/добу,

у 2023 році – 0,398 тис. м³/добу, у 2024 році – 0,436 тис. м³/добу (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2021; 2022; 2023; 2024).

На території Миколаївської області досліджені родовища мінеральних вод різного типу на території м. Очаків, Вознесенськ, смт Криве Озеро, Врадіївка, Воскресенськ, Снігурівка, Галицинівка. Більша частина з них станом на 01.01.2021 не експлуатується (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2021).

В Кривоозерському районі мінеральні природно-столові води зараховані до кристалічних порід докембрію, води з мінералізацією 0,7–1,2 г/дм³, за хімічним складом гідрокарбонатно-сульфатно-хлоридні натрієво-магнієві. Тут також затверджені ДКЗ України запаси мінеральних природних столових вод (протокол № 1306 від 13.07.2007р.) та по родовищу «Кривоозерське-2» (протокол № 2317 від 27.07.2011 р.). Обидва родовища використовуються (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2022).

В Україні та в деяких інших країнах є відомою мінеральна магнієво-карбонатна та

сульфатно-хлоридно-гідрокарбонатна вода, реалізацією та розливом якої займається ЗАТ «Кривоозерська харчосмакова фабрика».

Воду видобувають з артезіанської свердловини, розробленої в 1984 році, яка має глибину 82 м та знаходиться в Північно-Західній частині Миколаївської області в межах Південно-Східного кордону Волино-Подільської височини (так званий український гранітний щит) в смт Кривому Озері.

Стан криничної питної води Кривоозерського району залишає бажати кращого. Основним джерелом забезпечення населення Кривоозерського району питною водою є підземні (грунтові та артезіанські) води, які добуваються на поверхню землі через свердловину або шахтний колодязь (ВСФ «Гідрогеосервіс» ТОВ, 2016).

У смт Кривому Озері для господарчо-питного водопостачання було виконано буріння 9 артезіанських свердловин. За висновками протоколів досліджень по бактеріологічним та фізико-хімічним показникам вода з цих свердловин відповідає вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (Макаренко, 2015).

Метою дослідження є комплексна оцінка санітарно-хімічних, радіаційних та

мікробіологічних показників води артезіанської свердловини №104-Е (смт Криве Озеро, Миколаївська область) для визначення її відповідності діючим санітарно-гігієнічним нормативам та придатності до використання у системі господарсько-питного водопостачання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розташування та технічна характеристика артезіанської свердловини № 104-Е. Дослідження підземних вод здійснювалося на базі артезіанської свердловини №104-Е, розташованої в межах смт Криве Озеро Кривоозерського району Миколаївської області. Географічні координати свердловини, визначені за допомогою GPS у системі WGS-84, становлять 47°56'14,5" пн. ш. та 30°21'23,7" сх. д. (з точністю до 1 секунди) (Рис. 1). Точна прив'язка свердловини до географічної основи картографічних матеріалів виконана також у системі СК-42 (ВСФ «Гідрогеосервіс» ТОВ, 2016).

Артезіанська свердловина № 104-Е призначена для господарсько-питного водопостачання населення. Її спорудження було обумовлене потребою у забезпеченні якісною питною водою домогосподарств частини селища. Буріння виконувалося у липні 2021 року за «Робочим проектом буріння експлуатаційної свердловини на

Масштаб 1:25 000



Рис. 1. Оглядова карта розташування артезіанської свердловини № 104-Е у межах Кривоозерського району Миколаївської області

водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних відкладів докембрію для господарчопитного водопостачання смт Криве Озеро» (ВСФ «Гідрогеосервіс» ТОВ). Відповідність технічної документації підтверджено експертним звітом № 16-1386-16 (Черкесов, 2016).

Проектна експлуатаційна глибина свердловини становить 82,0 м, тоді як пілотна (загальна) – 125,0 м. Буріння здійснювалося обертовим роторним способом із використанням бурової установки УРБ-2,5 АК, що відповідає загальноприйнятим методичним підходам до проходки свердловин у кристалічних породах (ДСанПіН..., 2010).

Геологічний розріз і конструкція артезіанської свердловини. Абсолютна відмітка гирла (устя) артезіанської свердловини 87,0 м. Згідно з результатами бурових робіт, у геологічному розрізі свердловини виділено п'ять основних літологічних шарів. У верхній частині (0–4 м) залягають суглинки, під якими розташований пісок (4–7 м). Далі спостерігається потужна товща щільної глини (7–31 м), що виконує роль водотривкого шару. Нижче розташований шар пісків (31–51 м), який поступово переходить у тріщинуваті кристалічні породи докембрію. Водоносний горизонт представлений тріщинуватим гранітом (51–82 м), що є основним джерелом підземних вод у межах цієї свердловини. На глибині 82–125 м залягає слабо тріщинуватий граніт, який не має суттєвого водоносного значення (Рис. 2).

Статичний рівень підземних вод зафіксовано на глибині 5,5 м від поверхні землі, а динамічний рівень під час дослідної відкачки – на глибині 69,0 м. Таким чином, артезіанська свердловина № 104-Е експлуатує водоносний горизонт у тріщинуватих гранітах докембрію, що підтверджує її значний потенціал для господарсько-питного водопостачання.

Гідрогеологічний висновок по артезіанській свердловині № 104-Е.

У результаті буріння артезіанської свердловини № 104-Е у межах смт Криве Озеро Кривоозерського району Миколаївської області було розкрито водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних відкладів докембрію. Водоносний шар представлений гранітами, які залягають у глибинах 51,0–82,0 м. Подібні геологічні умови характерні для території Українського кристалічного щита, де системи тріщин забезпечують формування та рух підземних вод (Черкесов, 2016; Держгеонадра України, 2015).

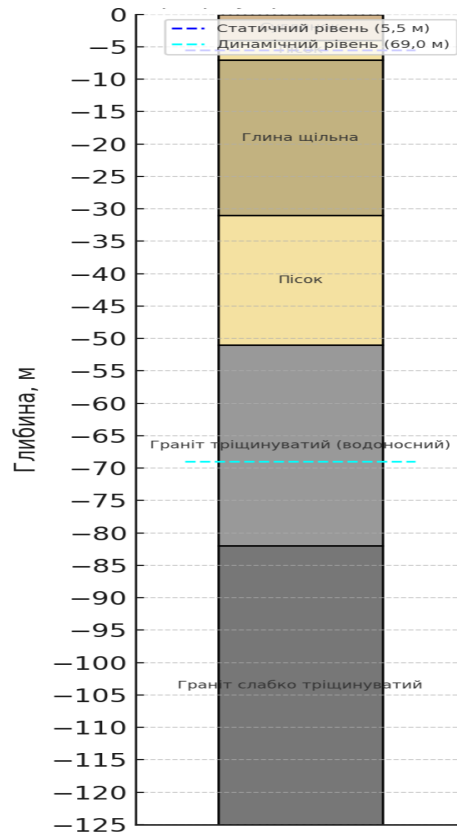


Рис. 2. Схема геологічного розрізу артезіанської свердловини № 104 Е

За результатами дослідно-фільтраційних робіт визначено, що **дебіт свердловини** становить 6,50 м³/год (156,0 м³/добу) при зниженні рівня води на 63,50 м. Розрахований **питомий дебіт** дорівнює 0,028 л/с, що свідчить про відносно невисоку водовіддачу тріщинуватих порід і потребує дотримання оптимальних режимів експлуатації для запобігання виснаженню джерела (Макаренко, 2015).

Аналіз результатів санітарно-хімічних та мікробіологічних досліджень води із артезіанської свердловини № 104-Е (2021 та 2023 рр.) свідчить про її загальну придатність для господарсько-питного водопостачання.

За органолептичними показниками вода характеризується відсутністю запаху та присмаку, що відповідає вимогам Державних санітарних правил і норм ДСанПіН 2.2.4-171-10.

Фізико-хімічні параметри у 2021 р. (рН – 7,40; загальна жорсткість – 5,0 ммоль/дм³; сухий залишок – 808 мг/дм³) та у 2023 р. (аналогічні значення) свідчать про стабільність складу води. Вміст основних макро– та мікрокомпонентів (кальцій, магній, натрій, калій,

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники якості води

Показник	2021 рік (Лаб. гігієни та екології води)	2023 рік (Кривоозерське РЛВ МОЗ)	ГДК (ДСанПіН 2.2.4-171-10)
Водневий показник, рН	7,40	—	6,5–8,5
Залізо, мг/дм ³	0,11	—	≤ 0,2
Загальна жорсткість, ммоль/дм ³	5,00	—	≤ 7,0
Кальцій, мг/дм ³	40,08	—	≤ 140
Магній, мг/дм ³	36,48	—	≤ 85
Натрій, мг/дм ³	170,0	—	≤ 200
Калій, мг/дм ³	6,1	—	≤ 20
Лужність загальна, ммоль/дм ³	5,20	—	≤ 6,5
Гідрокарбонати, мг/дм ³	317,2	—	≤ 400
Карбонати	відсутні	—	—
Сульфати, мг/дм ³	232,9	—	≤ 500
Хлориди, мг/дм ³	91,02	—	≤ 250
Сухий залишок, мг/дм ³	808	—	≤ 1000
Нітрати, мг/дм ³	0,55	—	≤ 50
Нітрити, мг/дм ³	<0,003	—	≤ 0,5
Амоній, мг/дм ³	<0,05	—	≤ 0,5

сульфати, хлориди, нітрати та нітрити) знаходиться в межах нормативів, встановлених ГОСТ 2874-82 «Вода питна» та ДСанПіН.

Особливо важливим є низький вміст токсикантів: концентрація нітратів не перевищує 0,55 мг/дм³, нітрити та амоній – на межі визначення (<0,003 та <0,05 мг/дм³ відповідно). Це свідчить про відсутність антропогенного забруднення нітратами, що характерне для підземних вод захищених водоносних горизонтів.

За результатами досліджень від 20 липня 2021 року у воді артезіанської свердловини № 104-Е було визначено питому активність радіонуклідів (²²⁶Ra, ²²²Rn, ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr). Отримані значення не перевищують контрольних рівнів, рекомендованих для питної води відповідно до міжнародних та національних нормативів (WHO, IAEA). Зокрема, питома активність ²²⁶Ra та ²²²Rn, які можуть мати найбільший вплив на здоров'я населення через довготривале споживання, знаходиться в межах природного фону для підземних вод регіону. Радіоцезій (¹³⁷Cs) та радіостронцій (⁹⁰Sr) у воді виявлені на рівні, що не перевищує допустимих концентрацій, встановлених після аварії на ЧАЕС для питних джерел. За радіаційними показниками вода зі свердловини № 104-Е може вважатися безпечною для господарсько-питного використання.

Таким чином, артезіанська свердловина № 104-Е забезпечує стабільні показники якості питної води, які відповідають санітарним нормам

та свідчать про відсутність суттєвого техногенного навантаження на водоносний горизонт.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Результати лабораторних досліджень підземних вод за 2021 та 2024 роки свідчать про стабільно високу якість води артезіанської свердловини № 104-Е. Проведений комплекс фізико-хімічних та мікробіологічних аналізів показав, що всі досліджувані показники перебувають у межах, визначених ДСанПіН 2.2.4-171-10, а перевищень гранично допустимих концентрацій (ГДК) токсичних та шкідливих речовин не виявлено. Це дозволяє зробити висновок, що вода з даної свердловини є безпечною для господарсько-питного використання та відповідає сучасним стандартам якості питної води.

Проте, незважаючи на позитивні результати, необхідне проведення регулярного моніторингу підземних вод з метою своєчасного виявлення можливих змін у їх складі, пов'язаних із антропогенним навантаженням або природними коливаннями гідрогеологічних умов. Перспективними напрямками подальших досліджень є оцінка динаміки накопичення токсикантів, вивчення впливу сезонних змін та кліматичних факторів на якість води, а також застосування біотестування для комплексної оцінки фітотоксичності та безпечності водних ресурсів. Такі дослідження дозволять не лише підтвердити безпечність води для населення, а й розробити ефективні рекомендації щодо її раціонального використання та охорони водоносних горизонтів Кривоозерського району.

ЛІТЕРАТУРА:

1. ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Київ : МОЗ України, 2010. 68 с.
2. Методичні рекомендації щодо організації санітарних зон охорони джерел централізованого водопостачання. Київ : МОЗ України, 2014. 54 с.
3. Герасимов І.П. Гідрогеологія України. Київ : Вища школа, 2012. 420 с.
4. Черкесов Г.Д. Гідрогеологічні умови кристалічних водоносних горизонтів Українського щита. Одеса : Астропринт, 2016. 312 с.
5. Методичні рекомендації щодо проведення дослідно-фільтраційних випробувань свердловин на воду. Київ : Держгеонадра України, 2015. 47 с.
6. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. Київ : МОЗ України, 2010. 68 с.
7. ДСТУ 8724:2022. Географічні інформаційні системи. Геодезичні координати (WGS-84 та СК-42). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 35 с.
8. Робочий проєкт буріння експлуатаційної свердловини на водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних відкладів докембрію для господарчо-питного водопостачання смт Криве Озеро Кривоозерського району Миколаївської області. ВСФ «Гідрогеосервіс» ТОВ, 2016. Експертний звіт №16-1386-16 від 21.07.2016 р.
9. Водозабірні свердловини: довідник / за ред. О.В. Макаренка. Київ : Ліра-К, 2015. 240 с.
10. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2021 році. Миколаїв : 2022. С. 30–145. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2021/Миколаївська_доповідь_2021.pdf
11. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2022 році. Миколаїв : 2023. С. 28–120. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2022/Миколаївська_доповідь_2022.pdf
12. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2023 році. Миколаїв : 2024. С. 25–110. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2023/Миколаївська_доповідь_2023.pdf
13. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2024 році. Миколаїв : 2025. С. 30–115. URL: https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2024/Миколаївська_доповідь_2024.pdf

REFERENCES:

1. Ministry of Health of Ukraine. (2010). DSANPiN 2.2.4-171-10 «Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoї dlia spozhyvannia liudynoi» (Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption). Kyiv, Ukraine: Ministry of Health of Ukraine.
2. Ministry of Health of Ukraine. (2014). Metodychni rekomendatsii shchodo orhanizatsii sanitarno-zon okhorony dzherel tsentralizovanoho vodopostachannia (Methodical recommendations for organizing sanitary protection zones of centralized water supply sources). Kyiv, Ukraine: Ministry of Health of Ukraine.
3. Herasymov, I.P. (2012). Hidroheolohiia Ukrainy (Hydrogeology of Ukraine). Kyiv, Ukraine: Vyshcha Shkola.
4. Cherkesov, H.D. (2016). Hidroheolohichni umovy krystalichnykh vodonosnykh horyzontiv Ukrainskoho shchyta (Hydrogeological conditions of crystalline aquifers of the Ukrainian Shield). Odesa, Ukraine: Astroprint.
5. Derzhheonadra Ukrainy (State Service of Geology and Subsoil of Ukraine). (2015). Metodychni rekomendatsii shchodo provedennia doslidno-filtratsiinykh vyprobuvan' sverdlovyn na vodu (Methodical recommendations for experimental filtration testing of water wells). Kyiv, Ukraine.
6. МОЗ України. (2010). DSANPiN 2.2.4-171-10. Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoї dlia spozhyvannia liudynoi (Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption). Kyiv, Ukraine: Ministry of Health of Ukraine.
7. DP "UkrNDNC" (State Enterprise "UkrNDNC"). (2022). DSTU 8724:2022. Neohrafichni informatsiini systemy. Neodezyini koordynaty (WGS-84 ta SK-42) (Geographical information systems. Geodetic coordinates (WGS-84 and SK-42)). Kyiv, Ukraine.
8. VSF "Hydrogeoservice" TOV (Private Enterprise "Hydrogeoservice" LLC). (2016). Robochyi proiekt burinnia eksploatatsiinoї sverdlovyny na vodonosnyi horizont u trishchynuvatii zoni krystalichnykh vidkladiv dokembriiu dlia hospodarcho-pytnoho vodopostachannia smt Kryve Ozero Kryvoozerskoho raionu Mykolaivskoi oblasti (Working project for drilling an exploitation well into the fractured zone of crystalline Precambrian deposits for water supply). Expert report No. 16-1386-16 from 21.07.2016.

9. Makarenko, O.V. (Ed.). (2015). Vodozabirni sverdlovyny: Dovidnyk (Water intake wells: Handbook). Kyiv, Ukraine: Lira-K.

10. Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine). (2022). Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Mykolaivskii oblasti u 2021 rotsi (Regional report on the state of the environment in Mykolaiv region in 2021). Mykolaiv, Ukraine. Retrieved from https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2021/Миколаївська_доповідь_2021.pdf

11. Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine). (2023). Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Mykolaivskii oblasti u 2022 rotsi (Regional report on the state of the environment in Mykolaiv region in 2022). Mykolaiv, Ukraine. Retrieved from https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2022/Миколаївська_доповідь_2022.pdf

12. Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine). (2024). Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Mykolaivskii oblasti u 2023 rotsi (Regional report on the state of the environment in Mykolaiv region in 2023). Mykolaiv, Ukraine. Retrieved from https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2023/Миколаївська_доповідь_2023.pdf

13. Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy (Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine). (2025). Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyscha v Mykolaivskii oblasti u 2024 rotsi (Regional report on the state of the environment in Mykolaiv region in 2024). Mykolaiv, Ukraine. Retrieved from https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2024/Миколаївська_доповідь_2024.pdf

Стаття надійшла: 26.08.2025

Прийнято: 08.09.2025

Опубліковано:

УДК 504.05

DOI

Владислав ПАРАХНЕНКО

доктор філософії з Наук про Землю, старший викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська область, Україна, 20300
ORCID: 0000-0002-4312-6194

Віталій ГОНЧАРУК

кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська область, Україна, 20300
ORCID: 0000-0002-3977-3612

Бібліографічний опис статті: Парахненко, В., Гончарук, В. (2025). Механізми державного природоохоронного інспектування для захисту природних ландшафтів та екологічної безпеки. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 36–40, doi:

МЕХАНІЗМИ ДЕРЖАВНОГО ПРИРОДООХОРОННОГО ІНСПЕКТУВАННЯ ДЛЯ ЗАХИСТУ ПРИРОДНИХ ЛАНДШАФТІВ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

У статті досліджуються сучасні механізми державного природоохоронного інспектування як важливого інструменту забезпечення захисту природних ландшафтів та підтримання екологічної безпеки в Україні. Підкреслено, що екологічні загрози, зумовлені інтенсивною господарською діяльністю, урбанізацією, воєнними діями та наслідками глобальних кліматичних змін, зумовлюють потребу у вдосконаленні системи контролю за дотриманням природоохоронного законодавства. Розкрито сутність державного природоохоронного інспектування як інституційно-правового механізму, що поєднує правові, адміністративні, організаційні та екологічні інструменти впливу на суб'єктів господарювання й органи місцевого самоврядування.

Звертається увага на роль Державної екологічної інспекції України у запобіганні порушенням у сфері охорони довкілля, своєчасному виявленні негативних екологічних процесів, а також у контролі за станом земельних, водних, лісових і заповідних ресурсів. Проаналізовано сучасні проблеми ефективності інспектування, серед яких: недостатність фінансування та технічного забезпечення, кадрові труднощі, фрагментарність законодавства, а також недосконалість механізмів взаємодії з іншими органами державної влади. Особливо наголошено на необхідності впровадження європейських стандартів екологічного контролю та моніторингу, цифровізації процесів перевірки й автоматизації збору екологічних даних.

Особлива увага приділяється питанню збереження та відновлення природних ландшафтів як базової складової національної екологічної політики. Визначено, що природоохоронне інспектування має виконувати не лише каральну функцію, але й превентивну та просвітницьку, формуючи у суспільства та суб'єктів господарювання усвідомлене ставлення до збереження довкілля. Показано, що вдосконалення інспекційної діяльності сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки, раціональному використанню природних ресурсів та формуванню екологічно відповідальної моделі державного управління.

Таким чином, державне природоохоронне інспектування розглядається як комплексний механізм, здатний забезпечити інтеграцію інтересів держави, суспільства та бізнесу у сфері охорони довкілля. Подальший розвиток цієї системи передбачає зміцнення правової бази, впровадження інноваційних підходів до екологічного моніторингу, а також активізацію міжнародного співробітництва для наближення України до європейських екологічних стандартів.

Ключові слова: державне природоохоронне інспектування, екологічна безпека, захист довкілля, ландшафтна екологія, державне управління, екологічний моніторинг, сталий розвиток, екологічна політика, охорона природи.

Vladislav PARAKHNENKO

Doctor of Philosophy in Earth Sciences, Senior Lecturer at the Department of Chemistry and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300
ORCID: 0000-0002-4312-6194

Vitaliy GONCHARUK

Candidate of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Chemistry and Ecology, Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova str., Uman, Cherkasy region, Ukraine, 20300
ORCID: 0000-0002-3977-3612

To cite this article: Parakhnenko, V., Goncharuk, V. (2025). Mekhanizmy derzhavnoho pryrodookhoronnoho inspektuvannia dlia zakhystu pryrodnykh landshaftiv ta ekolohichnoi bezpeky [Mechanisms of state environmental inspection for the protection of natural landscapes and ecological safety]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 36–40, doi:

MECHANISMS OF STATE ENVIRONMENTAL INSPECTION FOR THE PROTECTION OF NATURAL LANDSCAPES AND ECOLOGICAL SAFETY

The article examines modern mechanisms of state environmental inspection as an important tool for ensuring the protection of natural landscapes and maintaining environmental safety in Ukraine. It is emphasised that environmental threats caused by intensive economic activity, urbanisation, military actions and the effects of global climate change necessitate improvements to the system for monitoring compliance with environmental legislation. The essence of state environmental inspection as an institutional and legal mechanism that combines legal, administrative, organisational and environmental instruments of influence on economic entities and local self-government bodies is revealed.

Attention is drawn to the role of the State Environmental Inspection of Ukraine in preventing violations in the field of environmental protection, timely detection of negative environmental processes, as well as in monitoring the state of land, water, forest and protected resources. The current problems of inspection effectiveness are analysed, including insufficient funding and technical support, staffing difficulties, fragmented legislation, and imperfect mechanisms for interaction with other state authorities. Separate emphasis is placed on the need to implement European standards of environmental control and monitoring, digitisation of inspection processes, and automation of environmental data collection.

Particular attention is paid to the issue of preserving and restoring natural landscapes as a basic component of national environmental policy. It is determined that environmental inspection should perform not only a punitive function, but also a preventive and educational one, forming a conscious attitude towards environmental conservation in society and economic entities. It is shown that improving inspection activities will contribute to increasing the level of environmental safety, rational use of natural resources and the formation of an environmentally responsible model of public administration.

Thus, state environmental inspection is seen as a comprehensive mechanism capable of ensuring the integration of the interests of the state, society and business in the field of environmental protection. Further development of this system involves strengthening the legal framework, introducing innovative approaches to environmental monitoring, and intensifying international cooperation to bring Ukraine closer to European environmental standards.

Key words: *state environmental inspection, environmental safety, environmental protection, landscape ecology, public administration, environmental monitoring, sustainable development, environmental policy, nature conservation.*

Актуальність проблеми. У сучасних умовах розвитку українського суспільства питання захисту довкілля та забезпечення екологічної безпеки набувають виняткового значення. Антропогенний тиск на природні ландшафти, спричинений інтенсивною господарською діяльністю, урбанізаційними процесами, воєнними діями та глобальними кліматичними змінами, призводить до деградації екосистем, зниження біорізноманіття та погіршення якості життя населення. Водночас ефективність державної політики у сфері охорони довкілля

значною мірою залежить від дієвості механізмів державного природоохоронного інспектування як ключового інструменту реалізації екологічного законодавства.

Особливої актуальності досліджувана проблема набуває у контексті євроінтеграційних прагнень України, що зумовлює необхідність гармонізації національних екологічних стандартів із вимогами Європейського Союзу. Недосконалість існуючої системи екологічного контролю, кадрові та фінансові обмеження, недостатній рівень цифровізації та відкритості

діяльності Державної екологічної інспекції України потребують вироблення нових підходів до організації та здійснення інспекційної діяльності.

Збереження природних ландшафтів як складової національного багатства та основи сталого розвитку можливе лише за умови належного функціонування системи державного природоохоронного контролю. Це обумовлює необхідність наукового аналізу сучасних механізмів інспектування, виявлення їхніх сильних та слабких сторін, а також пошуку ефективних інструментів удосконалення, що забезпечать підвищення рівня екологічної безпеки країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Проблематика державного екологічного контролю та інспектування є предметом досліджень багатьох українських і зарубіжних науковців. Зокрема, у працях Андрейцева В. І., Костицького В. В., Шемшученка Ю. С., Каракаша І. І. розкрито правові засади державного управління у сфері охорони довкілля та екологічної безпеки. Гетьман А. П. і Лазарєв М. І. акцентують увагу на сучасних викликах у сфері природоохоронної діяльності та потребі реформування екологічної інспекції. У працях Ситника Г. П. та Василенка В. А. досліджується зв'язок державної політики у сфері національної безпеки із проблемами захисту довкілля та забезпечення сталого розвитку.

Окремі наукові публікації присвячені аналізу адміністративно-правових механізмів діяльності Державної екологічної інспекції України, ролі екологічного моніторингу та процедурних аспектів інспектування (Дутка Г. В., Яковлев В. А.). Водночас у науковому дискурсі бракує комплексних досліджень, які б інтегрували правові, управлінські та екологічні підходи до формування ефективної системи державного природоохоронного інспектування з урахуванням сучасних викликів – військових, економічних і кліматичних. Саме це зумовлює потребу у ґрунтовному науковому аналізі зазначеної проблематики.

Мета дослідження є дослідження механізмів державного природоохоронного інспектування як інструменту захисту природних ландшафтів та забезпечення екологічної безпеки, визначення їхніх сучасних проблем і недоліків, а також вироблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо удосконалення системи екологічного

контролю в Україні відповідно до міжнародних стандартів та європейських практик.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Ефективність державного природоохоронного інспектування безпосередньо залежить від комплексності підходів до його організації та здатності інтегрувати правові, екологічні й управлінські інструменти. Основним завданням інспекційної діяльності є забезпечення дотримання екологічного законодавства, своєчасне виявлення порушень та притягнення до відповідальності суб'єктів господарювання, що здійснюють негативний вплив на довкілля (Andreitsev, 2016).

У сучасних умовах особливої актуальності набуває питання захисту природних ландшафтів, які є ключовим елементом екосистемної стабільності та екологічної безпеки країни (Hetman, 2015). Антропогенний тиск, пов'язаний із промисловим виробництвом, урбанізацією та аграрним освоєнням територій, призводить до деградації ландшафтів, втрати біорізноманіття та порушення природних екологічних функцій (Karakash, 2017).

Державне природоохоронне інспектування виконує не лише контрольну, а й превентивну функцію, оскільки своєчасний моніторинг і реагування на екологічні загрози дають змогу мінімізувати негативні наслідки для населення та природного середовища (Vasylenko, 2018). Особливе значення має інтеграція інспекційної діяльності із системою державної екологічної політики та національної безпеки (Sytnyk, 2018).

Важливою складовою інспектування є дотримання принципу прозорості й публічності, що відповідає європейським стандартам екологічного управління (Shyemshuchenko & Kostytskyi, 2013). Це сприяє підвищенню довіри з боку громадськості та формуванню партнерських відносин між державними органами, бізнесом і суспільством.

У наукових публікаціях останніх років наголошується на необхідності модернізації правового регулювання діяльності Державної екологічної інспекції України та впровадження інноваційних механізмів контролю, зокрема цифровізації процесів моніторингу та використання геоінформаційних систем (Lazarev, 2020). Також пропонується активніше застосовувати інструменти екологічного аудиту та міжнародні практики оцінки впливу на довкілля (Yakoviev, 2021).

З урахуванням викликів воєнного часу особливої ваги набуває контроль за дотриманням вимог екологічної безпеки в зонах техногенних ризиків, на територіях, що зазнали радіаційного або хімічного забруднення (Honcharuk, Parakhnenko, Yurovchuk & Sopov, 2025). Це потребує посилення кадрового, матеріального та наукового забезпечення інспекційної діяльності, а також розширення міжнародного співробітництва у сфері захисту довкілля (Dutka, 2019).

Отже, сучасна модель державного природоохоронного інспектування повинна ґрунтуватися на інтегрованому підході, який поєднує правові, управлінські та технологічні механізми. Це дозволить не лише забезпечити належний захист природних ландшафтів, а й створити передумови для підвищення рівня екологічної безпеки держави та реалізації принципів сталого розвитку (Yakoviev, 2021).

Висновки і перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження засвідчило, що державне природоохоронне інспектування є ключовим механізмом забезпечення екологічної безпеки та збереження природних ландшафтів. Воно виконує низку функцій: контрольну, превентивну, аналітичну та інформаційно-просвітницьку. Ефективність інспекційної діяльності значною мірою залежить від узгодженості правового регулювання, рівня інституційної спроможності державних органів та впровадження сучасних технологій екологічного моніторингу.

Установлено, що особливої уваги потребують питання інтеграції інспекційної діяльності у систему державної екологічної політики та національної безпеки, а також удосконалення

правових засад функціонування Державної екологічної інспекції України. Наголошено на важливості адаптації національних стандартів до європейських вимог у сфері екологічного управління, що сприятиме прозорості контролю, підвищенню довіри громадськості та розвитку партнерства між державою, бізнесом і суспільством (Парахненко, Гончарук, 2025).

Окремим викликом залишаються наслідки воєнних дій, що супроводжуються масштабним руйнуванням природних ландшафтів, забрудненням ґрунтів, водних об'єктів і атмосферного повітря. Це актуалізує завдання зміцнення кадрового та матеріально-технічного потенціалу екологічних інспекцій, а також впровадження сучасних інструментів цифрового моніторингу, дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем (Парахненко, Кисельов, Рудий, 2024).

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою інноваційних механізмів державного екологічного контролю, інтеграцією міжнародних практик екологічного аудиту, вивченням новітніх підходів до оцінки ризиків для довкілля у зонах техногенних і воєнних загроз, а також із пошуком оптимальних моделей взаємодії органів державної влади, наукових установ і громадських організацій у сфері екологічної безпеки.

Таким чином, державне природоохоронне інспектування потребує не лише збереження, а й системного оновлення, щоб відповідати сучасним викликам і стати дієвим інструментом захисту природних ландшафтів та забезпечення сталого розвитку України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Андрейцев В. І. Правові засади державного контролю у сфері охорони довкілля. *Право України*. 2016. № 9. С. 45–52.
2. Бондаренко С. В., Шевченко О. А. Сучасні механізми державного управління у сфері екологічної безпеки. *Екологічні науки*. 2020. № 2(31). С. 33–40.
3. Василенко В. А. Екологічна безпека як пріоритет державної екологічної політики України. *Науковий вісник публічного та приватного права*. 2018. Вип. 3. С. 122–129.
4. Гетьман А. П. Державне управління у сфері охорони навколишнього природного середовища: сучасний стан та перспективи. *Вісник Національної юридичної академії України імені Ярослава Мудрого*. 2015. № 2. С. 77–83.
5. Гончарук В. В., Парахненко В. Г., Юровчик В. Г., Сопов Д. С., Сопова Н. В. Управління екологічною безпекою України: виклики сьогодення та наслідки антропогенних змін ландшафтів. *Екологічні науки*. 2025. № 1(58). С. 44–48.
6. Дутка Г. В. Адміністративно-правові засади діяльності Державної екологічної інспекції України. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2019. № 6. С. 211–215.
7. Каракаш І. І. Проблеми правового забезпечення екологічної безпеки України в умовах глобалізації. *Часопис Київського університету права*. 2017. № 1. С. 112–117.
8. Лазарев М. І. Природоохоронне інспектування як елемент державного екологічного контролю. *Екологічна безпека та природокористування*. 2020. № 2(34). С. 55–62.

9. Парахненко В. Г., Гончарук В. В. Методологія та організація екологічних досліджень у системі ландшафтно-екології та радіоекологічного моніторингу територій, забруднених радіонуклідами. *Environmental Problems «Екологічні проблеми»*. Львів. 2025. Т. 10. № 2. С. 119–126.
10. Парахненко В. Г., Кисельов Ю. О., Рудий Р. М. Вплив інвазійних рослин на точність геодезичних вимірювань. *Наука і техніка сьогодні: (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»)*. 2024. Вип. 9(37). С. 742–753.
11. Ситник Г. П. Державна політика у сфері національної безпеки та охорони довкілля: взаємозв'язок та перспективи. *Стратегічна панорама*. 2018. № 1. С. 89–96.
12. Шемшученко Ю. С., Костицький В. В. Екологічне право і державне управління охороною навколишнього природного середовища. *Вісник Академії правових наук України*. 2013. № 4. С. 25–33.
13. Яковлев В. А. Інституційні засади державного екологічного контролю в Україні. *Екологічне право України: теорія і практика*. 2021. № 1. С. 140–147.

REFERENCES:

1. Andreitsev, V. I. (2016). Pravovi zasady derzhavnoho kontroliu u sferi okhorony dovkillia [Legal principles of state control in the field of environmental protection]. *Pravo Ukrainy*, 9, 45–52. [in Ukrainian].
2. Bondarenko, S. V., & Shevchenko, O. A. (2020). Suchasni mekhanizmy derzhavnoho upravlinnia u sferi ekolohichnoi bezpeky [Modern mechanisms of public administration in the field of environmental safety]. *Ekologichni nauky – Environmental Sciences*, 2(31), 33–40. [in Ukrainian].
3. Vasylenko, V. A. (2018). Ekolohichna bezpeka yak prioritet derzhavnoi ekolohichnoi polityky Ukrainy [Environmental safety as a priority of Ukraine's state environmental policy]. *Naukovyi visnyk publichnoho ta pryvatnoho prava*, 3, 122–129. [in Ukrainian].
4. Hetman, A. P. (2015). Derzhavne upravlinnia u sferi okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovysheha: suchasnyi stan ta perspektyvy [Public administration in the field of environmental protection: current state and prospects]. *Visnyk Natsionalnoi yurydychnoi akademii Ukrainy imeni Yaroslava Mudroho*, 2, 77–83. [in Ukrainian].
5. Honcharuk, V. V., Parakhnenko, V. H., Yurovchik, V. H., Sopov, D. S., & Sopova, N. V. (2025). Upravlinnia ekolohichnoiu bezpekoiu Ukrainy: vyklyky sohodennia ta naslidky antropohennykh zmin landshtyv [Management of Ukraine's environmental safety: current challenges and consequences of anthropogenic landscape changes]. *Ekologichni nauky – Environmental Sciences*, 1(58), 44–48. [in Ukrainian].
6. Dutka, H. V. (2019). Administratyvno-pravovi zasady diialnosti Derzhavnoi ekolohichnoi inspektsii Ukrainy [Administrative and legal foundations of the State Environmental Inspectorate of Ukraine]. *Yurydychnyi naukovyi elektronnyi zhurnal*, 6, 211–215. [in Ukrainian].
7. Karakash, I. I. (2017). Problemy pravovoho zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky Ukrainy v umovakh hlobalizatsii [Problems of legal support of environmental safety of Ukraine under globalization]. *Chasopys Kyivskoho universytetu prava*, 1, 112–117. [in Ukrainian].
8. Lazarev, M. I. (2020). Pryrodoohoronnie inspektuvannia yak element derzhavnoho ekolohichnoho kontroliu [Nature protection inspection as an element of state environmental control]. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 2(34), 55–62. [in Ukrainian].
9. Parakhnenko, V. H., & Honcharuk, V. V. (2025). Metodolohiia ta orhanizatsiia ekolohichnykh doslidzhen u systemi landshtafnoi ekolohii ta radioekolohichnoho monitorynhu terytorii, zabrudnennykh radionuklidamy [Methodology and organization of ecological research in the system of landscape ecology and radioecological monitoring of radionuclide-contaminated territories]. *Environmental Problems*, 10(2), 119–126. [in Ukrainian].
10. Parakhnenko, V. H., Kyselov, Yu. O., & Rudyi, R. M. (2024). Vplyv invaziinykh roslin na tochnist heodezychnykh vymiriuvan [The impact of invasive plants on the accuracy of geodetic measurements]. *Nauka i tekhnika sohodni*, 9(37), 742–753. [in Ukrainian].
11. Sytnyk, H. P. (2018). Derzhavna polityka u sferi natsionalnoi bezpeky ta okhorony dovkillia: vzaiemozviazok ta perspektyvy [State policy in the field of national security and environmental protection: interconnection and prospects]. *Stratehichna panorama*, 1, 89–96. [in Ukrainian].
12. Shemshuchenko, Yu. S., & Kostytskyi, V. V. (2013). Ekolohichne pravo i derzhavne upravlinnia okhoronoiu navkolyshnoho pryrodnoho seredovysheha [Environmental law and public administration of environmental protection]. *Visnyk Akademii pravovykh nauk Ukrainy*, 4, 25–33. [in Ukrainian].
13. Yakovliev, V. A. (2021). Instytutsiini zasady derzhavnoho ekolohichnoho kontroliu v Ukraini [Institutional principles of state environmental control in Ukraine]. *Ekolohichne pravo Ukrainy: teoriia i praktyka*, 1, 140–147. [in Ukrainian].

Стаття надійшла: 26.08.2025

Прийнято: 09.09.2025

Опубліковано:

УДК 504.1:[633.1:631.563.2

DOI

Ольга КАРАЇМ

кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-1722-4110

Лариса ЧЕРЧИК

доктор економічних наук, професор, професор кафедри менеджменту, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0002-3901-216X

Володимир КАРАЇМ

аспірант, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0003-4053-8019

Бібліографічний опис статті: Караїм, О., Черчик, Л., Караїм, В. (2025). Роль модернізації зерносушильних комплексів у декарбонізації агросфери. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 41–50, doi:

РОЛЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗЕРНОСУШИЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ У ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ АГРОСФЕРИ

Метою статті є аналіз техноекологічних аспектів функціонування зерносушильних комплексів в агросфері в контексті формування вуглецевого сліду та шляхів зниження викидів в атмосферне повітря як складової переходу до низьковуглецевої економіки.

Методи. У дослідженні застосовано міждисциплінарний оглядовий підхід із використанням аналітичних матеріалів наукових публікацій із баз Scopus і Web of Science, методичних рекомендацій, принципів оцінки життєвого циклу та енергетичного аналізу. Проведено порівняння традиційних та альтернативних технологій сушіння зерна з урахуванням енергоспоживання, рівня викидів та потенціалу декарбонізації.

За результатами дослідження підтверджено, що процес сушіння зерна є одним із найбільш енергоємних етапів післязбиральної обробки зернових культур, зумовлюючи значне споживання викопного палива та формування відповідного вуглецевого сліду, що супроводжується значними обсягами CO₂, CO та твердих частинок PM₁₀ і PM_{2,5}. Установлено, що переважна частина традиційних зерносушильних комплексів не має ефективних систем очищення викидних газів і характеризується надмірним енергоспоживанням, що суперечить цілям декарбонізації. Обґрунтовано перспективність впровадження альтернативних енергетичних рішень – біомаси, теплових насосів, сонячної енергії – а також сучасних технологій фільтрації та каталітичного допалювання газів. Зазначено важливість оцінки життєвого циклу як інструменту виявлення «вуглецево вразливих» етапів та формування стратегій переходу до низьковуглецевої економіки в агросфері.

Висновки. Ефективне зменшення впливу сушильних процесів на довкілля є важливою умовою екологізації агропромислового виробництва. Впровадження енергоощадних та низьковуглецевих технологій, зокрема через модернізацію сушильного обладнання й перехід на відновлювані джерела енергії, є стратегічно важливим для формування сталого та кліматично нейтрального сільського господарства.

Ключові слова: зерносушильні комплекси, викиди, вуглецевий слід, сталий розвиток, низьковуглецева економіка, декарбонізація, аграрне виробництво, агросфера.

Olha KARAIM

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Protection of Environment, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-1722-4110

Larysa CHERCHYK

Doctor of Economics Sciences, Professor, Professor of Department of Management, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0002-3901-216X

Volodymyr KARAIM

Post-graduate Student, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0003-4053-8019

Bibliographic description of the article: Karaim, O., Cherchyk, L., Karaim, V. (2025). Rol modernizatsii zernosushylnykh kompleksiv u dekarbonizatsii ahrosfery [The role of grain dryer modernization in the decarbonization of the agricultural domain]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 41–50 doi:

THE ROLE OF GRAIN DRYER MODERNIZATION IN THE DECARBONIZATION OF THE AGRICULTURAL DOMAIN

Objective. The aim of this article is to analyze the techno-environmental aspects of grain drying complexes functioning in the agro-industrial sector in the context of carbon footprint formation and the ways to reduce atmospheric emissions as a component of the transition to a low-carbon economy.

Methods. The study employs an interdisciplinary review approach based on the analysis of scientific publications from the Scopus and Web of Science databases, methodological guidelines, principles of life cycle assessment, and energy analysis. A comparative evaluation of conventional and alternative grain drying technologies was conducted, taking into account energy consumption, emission levels, and decarbonization potential.

Results. Based on the results of the study, it has been confirmed that grain drying is one of the most energy-intensive stages of post-harvest processing of cereals, leading to significant consumption of fossil fuels and the associated formation of a carbon footprint, accompanied by substantial emissions of CO₂, CO, and particulate matter PM₁₀ and PM_{2.5}. It has been established that the majority of conventional grain drying complexes lack efficient flue gas cleaning systems and are characterized by excessive energy consumption, which contradicts the objectives of decarbonization. The implementation of alternative energy solutions – such as biomass, heat pumps, and solar energy – as well as advanced filtration technologies and catalytic afterburning of exhaust gases, has been substantiated as a promising direction. The importance of life cycle assessment is emphasized as a tool for identifying "carbon-vulnerable" stages and developing strategies for transitioning to a low-carbon economy in the agricultural domain.

Conclusions. Reducing the environmental impact of drying processes is crucial for the ecological modernization of agro-industrial production. The implementation of energy-efficient and low-carbon technologies – particularly through the modernization of drying equipment and the shift to renewable energy sources – is of strategic importance for the development of sustainable and climate-neutral agriculture.

Key words: grain drying complexes, emissions, carbon footprint, sustainable development, low-carbon economy, decarbonization, agricultural production, agricultural domain.

Актуальність проблеми. Зерносушильні комплекси є важливим елементом агропромислової інфраструктури, однак їх експлуатація супроводжується викидами в атмосферу речовин, що мають вуглецевий слід. Під час сушіння зерна, особливо за використанням традиційних джерел енергії, відбувається інтенсивне утворення вуглецевмісних газів – передусім оксиду вуглецю

(CO) та діоксиду вуглецю (CO₂), які є основними компонентами парникового ефекту. Ці викиди не лише погіршують якість повітря в зоні розміщення сушильних установок, але й сприяють глобальним кліматичним змінам через підвищення концентрації парникових газів в атмосфері.

У контексті переходу агросфери до принципів низьковуглецевої економіки особливої

актуальності набуває питання екологічної модернізації сушильного обладнання. Проведення ґрунтовної оцінки впливу зерносушильних комплексів на якість атмосферного повітря дозволяє не лише окреслити екологічні ризики, але й визначити шляхи технологічного оновлення, спрямованого на зменшення викидів та підвищення енергоефективності. Такі заходи є важливими передумовами декарбонізації аграрного виробництва, підвищення його екологічної безпеки та адаптації до викликів сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливості активного вентилявання та сушіння зерна висвітлено в роботі (Гапонюк, 2014). Екологічні аспекти функціонування зерносушильного комплексу представлено (Караїм, 2025). Практичні результати сушіння зернових генераторним газом подані в праці (Омаров, 2023). У дослідженні (Паламарчук, 2016) обґрунтовано схеми віброозонуючої сушарки для післязбиральної обробки зерна. Сучасні системи автоматизації обробки зерна описано (Піскарьов, 2023). Комплексну модель енерговитрат, екологічного впливу та економічної ефективності зерноочисних комплексів висвітлено (Ashkan Nabavi-Pelesaraei, 2019). Перспективи використання сонячних сушарок для сільськогосподарської продукції розкрито (Fudholi, 2010). Узагальнений енергетичний аналіз та екологічну стійкість промислового сушіння зерна розглянуто (Hasan Tarek Mondal, 2024). Ключові аспекти оптимізації процесу сушіння у шахтній зерносушарці періодичної дії досліджено (Heikki, 2014). Проблеми поліпшення технологій сушіння: ефективні рішення для чистішого виробництва з вищою енергоефективністю та зниженими викидами показує розвідка (Chojnaska, 2021). Оцінку життєвого циклу зерна, зокрема аналіз викидів парникових газів за методом «cradle-to-gate» (Hariz Abdul Rahman, 2019). Техно-еколого-економічні дослідження експериментальної та теоретичної оцінки сонячної теплової помпової системи для внутрішньобункерного сушіння зерна здійснено (Xinzhuang Gu, 2022).

Метою роботи є дослідження особливостей викидів парникових газів та інших забруднювачів атмосферного повітря, що супроводжують функціонування зерносушильних комплексів, з акцентом на їх вуглецевий слід, а також

обґрунтування напрямів переходу аграрного сектору до низьковуглецевої економіки шляхом впровадження енергоефективних та екологічно безпечних технологій сушіння зерна.

Методологія. У дослідженні використано міждисциплінарний аналітичний підхід, що включає: огляд наукової літератури з баз даних Scopus, Web of Science та інших академічних джерел з питань викидів сушильних комплексів, енергоспоживання та декарбонізації агросектору; аналіз нормативних документів, щодо методів розрахунку викидів парникових газів; оцінку життєвого циклу як концептуальну основу для розгляду впливу процесу сушіння на навколишнє середовище; порівняльний аналіз технологій сушіння з традиційними й альтернативними джерелами енергії, включаючи теплові насоси, сонячні системи та біомасу; структурно-функціональний аналіз технічних рішень щодо зниження викидів і впровадження фільтраційних та каталітичних систем очищення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Продукції зернового сектору належить стратегічна роль у структурі агропродовольчої торгівлі як на національному, так і на міжнародному рівнях. Проте в останні роки в Україні простежується зниження показників вирощування та переробки зернових культур, що супроводжується зростанням собівартості продукції на їх основі. Така ситуація є наслідком низки причин, серед яких слід виокремити надмірне споживання енергії у виробничих процесах і втрати якості зерна на окремих етапах технологічного ланцюга, особливо під час сушіння (Омаров, 2023).

Зерносушильні комплекси (ЗСК) є ключовим елементом післязбиральної інфраструктури аграрного сектору, виконуючи функцію зниження вологості зерна до нормативних показників, що забезпечує його довготривале зберігання та подальше комерційне використання. Водночас експлуатація таких установок супроводжується істотним техногенним навантаженням на довкілля. Серед екологічних наслідків функціонування ЗСК фіксуються підвищені обсяги атмосферних викидів, інтенсивне споживання енергії, генерація шуму, локальні теплові викиди, а також погіршення якості повітря в межах виробничих територій і прилеглих зон.

Оскільки сушіння зерна є критично важливим для багатьох галузей харчової та переробної промисловості, було створено широкий спектр типів сушильних апаратів із різною конструктивною й енергетичною структурою. Основним принципом роботи таких систем є перенесення енергії, необхідної для фазового переходу вологи з рідкого в пароподібний стан. Відповідно до механізму теплопередачі сушарки класифікують на конвективні, контактні та установки, що застосовують енергетичні поля. У переважній більшості ці апарати здатні функціонувати як у безперервному, так і в періодичному режимі (Chojnacka, 2021).

Одним із ключових техноекологічних чинників, що характеризують функціонування зерносушильних комплексів, є значна енергоємність процесу зневоднення зерна. Як правило, для забезпечення термічної енергії використовуються викопні види палива – зокрема природний газ, дизельне або тверде біомасове паливо. Для сушарок середнього рівня продуктивності обсяги споживаного природного газу впродовж одного сезону можуть досягати 50–70 тис. м³. Варто зазначити, що згорання одного кубічного метра природного газу супроводжується утворенням приблизно 1,9 кг вуглекислого газу (CO₂), що суттєво підвищує вуглецевий слід аграрного виробництва (IPCC, 2023).

Енергетична ефективність залишається одним із ключових чинників, що визначають екологічну та економічну доцільність впровадження технологічних рішень у промисловості. Згідно з прогнозами, до 2030 року глобальне споживання енергоресурсів зросте приблизно на 40%, що посилює необхідність раціонального використання енергії в енергомістких секторах, зокрема в агропереробній галузі. У цьому контексті особливої актуальності набуває модернізація енергозатратних технологій, серед яких сушіння зерна посідає провідне місце в ланцюгу післязбиральної обробки сільськогосподарської продукції.

Свіжозібране зерно характеризується надмірною вологістю (у межах 33–45% за сухою масою), що створює сприятливі умови для розвитку мікробіологічного псування та втрати товарних якостей. З метою забезпечення тривалого зберігання продукції вологість необхідно знизити до безпечного рівня, що реалізується шляхом енергоємного процесу термічного

сушіння. Сушіння передбачає активне споживання теплової енергії для створення вологісно-температурного градієнта, необхідного для інтенсивного випаровування вологи із зернової маси (Mondal, 2024).

У глобальному масштабі понад 85 % промислових сушильних установок функціонують на основі гарячого повітря, яке генерується шляхом спалювання викопного палива (Samadi, 2014, Czajkowska, 2018). Проте високе енергоспоживання сушильних систем на основі викопного палива обумовлює значний обсяг викидів карбоновмісних парникових газів. Враховуючи цілі сталого розвитку та імперативи Європейського зеленого курсу, зменшення енергетичної залежності технології сушіння є важливим кроком на шляху до декарбонізації аграрного сектору та інтеграції принципів низьковуглецевої економіки.

Сушіння зернових культур є одним із найбільш енергомістких процесів серед технологічних операцій агропродовольчого виробництва, суттєво перевищуючи за рівнем енергоспоживання обробку інших видів сільськогосподарської сировини. Високі витрати енергії в цій сфері зумовлюють необхідність оптимізації функціонування ЗСК, оскільки саме ефективність управління їх роботою визначає як економічні показники виробництва, так і його екологічний слід.

В умовах поступового зростання енергетичних тарифів і потреби у зниженні вуглецевої інтенсивності виробництва, промислові підприємства дедалі активніше інтегрують інноваційні енергоефективні технології. Одним із перспективних напрямів у цьому контексті є впровадження гібридних сушильних систем, що поєднують традиційне сушіння з альтернативними фізичними методами – зокрема ультразвуковою обробкою, мікрохвильовим та інфрачервоним випромінюванням. Такі технології дозволяють істотно скоротити енергетичні втрати та відповідно – зменшити вуглецевий слід продукції. Таким чином, розвиток енергоощадних технологій сушіння є не лише економічно доцільним, а й критично важливим для досягнення цілей декарбонізації агропромислового комплексу, сприяючи формуванню основ низьковуглецевої економіки (Mondal, 2024).

Актуальні наукові дослідження підтверджують високий потенціал використання

у технологічних процесах зернопереробки відновлюваних джерел енергії, зокрема біомаси та теплових насосів. Особливо вагомими в цьому контексті є напрацювання китайських дослідників, що мають глобальну релевантність з огляду на лідерські позиції Китаю у світовому виробництві зернових культур (669,5 млрд кг у 2020 р., з яких 92% припадає на рис, пшеницю та кукурудзу) (Xinzhuang, 2022).

З метою підвищення енергоефективності та подолання проблем нерівномірного сушіння зерна з надлишковою вологістю у масивних насипах, було розроблено інноваційну сушильну систему, що поєднує принципи теплового насоса із залученням сонячної енергії (SAHP) для функціонування у зернових бункерах. Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень продемонстрували досягнення коефіцієнта продуктивності теплового насоса на рівні 5,03, а тепла ефективність сонячного колектора становила 63%. У типових умовах зимового періоду середня тепла потужність системи сягала 130,2 кВт. Важливим є те, що за 42 години роботи система забезпечила зниження вологості партії зерна масою 3760 тонн із 12,9% до 12,5%, при цьому питома вологовіддача досягла 1,934 кг/кВт·год, а ексергетичний ККД – 40,27%. Водночас витрати на сушіння за допомогою SAHP були суттєво нижчими порівняно з традиційними сушарками – 1,43 дол./т проти 5,57 дол./т. Крім того, добова продуктивність сушіння зросла вдвічі (з 166 до 334 тонн) (Xinzhuang, 2022).

Отримані результати не лише засвідчують техніко-економічну доцільність впровадження подібних рішень, але й вказують на їх стратегічне значення у контексті декарбонізації агропромислового виробництва, скорочення вуглецевого сліду зернової продукції та поступового переходу до низьковуглецевої економіки. З огляду на це, подальше вдосконалення технології SAHP є перспективним напрямом наукових розвідок у сфері сталого енергоменеджменту в аграрному секторі.

Окрім високої енергоемності, функціонування зерносушильних комплексів супроводжується інтенсивними викидами широкого спектра забруднювальних речовин, що формують суттєвий техногенний вплив на довкілля та здоров'я працівників. Основними забруднювачами атмосфери є вуглекислий газ (CO₂), тверді

суспендовані частинки фракцій PM₁₀ і PM_{2.5}, леткі органічні сполуки (ЛОС) та інші речовини антропогенного походження. Зокрема, пилові викиди досягають пікових значень під час завантаження вологого зерна до бункерів, безпосереднього процесу сушіння та транспортування продукції механізованими системами. Встановлено, що середня концентрація пилу в повітрі робочої зони в періоди максимального навантаження може перевищувати гранично допустимі нормативи у 3–5 разів, що є критичним показником ризику для об'єктів довкілля та людини (Chojnacka, 2021).

Особливе занепокоєння викликає вплив дрібнодисперсного пилу, здатного проникати в глибокі відділи дихальних шляхів людини, провокуючи розвиток алергічних реакцій, хронічних респіраторних захворювань, а в окремих випадках – посилюючи ризик серцево-судинних патологій. Таким чином, пилові викиди зерносушильного обладнання мають не лише екологічне, а й суттєве соціогігієнічне значення.

Крім того, зерносушильна інфраструктура є джерелом інтенсивного шумового навантаження, що формується внаслідок функціонування вентиляторів, транспортерів, сепараторів та іншого агрегатного устаткування. Систематичний вплив акустичних коливань високої інтенсивності може зумовити розвиток слухових дисфункцій, психоемоційного напруження, головного болю, а також підвищеного ризику розвитку професійних захворювань працівників об'єктів агропромислового сектору (Спірін, 2023).

Накопичення вуглецевого сліду внаслідок викидів CO₂, а також поширення неорганічних та органічних аерозолів, сприяє екологічній деградації локальних атмосферних систем, що суперечить принципам сталого природокористування. У контексті переходу до низьковуглецевої економіки, актуалізується потреба в розробці комплексних стратегій декарбонізації агропромислових процесів, що охоплюють не лише зменшення споживання традиційних видів палива, а й інженерне переосмислення систем аспірації, шумозахисту та моніторингу якості повітря в межах промислових об'єктів.

У контексті переходу до низьковуглецевої економіки актуальним є впровадження технологічних рішень, спрямованих на зменшення викидів і декарбонізацію сушильних процесів.

Зокрема, застосування електростатичних фільтрів дозволяє ефективно видаляти дрібнодисперсні частинки з потоку відпрацьованих газів, тоді як каталітичні системи сушіння забезпечують глибоке очищення повітряного середовища за рахунок розкладання шкідливих домішок. Ці підходи створюють підґрунтя для зменшення екологічних ризиків та інтеграції зернопереробної галузі у стратегії кліматичної нейтральності.

Також, в умовах сучасних екологічних викликів зростає значущість використання інструментів кількісної оцінки впливу агровиробництва на навколишнє середовище. Одним із провідних підходів у цьому напрямі є методика оцінки життєвого циклу продукції (LCA – Life Cycle Assessment), яка дозволяє комплексно аналізувати екологічні наслідки на всіх стадіях виробничого ланцюга – від вирощування сільськогосподарських культур до отримання готового продукту. Впровадження LCA сприяє виявленню ключових джерел забруднення, включно з викидами парникових газів, деградацією ґрунтів, забрудненням водних об'єктів, а також іншими формами антропогенного навантаження (Rahman, 2019).

Процес сушіння зерна в рамках LCA-моделі виявляється одним із найважливіших етапів, який суттєво формує загальний вуглецевий слід продукції через високе енергоспоживання та інтенсивне використання викопного палива. Зокрема, сушіння може бути пов'язане з потенціалом до спричинення кислотних дощів (acidification) та евтрофікації водойм унаслідок супутніх викидів. У цьому контексті декарбонізація сушильних процесів стає критичним напрямом для зниження екологічного тиску та досягнення кліматичної нейтральності агропродовольчого сектору (Nabavi-Pelesaraei, 2019).

Потенційні стратегії зменшення впливу включають поступовий перехід на відновлювані джерела енергії (наприклад, біомасу, сонячну або геотермальну енергію), впровадження енергоефективного обладнання, а також оптимізацію логістики сушіння. Разом із тим, наукові розвідки свідчать про недостатнє висвітлення LCA-досліджень, присвячених зерносушінню, що окреслює наукову лауну та визначає перспективні напрями подальших міждисциплінарних досліджень у межах переходу до низьковуглецевої економіки.

У контексті екологічної безпеки сушильних процесів особливе значення має ефективне видалення твердих частинок із викидних газів, що утворюються в результаті спалювання викопного палива в зерносушильному обладнанні. Найбільшу небезпеку становлять дисперсні фракції пилу – PM_{10} та $PM_{2,5}$, які здатні проникати у глибокі відділи дихальної системи, несучи на своїй поверхні токсичні сполуки, зокрема важкі метали, алергени, поліциклічні ароматичні вуглеводні та діоксини (Styszko, 2017). Саме ці компоненти становлять реальну загрозу не лише для здоров'я працівників агропідприємств, але й для довкілля загалом, спричиняючи вторинне забруднення ґрунтів і водних ресурсів.

Зменшення викидів твердих частинок є невід'ємною складовою політики декарбонізації, оскільки забезпечує зниження сумарного екологічного навантаження на атмосферне повітря, що особливо актуально в умовах переходу до низьковуглецевої моделі господарювання. З цією метою у виробничу практику впроваджуються сучасні технології газоочищення, серед яких – сухі та вологі механічні системи, електростатичні фільтри, волокнисті мішкові й кишенькові фільтри, а також циклонні апарати різних типів. Принцип дії більшості з них ґрунтується на застосуванні гравітаційних, інерційних, відцентрових та електростатичних сил, а також процесів коагуляції частинок і фільтрації за розміром (Chojnacka, 2021).

Усунення високодисперсного пилу в комбінації з модернізацією теплогенерувального обладнання, зокрема шляхом заміни традиційних камерних печей на вискоефективні циклонні системи, дозволяє не лише мінімізувати вплив на якість повітря, а й скоротити вуглецевий слід виробництва. Таким чином, підвищення ефективності систем пиловловлювання виступає одним з пріоритетних напрямів екологічної модернізації сушильних комплексів, що відповідає загальносвітовим цілям сталого розвитку та кліматичної нейтральності.

У межах технологій зменшення шкідливих викидів у зерносушильних системах ключову роль відіграють мокрі пиловловлювачі, які реалізують процес видалення твердих частинок через їх змочування водою. У таких системах рідина подається на внутрішні поверхні апарата або розпилюється у вигляді аерозолі,

сприяючи ефективному осадженню пилу з газового потоку. До найбільш поширених типів пиловловлювальних пристроїв вологого типу належать барботажні скрубери, апарати з незаповненим чи твердонаповненим об'ємом, псевдозрідженим шаром та вентурійні системи (Chen, 2020). Їх застосування є важливим кроком на шляху до зменшення техногенного навантаження на атмосферне повітря в агропромисловому секторі.

Разом із системами пилогазоочищення все більшу актуальність у контексті низьковуглецевого переходу набувають каталітичні технології, що базуються на процесах термоокислення забруднювальних компонентів димових газів. Під час спалювання традиційних (природний газ, нафта) або альтернативних (біомаса, пелети) джерел енергії утворюються значні обсяги димових газів, які містять оксиди вуглецю (CO , CO_2), а також леткі органічні сполуки (ЛОС), що формують комплексну картину антропогенного забруднення (Chojnacka, 2021).

У промислових зерносушильних комплексах високої потужності, що характеризуються інтенсивним споживанням теплової енергії, перспективним напрямом зниження вуглецевого сліду є впровадження каталітичних систем доочищення газів. Застосування каталізаторів дозволяє здійснювати допалювання залишкових шкідливих компонентів димових викидів, значно знижуючи рівень викидів парникових газів і супутніх поллютантів. Додатково, каталітичні реакції можуть супроводжуватися частковим рекупераційним ефектом, що дозволяє підвищити загальну енергоефективність системи та сприяє декарбонізації сушильних технологій у межах стратегії сталого розвитку (Sinha Majumdar, 2017).

Таким чином, сучасна практика сушіння потребує переосмислення з огляду на енергетичну ефективність та вплив на довкілля. Серед перспективних технологічних рішень – впровадження теплообмінників, які дозволяють повторно використовувати відведене тепло, зменшуючи витрати енергії. Одним із ефективних підходів до зниження вуглецевого сліду є перехід від викопного палива (зокрема природного газу) до відновлюваних джерел енергії, таких як біомасові відходи. Це не лише знижує експлуатаційні витрати, але й мінімізує обсяги викидів парникових і токсичних речовин у повітря робочої зони.

Особливу увагу в контексті екологізації сушильних процесів приділяють застосуванню каталітичних систем очищення димових газів. Каталізatori, виготовлені на основі благородних металів або металевих оксидів, забезпечують високий рівень нейтралізації шкідливих компонентів, летких органічних сполук та продуктів неповного згоряння. Очищення димових газів сприяє не лише поліпшенню якості повітря, а й підвищенню загальної енергоефективності систем, що важливо для досягнення цілей кліматичної нейтральності та переходу до низьковуглецевої економіки. У цьому контексті впровадження інноваційних сушильних технологій розглядається як один із важливих напрямів декарбонізації агропромислового виробництва (Chojnacka, 2021).

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження засвідчило, що зерносушильні комплекси є важливим елементом агропромислового виробництва, однак їх функціонування супроводжується значним енергоспоживанням і викидами вуглецевмісних сполук, зокрема CO_2 та CO , твердих частинок PM_{10} і $\text{PM}_{2,5}$, а також летких органічних сполук. Спалювання викопного палива, що є основним джерелом теплової енергії для сушіння, чинить як локальний, так і глобальний негативний вплив на довкілля, сприяючи забрудненню атмосферного повітря й посиленню кліматичних змін.

Запровадження технологій зменшення вуглецевого сліду, зокрема систем теплоутилізації, каталізаторів очищення димових газів та альтернативних джерел енергії (біомаса, теплові насоси, сонячна енергія), дозволяє суттєво знизити негативний техногенний вплив сушильних процесів. Крім того, застосування оцінки життєвого циклу як інструменту екологічного аналізу дає змогу ідентифікувати найбільш критичні етапи сушіння щодо викидів парникових газів та розробити ефективні стратегії їхньої мінімізації.

Разом із тим, виявлено наукову лаку щодо системної оцінки вуглецевого сліду зерносушильних установок в умовах України, а також обмежену кількість досліджень, присвячених порівняльному аналізу ефективності традиційних і низьковуглецевих сушильних технологій.

Перспективи подальших досліджень полягають у: проведенні поглибленої кількісної

оцінки викидів парникових газів на різних етапах сушіння з урахуванням типів обладнання й виду палива; дослідженні можливостей інтеграції відновлюваних джерел енергії у структуру зерносушильних систем; моделюванні сценаріїв переходу до низьковуглецевих технологій у контексті декарбонізації агросфери;

оцінці економічної доцільності впровадження новітніх екотехнологій у виробничий цикл підприємств зернопереробної галузі.

Заповнення вказаних наукових прогалин сприятиме розвитку екологічно орієнтованого аграрного виробництва та досягненню цілей сталого розвитку в агросфері.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Активне вентилявання та сушіння зерна : навч. посіб. / О. І. Гапонюк, М. В. Остапчук, Г. М. Станкевич, І. І. Гапонюк. Одеса : БМВ, 2014. 326 с.
2. Гаврисюк О. І., Караїм О. А. Екологічні аспекти функціонування зерносушильного комплексу. *Сучасна наука та освіта Волині* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених (22 травня 2025 року). Луцьк. 2025.
3. Омаров І. С., Цивенкова Н. М. Практичні результати сушіння зернових генераторним газом. Аграрна енергетика в ХХІ сторіччі: досягнення і перспективи розвитку : матеріали ІІ Міжн. наук.-практ. конф. (14 грудня 2023 року). Білоцерківський НАУ. 2023. С. 104–110. URL: https://science.btsau.edu.ua/sites/default/files/tezy/tezy_agr_ener_xxi_14.12.2023.pdf#page=104
4. Паламарчук І. П., Цуркан О. В., Присяжнюк Д. В., Полевода Ю. А. Обґрунтування схеми віброозонуючої сушарки для післязбиральної обробки зерна. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. № 22. 2016. С. 151–156.
5. Піскар'юв О. М., Мусієнко Д. В. Сучасні системи автоматизації обробки зерна. Матеріали ХІХ міжнародного форуму молоді «Молодь і індустрія в ХХІ столітті». 2023 р. С. 219.
6. Ashkan Nabavi-Pelesaraei, Shahin Rafiee, Seyed Saeid Mohtasebi, Homa Hosseinzadeh-Bandbafha, Kwok-wing Chau. Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*. Volume 217. 2019. P. 742–756. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.228>
7. Chen Z., Zhao S., Rao Z., Zhang R. Experimental Study on Low-resistance Venturi Water Film Cyclone with Vibrating String Grid. *Jordan Journal of Civil Engineering*. № 14(3). 2020. P. 295. URL: <https://jjce.just.edu.jo/Download.ashx?f=TsZShoU806bfrho36mu6ECzqgkLV3RfyoNH6e6Z1Ok8%3D>
8. Czajkowska A. Installations for cleaning exhaust fumes from dust–gas pollutants. *Environmental Protection and Natural Resources*. № 29(4), 2018. P. 26–32. DOI: <https://doi.org/10.2478/oszn-2018-0019>
9. Fudholi A., Sopian K., Ruslan M. H., Alghoul M. A., Sulaiman M. Y., Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 14. Issue 1. 2010. P. 1–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>
10. Gopan A., Verma P., Yang Z., Axelbaum R. L. Quantitative analysis of the impact of flue gas recirculation on the efficiency of oxy-coal power plants. *Int. J. Greenh. Gas Control*. № 95. 2020. 102936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102936>
11. Hasan Tarek Mondal, Sazzat Hossain Sarker. Comprehensive energy analysis and environmental sustainability of industrial grain drying. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 199. July 2024. 114442. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114442>
12. Heikki T. Jokiniemi, Jukka M. Ahokas, Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. *Biosystems Engineering*. Volume 121. 2014. P. 209–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.002>
13. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy. 2023. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
14. Jabłońska M., Palkovits R. It is no laughing matter: nitrous oxide formation in diesel engines and advances in its abatement over rhodium-based catalysts. *Catal. Sci. Technol.* № 6. 2016. P. 7671–7687. DOI: <https://doi.org/10.1039/c6cy01126h>
15. Katarzyna Chojnacka, Katarzyna Mikula, Grzegorz Izydorczyk, Dawid Skrzypczak, Anna Witek-Krowiak, Konstantinos Moustakas, Wojciech Ludwig, Marek Kułczyński, Improvements in drying technologies – Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. *Journal of Cleaner Production*. Volume 320. 2021. 128706. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128706>
16. Liu J., Zhu F., Ma X. Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification. *Engineering*. № 4. 2018. P. 416–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.009>
17. Mohammad Hariz Abdul Rahman, Sau Soon Chen, Putri Razreena Abdul Razak, Nurul Ain Abu Bakar, Mohammad Shahid Shahrin, Norziana Zin Zawawi, Azzami Adam Muhamad Mujaib, Fazlyzan Abdullah, Fauzi Jumat, Rahiniza

Kamaruzaman, Shamsul Amri Saidon, Shaidatul Azdawiyah Abdul Talib. Life cycle assessment in conventional rice farming system: Estimation of greenhouse gas emissions using cradle-to-gate approach. *Journal of Cleaner Production*. Volume 212. 2019. P. 1526–1535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.062>

18. Seyed Hashem Samadi, Barat Ghobadian, Gholamhassan Najafi, Ali Motevali. Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. Volume 13, Issue 2. 2014. P. 174–182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.09.001>

19. Sinha Majumdar S., Celik, G., Alexander A. M., Gawade P., Ozkan U. S. In-situ incorporation of binder during sol-gel preparation of Pd-based sulfated zirconia for reduction of nitrogen oxides under lean-burn conditions: effect on activity and wash-coating characteristics. *Appl. Catal. B Environ.* № 202. 2017. P. 134–146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.062>

20. Styszko, K., Samek, L., Szramowiat, K. et al. Oxidative potential of PM10 and PM2.5 collected at high air pollution site related to chemical composition: Krakow case study. *Air Qual Atmos Health* 10. 2017. P. 1123–1137. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0499-3>

21. Xinzhuang Gu, Jianguo Dai, Haifeng Li, Yanjun Dai, Experimental and theoretical assessment of a solar assisted heat pump system for in-bin grain drying: A comprehensive case study. *Renewable Energy*. Volume 181. 2022. P. 426–444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.049>

REFERENCES:

1. Haponiuk, O. I., Ostapchuk, M. V., Stankevych, H. M., & Haponiuk, I. I. (2014). Aktyvneventyliuvannia ta sushinnia zerna: navchalnyi posibnyk [Active ventilation and grain drying: A textbook]. Odesa: VMV. 326 p. [in Ukrainian].

2. Havrysiuk, O. I., & Karaim, O. A. (2025). Ekologichni aspekty funktsionuvannia zernosushylnoho kompleksu [Ecological aspects of the functioning of a grain drying complex]. *Suchasna nauka ta osvita Volyni: Materialy Vseukrainskoi nauk.-prakt. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh vchenykh* (22 travnia 2025 roku). Lutsk. [in Ukrainian].

3. Omarov, I. S., & Tsyvenkova, N. M. (2023). Praktychni rezultaty sushinnia zerna henaratornym hazom [Practical results of grain drying using generator gas]. *Ahrarna enerhetyka v XXI storichchi: dosiahnennia i perspektivy rozvytku: Materialy II Mizhnar. nauk.-prakt. konf.* (14 hrudnia 2023 roku). Bilotserkivskyi NAU, 104–110. URL: https://science.btsau.edu.ua/sites/default/files/tezy/tezy_agr_ener_xxi_14.12.2023.pdf#page=104 [in Ukrainian].

4. Palamarchuk, I. P., Tsurkan, O. V., Prysiachniuk, D. V., & Polevoda, Yu. A. (2016). Obhruntuvannia skhemy vibroozonuiuchoi susharky dlia pisliabzbyranoi obrobky zerna [Justification of the vibro-ozonizing dryer scheme for post-harvest grain processing]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii*, (22), 151–156. [in Ukrainian].

5. Piskariov, O. M., & Musiienko, D. V. (2023). Suchasni systemy avtomatyzatsii obrobky zerna [Modern systems of grain processing automation]. *Materialy XIX Mizhnarodnoho forumu molodi "Molod i industriia v XXI stolitti"*, 219. [in Ukrainian].

6. Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S. S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K.-W. (2019). Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 217, 742–756. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.228>

7. Chen, Z., Zhao, S., Rao, Z., & Zhang, R. (2020). Experimental study on low-resistance Venturi water film cyclone with vibrating string grid. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 14(3), 295. Retrieved from <https://jjce.just.edu.jo/Download.ashx?f=TsZShoU806bfrho36mu6ECzqgkLV3RfyoNH6e6Z1Ok8%3D>

8. Czajkowska, A. (2018). Installations for cleaning exhaust fumes from dust–gas pollutants. *Environmental Protection and Natural Resources*, 29(4), 26–32. <https://doi.org/10.2478/oszn-2018-0019>

9. Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>

10. Gopan, A., Verma, P., Yang, Z., & Axelbaum, R. L. (2020). Quantitative analysis of the impact of flue gas recirculation on the efficiency of oxy-coal power plants. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 95, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.102936>

11. Mondal, H. T., & Sarker, S. H. (2024). Comprehensive energy analysis and environmental sustainability of industrial grain drying. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114442. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114442>

12. Jokiniemi, H. T., & Ahokas, J. M. (2014). Drying process optimisation in a mixed-flow batch grain dryer. *Biosystems Engineering*, 121, 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.01.002>

13. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Volume 2 – Energy. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

14. Jabłońska, M., & Palkovits, R. (2016). It is no laughing matter: Nitrous oxide formation in diesel engines and advances in its abatement over rhodium-based catalysts. *Catalysis Science & Technology*, 6, 7671–7687. <https://doi.org/10.1039/c6cy01126h>

15. Chojnacka, K., Mikula, K., Izydorczyk, G., Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., Ludwig, W., & Kułczyński, M. (2021). Improvements in drying technologies – Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128706>
16. Liu, J., Zhu, F., & Ma, X. (2018). Industrial application of a deep purification technology for flue gas involving phase-transition agglomeration and dehumidification. *Engineering*, 4, 416–420. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.009>
17. Abdul Rahman, M. H., Chen, S. S., Abdul Razak, P. R., Abu Bakar, N. A., Shahrin, M. S., Zawawi, N. Z., Mujab, A. A. M., Abdullah, F., Jumat, F., Kamaruzaman, R., Saidon, S. A., & Abdul Talib, S. A. (2019). Life cycle assessment in conventional rice farming system: Estimation of greenhouse gas emissions using cradle-to-gate approach. *Journal of Cleaner Production*, 212, 1526–1535. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.062>
18. Samadi, S. H., Ghobadian, B., Najafi, G., & Motevali, A. (2014). Potential saving in energy using combined heat and power technology for drying agricultural products (banana slices). *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 13(2), 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2013.09.001>
19. Majumdar, S. S., Celik, G., Alexander, A. M., Gawade, P., & Ozkan, U. S. (2017). In-situ incorporation of binder during sol-gel preparation of Pd-based sulfated zirconia for reduction of nitrogen oxides under lean-burn conditions: Effect on activity and wash-coating characteristics. *Applied Catalysis B: Environmental*, 202, 134–146. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.062>
20. Styszko, K., Samek, L., Szramowiat, K., et al. (2017). Oxidative potential of PM10 and PM2.5 collected at high air pollution site related to chemical composition: Krakow case study. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10, 1123–1137. <https://doi.org/10.1007/s11869-017-0499-3>
21. Gu, X., Dai, J., Li, H., & Dai, Y. (2022). Experimental and theoretical assessment of a solar assisted heat pump system for in-bin grain drying: A comprehensive case study. *Renewable Energy*, 181, 426–444. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.049>

Стаття надійшла: 02.08.2025

Прийнято: 18.08.2025

Опубліковано:

УДК 552.574: 66.040.2: 661.183.2

DOI

Володимир КУЧЕРЕНКО

доктор хімічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу хімії вугілля, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л.М.Литвиненка Національної академії наук України, вул. Харківське шосе, 50, м. Київ, Україна, 02155

ORCID: 0000-0001-7234-947X**Scopus Author ID:** 7005252259**Юлія ТАМАРКІНА**

кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень нуклеофільних реакцій, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л.М.Литвиненка Національної академії наук України, вул. Харківське шосе, 50, м. Київ, Україна, 02155

ORCID: 0000-0002-8747-4481**Scopus Author ID:** 6507643028**Анастасія РЕДЬКО**

провідний інженер відділу хімії вугілля, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л.М.Литвиненка Національної академії наук України, вул. Харківське шосе, 50, м. Київ, Україна, 02155

ORCID: 0000-0001-9768-4020**Scopus Author ID:** 58503199300**Ірина ФРОЛОВА**

кандидат хімічних наук, науковий співробітник відділу хімії вугілля, Інститут фізико-органічної хімії і вуглехімії імені Л.М.Литвиненка Національної академії наук України, вул. Харківське шосе, 50, м. Київ, Україна, 02155

ORCID: 0000-0001-9660-5474**Scopus Author ID:** 7006413160

Бібліографічний опис статті: Кучеренко, В., Тамаркіна, Ю., Редько, А., Фролова, І. (2025). Активоване лугом довгополуменеve вугілля. Нанопориста структура та здатність адсорбувати важкі метали. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 51–68, doi:

АКТИВОВАНЕ ЛУГОМ ДОВГОПОЛУМЕНЕВЕ ВУГІЛЛЯ. НАНОПОРИСТА СТРУКТУРА ТА ЗДАТНІСТЬ АДСОРБУВАТИ ВАЖКІ МЕТАЛИ

Мета. Дослідження реорганізації супрамолекулярної та пористої структури довгополуменевого вугілля з підвищенням температури лужної активації, та оцінка її впливу на адсорбційну активність по відношенню до катіонів свинцю.

Методологія. Отримання вуглецевих матеріалів (ВМ) виконували нагріванням імпрегнованого лугом (KOH) вугілля до однієї з температур у межах 350–825°C з ізотермічною витримкою 1 год, охолодженням, відмиванням від луку та сушінням. Елементний склад визначено аналізатором Carlo Erba 1106. Вміст кислотних функційних груп (КФГ) визначено титруванням по Бему. Просторову структуру ВМ вивчено методом РФА. Характеристики пористості ВМ розраховано за ізотермами низькотемпературної (77 K) адсорбції – десорбції азоту (метод 2D-NLDFT-HS). Адсорбцію катіонів Pb(II) виміряно при 25°C та постійному вмісті ВМ (1 г/л) у водних розчинах. Кінетику адсорбції розраховано моделями псевдо-першого та псевдо-другого порядку. Ізотерми адсорбції апроксимовано моделями Ленгмюра та Фрейндліха.

Наукова новизна. Вперше досліджено адсорбційну активність по відношенню до Pb(II) вуглецевих матеріалів, отриманих лужною активацією довгополуменевого вугілля за різних температур при невеликому співвідно-

шенні KOH/вугілля (1 г/г). Знайдено, що адсорбційна рівновага досягається за 2 год, кінетика адсорбції підпорядковується моделі псевдо-другого порядку, а ізотерми адсорбції краще апроксимуються моделлю Ленгмюра. Швидкість адсорбції лімітується взаємодією катіонів з поверхневими адсорбційними центрами, а не дифузією в пористу систему. Визначено, що температура активації є ключовим фактором формування нанопористості ВМ та його здатності адсорбувати катіони Pb(II). З підвищенням температури адсорбційні ємності моношару катіонів, розрахованих з рівняння Ленгмюра, зростають з 0,143 ммоль/г до 0,981 ммоль/г. Встановлено, що основними процесами адсорбції Pb(II) зразками ВМ з довгополуменевого вугілля є реакції іонного обміну (обмін протонів КФГ на Pb(II)) та π -сорбція (взаємодія Pb(II) з π -системою вугільних поліаренів). Показано, що внесок π – сорбції зростає з температурою активації та є домінуючим (87–91%) у матеріалів, отриманих при 800–825°C. Досить висока ємність за Pb(II) цих ВМ дозволяє прогнозувати їх ефективність при очищенні води від інших важких металів.

Ключові слова: довгополуменеve вугілля, лужна активація, вуглецевий матеріал, адсорбція свинцю, π – сорбція.

Volodymyr KUCHERENKO

Doctor of Chemical Sciences, Senior Researcher, Head of the Department of Coal Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, NAS of Ukraine, 50 Kharkivske shose str., Kyiv, Ukraine, 02155

ORCID: 0000-0001-7234-947X

Scopus Author ID: 7005252259

Yuliia TAMARKINA

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher at the Department of Investigations of Nucleophilic Reactions, L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, NAS of Ukraine, 50 Kharkivske shose str., Kyiv, Ukraine, 02155

ORCID: 0000-0002-8747-4481

Scopus Author ID: 6507643028

Anastasia REDKO

Leading Engineer at the Department of Coal Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, NAS of Ukraine, 50 Kharkivske shose str., Kyiv, Ukraine, 02155

ORCID: 0000-0001-9768-4020

Scopus Author ID: 58503199300

Iryna FROLOVA

Candidate of Chemical Sciences, Researcher at the Department of Coal Chemistry, L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry, NAS of Ukraine, 50 Kharkivske shose str., Kyiv, Ukraine, 02155

ORCID: 0000-0001-9660-5474

Scopus Author ID: 7006413160

To cite this article: Kucherenko, V., Tamarkina, Yu., Redko, A., Frolova, I. (2025). Aktyvovane luhom dovhopolumeneve vuhillia. Nanoporysta struktura ta zdatnist adsorbuvaty vazhki metaly [Alkali-activated long-flame coal. Nanoporous structure and ability to adsorb heavy metals]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 51–68, doi:

ALKALI-ACTIVATED LONG-FLAME COAL. NANOPOROUS STRUCTURE AND ABILITY TO ADSORB HEAVY METALS

Purpose. Study of the reorganizing supramolecular and porous structure of long-flame coal with increasing alkaline activation temperature, and assessment of its effect on adsorption activity towards lead cations.

Methodology. Carbon materials (CMs) were obtained by heating KOH-impregnated coal to one of the temperatures within 350–825°C, isothermal holding for 1 h, cooling, washing from alkali and drying. The elemental composition was determined by a Carlo Erba 1106 analyzer. The content of acidic functional groups (AFG) was determined by Boehm titration. The spatial structure of CMs was studied by X-ray diffraction. The porosity characteristics of CMs were calculated using low-temperature (77 K) nitrogen adsorption–desorption isotherms (2D-NLDFT-HS method). Adsorption

of Pb(II) cations was measured at 25°C and a constant CM content (1 g/l) in aqueous solutions. Adsorption kinetics were fitted using pseudo-first and pseudo-second order models. Adsorption isotherms were approximated by Langmuir and Freundlich models.

Originality. The adsorption activity towards Pb(II) of carbon materials obtained by alkaline activation of long-flame coal at different temperatures at a small KOH/coal ratio (1 g/g) was studied for the first time. The adsorption equilibrium was found to be reached for 2 h, the adsorption kinetics obey the pseudo-second-order model, and the adsorption isotherms are better approximated by the Langmuir model. The adsorption rate is limited by the interaction of cations with surface adsorption centers, rather than diffusion into the porous system. The activation temperature was determined to be a key factor of forming CMs nanoporosity and ability to adsorb Pb(II) cations. With increasing temperature, the adsorption capacities of the cations monolayer, calculated from the Langmuir equation, increase from 0.143 mmol/g to 0.981 mmol/g. The basic processes of Pb(II) adsorption by CMs samples from long-flame coal is established to be ion-exchange reactions (exchange of AFGs protons for Pb(II)) and π -sorption (interaction of Pb(II) with the π -system of coal polyarenes). The contribution of π -sorption was shown to increase with the activation temperature and is dominant (87–91%) in materials obtained at 800–825°C. The sufficiently high capacity for Pb(II) of these CMs allows us to predict their effectiveness in purifying water from other heavy metals.

Key words: long-flame coal, alkaline activation, carbon material, lead adsorption, π -sorption.

Актуальність проблеми. Ефективність адсорбційного очищення води від забруднювачів значною мірою залежить від властивостей адсорбентів, що використовуються. Окрему групу таких адсорбентів складають вуглецеві матеріали (ВМ) з великою поверхнею ($\geq 1000 \text{ м}^2/\text{г}$), які одержують активацією – нагріванням вихідної сировини – прекурсора у присутності активуючих агентів: водяної пари, CO_2 , KOH , H_3PO_4 , ZnCl_2 та інших. Найбільш ефективним процесом формування нанопористості ВМ є лужна активація – термохемоліз вихідної речовини з гідроксидами лужних металів (зазвичай NaOH або KOH) при 700–900°C. Залежно від умов термохемолізу утворюються матеріали з величиною питомої площі поверхні ($S_{\text{ВЕТ}}$) до 4547 $\text{м}^2/\text{г}$ (Tiwari, 2018), яка на сьогодні є найбільшою. Такі ВМ мають хороші адсорбційні властивості, що робить їх перспективними матеріалами для зберігання водню (So, 2023), природного газу (Kumar, 2017) або електроенергії в суперконденсаторах та батареях (Bora, 2021), уловлювання парофазного радіоактивного йоду (Ma, 2021) та парникового газу (CO_2) (Malini, 2023), очищення води від екотоксикантів (Zhao, 2023).

Велике практичне значення таких матеріалів спонукає наукову спільноту на отримання ВМ із нових, раніше не вивчених прекурсорів, а також на вдосконалення лужної активації відповідно до принципів «зеленої хімії». Важливою складовою тут є дослідження взаємозв'язку умов активації з просторовою та нанопористою структурою ВМ, а також визначення впливу структури на адсорбційні властивості. Такі системні дослідження в даний час виконуються стосовно активації відновлюваних прекурсорів,

зокрема біомаси (Mishra, 2024). Що стосується лужної конверсії викопного вугілля, то даних поки що недостатньо, хоча саме умови процесу є ключовим фактором формування властивостей ВМ. Необхідність досліджень впливу умов активації на структуру та адсорбційну активність ВМ з метою удосконалення методів синтезу вуглецевих адсорбентів визначає актуальність представленої роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Три основних чинники визначають характеристики пористої структури ВМ, отриманих лужною активацією. Це тип вихідної сировини – прекурсора, вагове співвідношення $\text{KOH}/\text{прекурсор}$ (R_{KOH}) та температура процесу.

Лужна активація дозволяє конвертувати у ВМ практично будь-яку вуглецевмісну речовину: викопне вугілля (Zhao, 2023), полімери (Kaur, 2019), біомасу (Mishra, 2024), промислові та побутові органічні відходи (Chaudhary, 2024). Варіювання прекурсора дає безліч різновидів ВМ, які істотно розрізняються за властивостями і це кожного разу потребує вивчення їх адсорбційних характеристик. Що стосується викопного вугілля, то його тип та реакційна здатність визначається ступенем метаморфізму (СМ) та вмістом карбону, який збільшується від 70% до 96% зі зростанням СМ.

Вплив співвідношення $\text{KOH}/\text{прекурсор}$ вивчено у багатьох роботах, що дозволило встановити основну закономірність – збільшення R_{KOH} сприяє розвитку нанопористості і питомої поверхні кінцевого ВМ та покращенню адсорбційних властивостей. Наприклад, зі зростанням значення R_{KOH} з 1 г/г до 3 г/г в однакових умовах лужної активації (800°C, 1 год) величина $S_{\text{ВЕТ}}$ зростає з 354 $\text{м}^2/\text{г}$ до 1158 $\text{м}^2/\text{г}$ для ВМ

з вугілля (Yan, 2011), з 591 м²/г до 1690 м²/г для ВМ з відходів полімерів (Kaur, 2019), з 1214 м²/г до 1633 м²/г для ВМ з карбонізату (300°C) крахмалу (Li, 2022), з 822 м²/г до 1859 м²/г для ВМ з антрациту (Namyali, 2022). У той же час збільшення кількості активанта (KOH) сильно ускладнює технологічний процес і неприйнятно з екологічної точки зору. Тому важливими є дослідження активації за невеликих співвідношень $R_{\text{KOH}} \leq 1$ г/г. Ця область залишається поза увагою, хоча вона перспективна для вдосконалення синтезу нанопористих ВМ. На сьогодні найбільш яскравий результат описано у роботі (Zhu, 2024), в якій отримано ВМ з питомою поверхнею $S_{\text{ВЕТ}} = 2276$ м²/г при лужній активації лігносульфонату натрію при невисокому співвідношенні $R_{\text{KOH}} = 0,4$ г/г.

Вплив температури активації на властивості ВМ вивчено менше. Описані у літературі температурні залежності $S_{\text{ВЕТ}}$ (Yoshizawa, 2002; Zhao, 2014; Кучеренко, 2024) показують, що збільшення температури активації в межах 400–800°C призводить до зростання (зазвичай нелінійного) питомої поверхні ВМ. В інтервалі 800–900°C величина $S_{\text{ВЕТ}}$ знижується внаслідок так званої переактивації (overactivation) (Zhang, 2015), яка трансформує мікропори у мезопори за рахунок вигорання – реакцій С-атомів стінок пор та KOH з утворенням оксидів вуглецю.

Найчастіше лужну активацію проводять у інтервалі 700–800°C. Наявні дослідження спрямовані на отримання ВМ з максимально можливою поверхнею, а процеси трансформації прекурсора в ВМ з підвищенням температури залишаються поза увагою. Дуже мало інформації про термоініційовані реакції з KOH в області температур $\leq 600^\circ\text{C}$, хоча вони відіграють визначальну роль у перебудові просторового каркасу прекурсора у вторинний каркас ВМ. Також не відомо, як перебіг таких реакцій впливає на адсорбційні властивості ВМ.

Раніше вивчено пористу структуру та адсорбційні властивості зразків ВМ, отриманих лужною активацією (800°C, $R_{\text{KOH}} = 1$ г/г) вихідного вугілля різного СМ (Тамаркіна, 2020). Встановлено, що матеріали з найбільш розвинутою поверхнею та максимальною адсорбційною ємністю за різними адсорбатами (йод, фенол, 4-хлорфенол, барвник метиленовий блакитний) утворюються з кам'яного вугілля низького СМ – довгополуменового вугілля марки Д

(Тамаркіна, 2022). Він утворює нанопористі матеріали з питомою поверхнею ≥ 1500 м²/г, що є високими значеннями для ВМ, отриманих при малих співвідношеннях R_{KOH} (Кучеренко, 2024). Формування адсорбційних властивостей цього вугілля при його перетворенні на ВМ із зростанням температури від кімнатної до 800°C вивчено на прикладі метиленового блакитного (Редько, 2024) та 4-хлорфенолу (Кучеренко, 2024). Це типові представники органічних екотоксикантів та їх найчастіше застосовують для оцінки адсорбційної активності ВМ різної природи. Адсорбційну активність ВМ з довгополуменового вугілля по відношенню до важких металів не вивчено. Було доцільним оцінити її на прикладі адсорбції катіонів свинцю з водних розчинів. Свинець обрано як типовий представник групи важких металів, який характеризується високою токсичністю. Згідно з Всесвітньою організацією охорони здоров'я, максимально допустима концентрація свинцю у воді 0.01 мг/л (Biswal, 2023), отже розробка адсорбентів для його уловлювання з водних середовищ є також актуальним та важливим (Ghorbani, 2020).

Мета дослідження – вивчити реорганізацію супрамолекулярної та пористої структури довгополуменового вугілля, обумовлену підвищенням температури лужної активації, та оцінити її вплив на адсорбційну активність по відношенню до катіонів свинцю.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження виконано на зразку довгополуменового вугілля (пласт з геологічним індексом k_8) з розміром частинок 0,16–0,25 мм, аналітичною вологістю $W^a = 10,9\%$, та зольністю $A^d = 1,8\%$. Елементний склад органічної вугільної речовини (% daf): С 78,6; Н 5,5; N 1,9; S 1,2; О 12,8 (за різницею).

Імпрегнування вугілля гідроксидом калію виконували в три стадії: 1) змішування 10 г висушеного вугілля та 33,3 г водного розчину KOH (30%) для забезпечення співвідношення $R_{\text{KOH}} = 1,0$ г/г; 2) витримку 24 год при кімнатній температурі; 3) видалення водної фази при 90–100°C та залишкової води при $120 \pm 10^\circ\text{C}$ ($120 \pm 10^\circ\text{C}$, ≥ 2 год). Активацію імпрегнованого вугілля (~40 г) виконували в потоці аргону термопрограмованим (4 град/хв) нагріванням до заданої температури t , ізотермічною витримкою 1 год при температурі t

та охолодженням до $t \leq 50^\circ\text{C}$. Утворений вуглецевий продукт послідовно відмивали від сполук калію водою, розчином HCl (0.1M) і знов водою до від'ємної реакції на іони Cl^- (за AgNO_3), потім сушили ($120 \pm 5^\circ\text{C}$) до постійної ваги і визначали вихід Y (%). Похибка визначення виходу ВМ становить $\pm 2\%$. Синтезовані за різних температур зразки позначено $\text{BM}(t)$, наприклад, $\text{BM}(800)$ – зразок, отриманий при $t = 800^\circ\text{C}$.

Елементний склад ВМ визначено аналізатором Carlo Erba 1106 (Кучеренко, 2024). Вміст кислотних функційних груп [КФГ] (ммоль/г), тобто суми вмісту карбоксильних $[\text{COOH}]$ та фенольних груп $[\text{OH}]$, визначено титруванням по методу Бема (Momčilović, 2011), який передбачає, що титрування NaHCO_3 визначає вміст карбоксильних груп, а титрування NaOH – сумарний вміст КФГ. Просторову структуру ВМ вивчено методом РФА за допомогою дифрактометра Bruker D8. Умови запису дифрактограм такі: випромінювання CuK_α (30 кВт, 50 мА, довжина хвилі $\lambda = 0,154$ нм), шаг сканування – $0,019$ град, час накопичення сигналу – 20 с/шаг. Для подальшого аналізу дифрактограму відокремлювали від вузьких рефлексів мінеральних компонентів інтерполяцією, а потім здійснювали деконволюцію з виділенням «класичної» γ -смуги, рефлексів (002) та (100) (Li M., 2013). Визначали такі параметри супрамолекулярної структури: міжшарову відстань у кристалах d_{002} , висоту L_c , середній діаметр L_a і об'єм кристаліта $V_{\text{кр}}$, інтенсивність I_{002} (отн. ед.) рефлексу (002), а також число поліаренових шарів $N = (L_c/d_{002}) + 1$ та їх середню площу поверхні $S_{\text{AR}} = \pi L_a^2/4$. Величину d_{002} розраховано за формулою Бреґа $d_{002} = \lambda/2\sin\theta_{002}$, величину L_c визначено за формулою Шеррера $L_c = 0,9\lambda/\beta_{002}\cos\theta_{002}$, величину L_a – за формулою Уоррена $L_a = 1,84\lambda/\beta_{100}\cos\theta_{100}$, де θ_{002} і θ_{100} – кутове положення рефлексів (002) і (100), відповідно; β_{002} і β_{100} – ширина (в радіанах) на половині висоти рефлексів (002) і (100), відповідно (Li H., 2023). Експериментально визначені похибки становлять $\pm 0,004$ нм (d_{002}); $\pm 0,006$ нм (L_c); $\pm 0,02$ нм (L_a); $\pm 0,05$ нм² (S_{AR}); $\pm 0,05$ нм³ ($V_{\text{кр}}$), $\pm 0,05$ (N).

Характеристики пористості ВМ визначено за ізотермами низькотемпературної (77 К) адсорбції – десорбції азоту (прилад Sorptomatic 1990, Thermo Finnigan, США), який аналізує пори починаючи з відносного тиску $p/p_0 = 10^{-6}$ – 10^{-7} . Перед вимірюваннями зразки ВМ дегазували

20 год (260°C). Загальний об'єм пор V (см³/г) визначали за кількістю N_2 , адсорбованого при відносному тиску $p/p_0 \sim 1,0$. Методом BET розраховували величину питомої поверхні S_{BET} , а методом 2D-NLDFT-HS (2-Dimensional Non-local Density Functional Theory, Heterogenous Surface, програма SAIEUS) (Jagiello, 2020) розраховували інтегральні та диференційні залежності питомої поверхні S_{DFT} (м²/г) та об'єму пор V (см³/г) від середнього діаметру пор (D , нм). З інтегральних залежностей « $V - D$ » та « $S_{\text{DFT}} - D$ » визначали об'єми ультрамікропор (V_{umi}), супермікропор (V_{smi}) та мікропор (V_{mi}); $V_{\text{mi}} = V_{\text{umi}} + V_{\text{smi}}$. Сумарний об'єм мезо- і макропор розраховували за різницею $V_{\text{me+ma}} = V_t - V_{\text{mi}}$. Аналогічно визначали питому поверхню ультрамікропор (S_{umi}), супермікропор (S_{smi}), мікропор (S_{mi}) та сумарну поверхню мезо- і макропор ($S_{\text{me+ma}}$). Позначення пор та їх середні діаметри прийняті відповідно до рекомендації IUPAC (Thommes, 2015): ультрамікропори ($D \leq 0,7$ нм), супермікропори ($D = 0,7$ – $2,0$ нм), мікропори ($D \leq 2,0$ нм). Зазначені категорії пор об'єднуються терміном «нанопори» з верхньою межею $D \leq 100$ нм (Thommes, 2015).

Адсорбційну ємність за катіонами Pb(II) (A_{Pb} , ммоль/г) визначали за наступною методикою. Наважку висушеного при $120 \pm 10^\circ\text{C}$ зразка ВМ (0,100 г) поміщали в конічну колбу, вводили розчин ($V = 100$ см³) нітрату свинцю в ацетатному буфері (рН 5,4) заданої початкової концентрації ($C_{\text{Pb(0)}}$) та струшували при $25,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ (200 об/хв, баня-шейкер MAXTURDY-45, Daihan Scientific Co). У всіх дослідах вміст ВМ в розчині адсорбату був постійним – 1 г/л. Після закінчення заданого часу суміш фільтрували та вимірювали концентрацію катіонів Pb(II) , яку визначали титруванням розчином трилону-Б (0,005 М) у присутності ксиленолового оранжевого (0,05%) (Редько, 2023).

Кількість адсорбованого Pb(II) визначали за формулою $A = (C_{\text{Pb(0)}} - C) \times V/m$, де $C_{\text{MB(0)}}$ та C – початкова і кінцева концентрації Pb(II) , V – об'єм розчину (100 см³), m – наважка ВМ (0,100 г). Кінцева концентрація C є поточною концентрацією C_t при заданому часі t (хв) або рівноважною $C_{\text{Pb(e)}}$ (при реєстрації ізотерм адсорбції). Дані по кінетиці адсорбції Pb(II) апроксимували з використанням моделей псевдо-першого (1) та псевдо-другого (2) порядків (Revellame, 2020).

$$A_{Pb} = A_{Pb(e)} \left[1 - \exp(-k_1 \tau) \right] \quad (1)$$

$$A_{Pb} = k_2 A_{Pb(e)}^2 \tau / (1 + k_2 A_{Pb(e)} \tau) \quad (2).$$

Для розрахунку ізотерм адсорбції використовували двопараметрові моделі Ленгмюра (3) і Фрейндліха (4) (Al-Ghouti, 2020)

$$A_{Pb(e)} = A_{Pb(L)} k_L C_{Pb(e)} / (1 + k_L C_{Pb(e)}) \quad (3)$$

$$A_{Pb(e)} = k_F C_{Pb(e)}^{1/n} \quad (4),$$

де $A_{Pb(L)}$ – адсорбційна ємність моношару адсорбату, k_L – константа Ленгмюра, k_F та n_F – константи Фрейндліха. Питому адсорбційну ємність $A_{Pb(S)}$ (мкмоль/м²) визначали як $A_{Pb(S)} = 1000 \times A_{Pb(L)} / S_{\text{ВЕТ}}$ (мкмоль/м²). Параметр $A_{Pb(S)}$ є пропорційним концентрації адсорбційних центрів (АЦ) на поверхні ВМ.

Вихід та характеристики отриманих ВМ наведено в табл. 1. Зі зростанням температури від

350°C до 825°C вихід ВМ лінійно знижується внаслідок реакцій деструкції органічної вугільної речовини та термоініційованих реакцій вугілля з КОН. Вміст вуглецю змінюється екстремально з мінімумом (72,7%) при 500°C а потім збільшується до максимального значення (86,7%) при 825°C. Вміст кисню зі зростанням температури змінюється антибатно вмісту вуглецю.

Супрамолекулярна структура ВМ може бути представлена як аморфний каркас, який включає розорієнтовані в просторі поодинокі поліарени (графені) і кристаліти – агрегати з приблизно паралельною упаковкою поліаренів. Метод РФА фіксує тільки параметри кристалітів (табл. 2).

До 400°C міжшарова відстань d_{002} майже не змінюється, але різко збільшується при подальшому підвищенні температури активації. Висота кристалітів L_c змінюється антибатно відстані d_{002} .

Таблиця 1

Вихід, вміст вуглецю, кисню та кислотних груп ВМ

Зразок	Y, %	C ^{daf} , %	O ^{daf} , %	[ОН], ммоль/г	[COOH], ммоль/г	[КФГ], ммоль/г
Д		78,6	12,9	1,04	0,33	1,37
ВМ(350)	70,2	75,6	17,3	1,52	0,43	1,95
ВМ(400)	68,8	75,7	18,3	1,54	0,70	2,24
ВМ(450)	66,5	74,8	20,5	1,93	0,58	2,51
ВМ(500)	65,1	72,7	23,2	2,67	0,49	3,16
ВМ(550)	61,5	73,5	22,9	3,32	0,40	3,72
ВМ(600)	58,8	73,8	23,2	3,44	0,43	3,87
ВМ(650)	56,5	75,5	22,4	3,16	0,43	3,59
ВМ(700)	49,3	78,6	20,0	2,65	0,29	2,94
ВМ(750)	47,7	80,4	18,4	1,56	0,25	1,81
ВМ(785)	45,9	85,7	13,3	1,22	0,17	1,39
ВМ(800)	45,5	86,3	12,7	0,70	0,13	0,83
ВМ(825)	45,3	86,7	12,3	0,67	0,11	0,78

Таблиця 2

Параметри супрамолекулярної структури зразків ВМ

Зразок	d_{002} , нм	L_c , нм	L_a , нм	S_{AR} , нм ²	$V_{кр}$, нм ³	N	I_{002} , відн.од.
Д	0.407	0.872	1.46	1.67	1.46	3.14	18800
ВМ(350)	0.395	0.871	1.45	1.65	1.44	3.20	17900
ВМ(400)	0.402	0.850	1.55	1.89	1.60	3.11	17700
ВМ(450)	0.400	0.802	1.50	1.77	1.41	3.00	18300
ВМ(500)	0.408	0.789	1.70	2.27	1.79	2.94	18400
ВМ(550)	0.417	0.730	1.65	2.40	1.56	2.75	16500
ВМ(600)	0.431	0.751	1.87	2.75	2.06	2.74	17000
ВМ(650)	0.440	0.709	2.10	3.46	2.47	2.61	15200
ВМ(700)	0.435	0.709	2.61	5.35	3.39	2.63	15000
ВМ(750)	0.442	0.723	2.73	5.85	4.23	2.64	11000
ВМ(785)	0.446	0.699	3.20	8.04	5.62	2.57	10600
ВМ(800)	0.441	0.704	3.24	8.24	5.80	2.57	7400
ВМ(825)	0.437	0.701	3.30	8.55	5.99	2.60	6600

Середнє число графенових шарів в кристалітах зменшується, що свідчить про відшарування як мінімум одного графенового шару в деяких кристалітах. Середній діаметр L_a мало змінюється до 450°C і зростає приблизно в 2.2 рази до 825°C. Відповідно зростає площа поліарена, що передається лінією 1 на рис. 1. Вміст кристалітів в аморфному каркасі ВМ, який зумовлює інтенсивність рефлексу I_{002} (лінія 2, рис. 1), зменшується за рахунок повного розшарування кристалітів. Як наслідок, з підвищенням температури активації супрамолекулярна структура ВМ стає більш аморфною, в якій поодинокі поліарени розорієнтовані у просторі відносно один одного.

Вміст КФГ зростає до найбільшого у зразка ВМ(600) внаслідок термоініційованих реакцій, у яких гідроксид калію виступає донором О-атомів. Це дві основні групи реакцій: 1) лужний гетероліз С-О і С-С зв'язків вугільного каркасу, наприклад, $\text{Ar-C-R} + \text{KOH} \rightarrow \text{Ar-COK} + \text{H-R}$; 2) дегідрування, яке утворює КФГ, наприклад, $\text{Ar-H} + \text{KOH} \rightarrow \text{ArOK} + \text{H}_2$ та $\text{Ar-CH}_2\text{-R} + \text{KOH} \rightarrow \text{Ar-CH(OK)-R} + \text{H}_2$. Зниження вмісту КФГ в інтервалі 600–825°C обумовлено домінуванням реакцій їх термодеструкції з виділенням СО та СО₂, а також конденсаційними процесами, які збільшують розміри ароматичних фрагментів вторинного каркасу ВМ (рис. 1)

та утворюють між ними $\text{C}_{\text{ar}}\text{-O-C}_{\text{ar}}$ та одинарні $\text{C}_{\text{ar}}\text{-C}_{\text{ar}}$ зв'язки (Кучеренко, 2024).

Питома поверхня S_{BET} зразків ВМ лінійно ($R^2 = 0.992$) збільшується з температурою активації (табл. 3). Значення S_{DFT} не збігаються з величинами S_{BET} , але тенденція збільшення поверхні відтворюється. Температурна залежність S_{DFT} краще передається логарифмічною залежністю ($R^2 = 0.993$) порівняно з лінійною ($R^2 = 0.968$). Питома поверхня мікропор збільшується зі зростанням температури активації, а поверхня ультрамікропор S_{umi} змінюється екстремально з максимумом у зразка ВМ(600). Зниження величини S_{umi} після максимуму компенсується збільшенням питомої поверхні супермікропор, тобто зі зростанням температури лужної активації спостерігається ефект зміни розподілу пор за розмірами у мікропористому діапазоні (≤ 2 нм). Більш детально зміни елементного складу та об'ємів різних пор при перетворенні довгополуменового вугілля у ВМ розглянуто у роботі (Кучеренко, 2024).

Кінетику адсорбції катіонів свинцю зразками ВМ наведено на рис. 2. З плином часу адсорбційна ємність за Pb(II) збільшується і протягом приблизно ~2 год сягає рівноважних величин. Кінетичні залежності апроксимовано рівняннями псевдо-першого порядку (1) та псевдо-другого порядку (2), а їх коефіцієнти наведено в табл. 4.

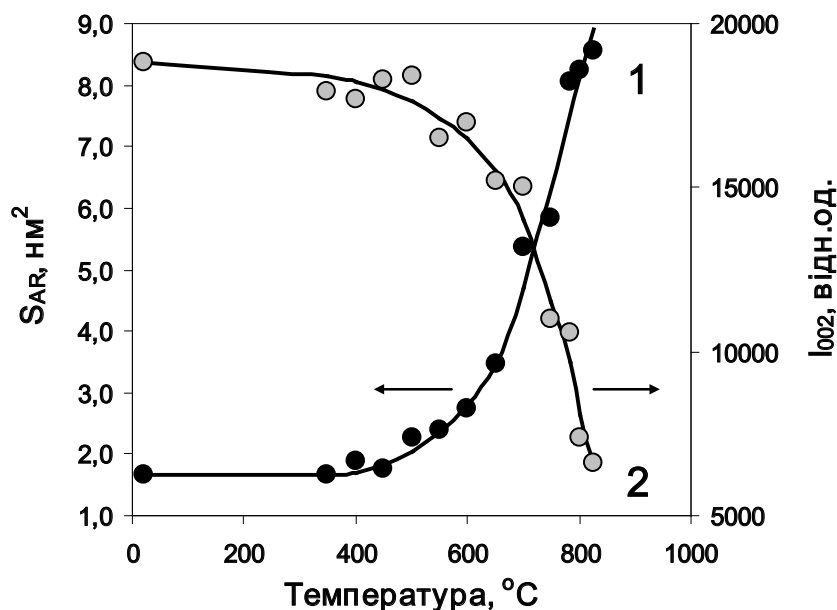


Рис. 1. Площа поліарену S_{AR} (1) та інтенсивність рефлексу I_{002} (2) кристалітів ВМ

Значення коефіцієнтів детермінації R^2 свідчать, що модель псевдо-першого порядку не дуже підходить для опису кінетики. Модель псевдо-другого порядку (2) застосовна краще. Вона стверджує, що швидкість адсорбції лімітується взаємодією молекул адсорбату з АЦ на поверхні вуглецевого матеріалу, а не дифузією всередину частинок адсорбенту (Revellame, 2020). Лінеаризацією рівняння в координатах « $(\tau/A_{pb}) - \tau$ » розраховано величини $A_{pb(e)}$ і константи k_2 (табл. 4), які свідчать про досить високу адсорбційну активність ВМ з довгополуменового вугілля.

Ізотерми адсорбції катіонів Pb(II) мають вигляд, як показано на рис. 3 для деяких

зразків ВМ. Їх апроксимації моделями Ленгмюра (суцільні лінії) та Фрейндліха (пунктирні лінії) дають коефіцієнти, наведені в табл. 5. В межах початкових концентрацій $C_{Pb(0)} \leq 10$ ммоль/л модель Ленгмюра апроксимує ізотерми краще. Треба підкреслити, що константи $k_{Pb(L)}$, $k_{Pb(F)}$ та n вельми чутливі до умов адсорбції, а саме – початкової концентрації $C_{Pb(0)}$, вмісту ВМ в розчині адсорбату, температури. Значення цих факторів в різних роботах значно відрізняються (іноді в 10 разів), що ускладнює їх коректне порівняння.

Адсорбційні ємності $A_{pb(L)}$ моношару катіонів Pb(II), які розраховано з моделі

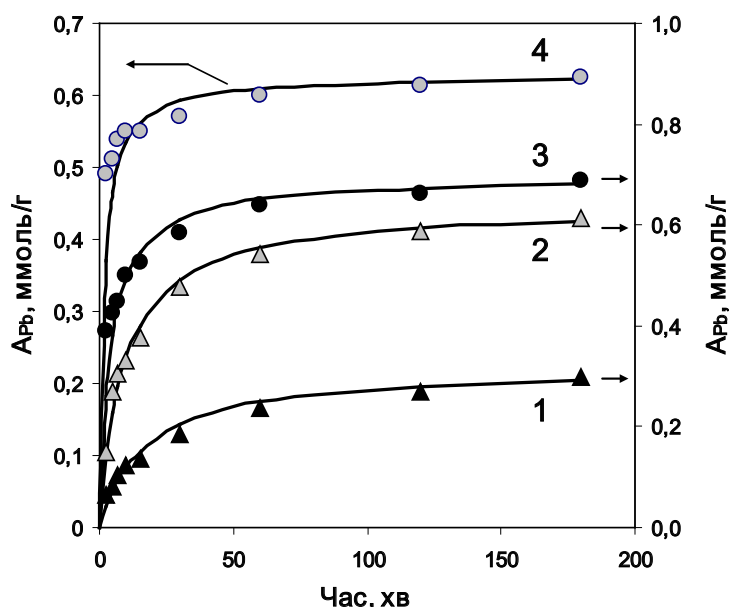


Рис. 2 Кінетика адсорбції катіонів Pb(II) зразками ВМ при $C_{Pb(0)} = 5$ ммоль/л: 1 – ВМ(500); 2 – ВМ(600); 3 – ВМ(700); 4 – ВМ(800)

Таблиця 3

Параметри пористої структури ВМ

Зразок	$V_p, \text{см}^3/\text{г}$	$S_{\text{ВЕТ}}, \text{м}^2/\text{г}$	$S_{\text{ДФТ}}, \text{м}^2/\text{г}$	$S_{\text{умі}}, \text{м}^2/\text{г}$	$S_{\text{смі}}, \text{м}^2/\text{г}$	$S_{\text{мі}}, \text{м}^2/\text{г}$	$S_{\text{ме+ма}}, \text{м}^2/\text{г}$
ВМ(350)	0,175	4,0	11,1	0	0	0	11,1
ВМ(400)	0,378	4,5	250	91	108	199	51
ВМ(450)	0,486	299	589	315	235	550	39
ВМ(500)	0,532	542	725	408	285	693	32
ВМ(550)	0,602	655	894	447	413	860	34
ВМ(600)	0,691	834	1021	526	464	990	31
ВМ(650)	0,750	946	1176	481	660	1141	35
ВМ(700)	0,837	1145	1318	447	821	1268	50
ВМ(750)	0,913	1363	1426	428	937	1365	61
ВМ(785)	1,047	1457	1522	458	985	1443	79
ВМ(800)	1,074	1677	1530	440	977	1417	113
ВМ(825)	1,091	1708	1514	405	1010	1415	99

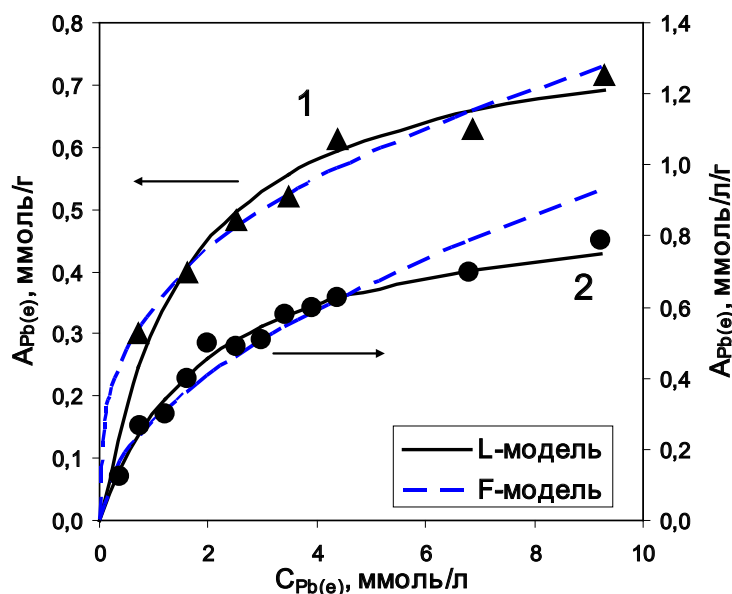


Рис. 3. Застосування моделей Ленгмюра та Фрейндліха для адсорбції катіонів Pb(II) зразками VM(600) (1) та VM(800) (2)

Таблиця 4

Параметри моделей псевдо-першого порядку, псевдо-другого порядку і внутрішньочасткової дифузії для адсорбції Pb(II) зразками VM

Параметр	Зразок VM			
	VM(500)	VM(600)	VM(700)	VM(800)
Модель псевдо-першого порядку				
$A_{Pb(e)}$, ммоль/г (експ)	0,300	0,614	0,689	0,626
$k_1 \times 10^3$, хв ⁻¹	2,8	16,6	20,8	19,5
R^2	0,884	0,912	0,935	0,946
Модель псевдо-другого порядку				
$A_{Pb(e)}$, ммоль/г (експ)	0,300	0,614	0,689	0,626
$A_{Pb(e)}$, ммоль/г (розрахунок)	0,318	0,639	0,697	0,628
k_2 , г/ммоль·хв	0,189	0,174	0,344	0,917
R^2	0,995	0,998	0,999	0,999

Таблиця 5

Параметри ізоTERM адсорбції катіонів Pb(II) вуглецевими матеріалами VM(600), VM(700) та VM(800)

Зразок	$k_{Pb(L)}$, л/ммоль	$A_{Pb(L)}$, ммоль/г	R^2	$k_{Pb(F)}$, (ммоль/г)(л/ммоль) ^{1/n}	n	R^2
VM(600)	0,630	0,817	0,989	0,345	2,98	0,981
VM(700)	0,598	0,981	0,992	0,339	2,73	0,945
VM(800)	0,501	0,910	0,987	0,279	1,84	0,933

Ленгмюра, пропорційні поверхневій концентрації АЦ. Вони збільшуються з ростом температури з 0.143 ммоль/г у вихідного вугілля до 0.981 мг/г у VM(700), тобто в 6.9 рази, хоча питома поверхня зростає приблизно в 340 разів. Температурна залежність $A_{Pb(L)}$ має складний

характер (рис. 4), який також відтворюється для рівноважної ємності при $C_{Pb(0)} = 5$ ммоль/л.

Візуально виділяються три температурні області. В першій ($\leq 350^\circ\text{C}$) параметри $A_{Pb(L)}$ та $A_{Pb(e)}$ не змінюються. Друга область ($350\text{--}700^\circ\text{C}$) характеризується найбільшим приростом

величини $A_{Pb(L)}$ (0.826 ммоль/г). Третя область (700–825°C) показує зниження величин $A_{Pb(L)}$ та $A_{Pb(e)}$ зі зростанням температури активації. Дані другої та третьої області можна апроксимувати лінійними кореляційними рівняннями.

Найбільшу адсорбційну ємність моношару ($A_{Pb(L)} = 0.981$ ммоль/г) має зразок ВМ(700). Для порівняння, різні ВМ мають ємності в межах $A_{Pb(L)} = 0.029$ –0.228 ммоль/г (промислові зразки активованого вугілля) (Asuquo, 2017), $A_{Pb(L)} = 0.064$ –1.42 ммоль/г (нанотрубки) (Ghorbani, 2020); $A_{Pb(L)} = 0.029$ –1.731 ммоль/г (ВМ з біомаси) (Qui, 2021; Jiang, 2023). Найбільшу ємність наведено для матеріалу з суміші оксиду заліза та відновленого оксиду графіту, модифікованого натрієм ($A_{Pb(L)} = 8.04$ ммоль/г) (Ghorbani, 2020). Значення питомої адсорбційної ємності $A_{Pb(S)}$ зменшуються в ~ 75 раз (з 35,8 мкмоль/м² до 0,48 мкмоль/м²) з підвищенням температури активації до 450°C, що обумовлено збільшенням питомої поверхні при невеликому збільшенні адсорбційної ємності Pb(II) (у ~ 2 рази). Для зразків ВМ(450) – ВМ(825) величини $A_{Pb(S)}$ перебувають в межах $A_{Pb(S)} = 0.48$ –0.90 мкмоль/м² та екстремально залежать від температури з максимумом у зразка ВМ(550). Підвищення

температури активації в інтервалі 550–825°C знижує поверхневу концентрацію АЦ.

Залежність ємності моношару $A_{Pb(L)}$ від питомої поверхні зразків ВМ складна та нагадує S-подібну криву (лінія 1, рис. 5). Величини $A_{Pb(L)}$ повільно зростають при $S_{ВЕТ} \leq 500$ м²/г і це супроводжується зниженням питомої ємності $A_{Pb(S)}$ з 35,8 мкмоль/м² до 0,48 мкмоль/м² (лінія 2, рис. 5). Подальше зростання $S_{ВЕТ}$ в інтервалі 500-1000 м²/г викликає найбільше підвищення $A_{Pb(L)}$, обумовлене збільшенням параметру $A_{Pb(S)}$, тобто збільшенням концентрації АЦ.

При подальшому розвитку поверхні в межах $S_{ВЕТ} = 1000$ -1800 м²/г зростання $A_{Pb(L)}$ сповільнюється, оскільки поверхнева концентрація АЦ знижується. На цей процес впливає зниження вмісту КФГ (табл. 1), які є адсорбційно активними по відношенню до катіонів свинцю.

Загальний механізм адсорбції катіонів свинцю включає такі маршрути: I) реакції іонного обміну протонів КФГ на катіони Pb(II); II) взаємодія Pb(II) з π -системою поліаренів, тобто π – сорбція; III) катіонообмінні реакції, в яких Pb(II) обмінюються з катіонами металів (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) у КФГ; IV) взаємодія Pb(II) з аніонами (OH^- , CO_3^{2-}) на поверхні

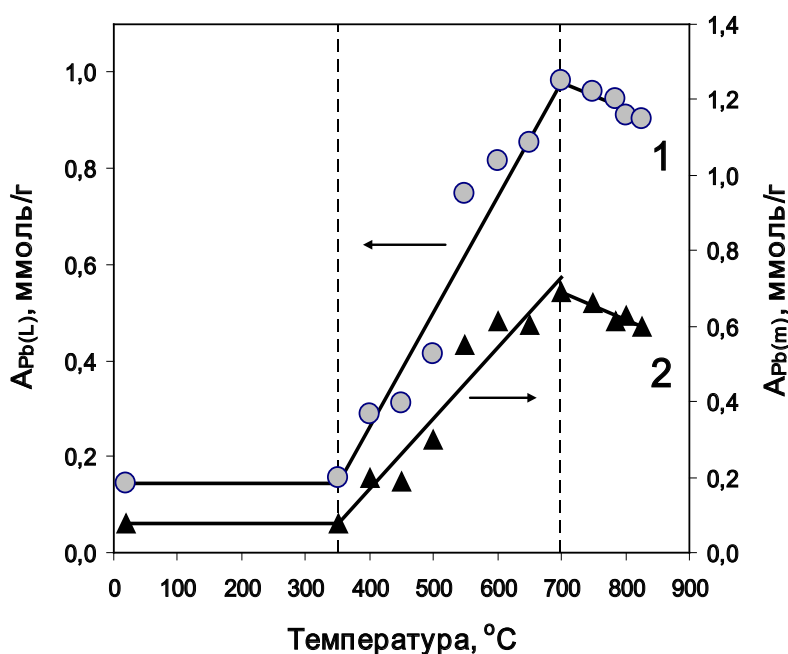


Рис. 4. Адсорбційні ємності за Pb(II) вуглецевих матеріалів, отриманих за різних температур: 1- $A_{Pb(L)}$, 2- $A_{Pb(e)}$ при $C_{Pb(0)} = 5$ ммоль/л

ВМ; V) електростатична взаємодія Pb(II) з аніонними поверхневими центрами; VI) фізична адсорбція (Liu, 2023; Biswal, 2023). У нашому випадку маршрути III та IV не значимі, оскільки зразки ВМ не містять КФГ з катіонами металів та характеризуються малою ($\leq 1\%$) зольністю (Кучеренко, 2024). Вклади маршрутів V і VI зазвичай малі і оцінюються 0,14–1,62% та 1,5–2,3%, відповідно (Liu, 2023). Можна прийняти, що основний внесок у поглинання Pb(II) отриманими зразками ВМ вносять іонообмінні реакції (маршрут I) та π -сорбція (маршрут II).

Вміст кислотних груп [КФГ] зразків ВМ залежить від температури активації екстремально з максимумом у зразка ВМ(600) (табл. 1). Значення ємності $A_{Pb(L)}$ в координатах « $A_{Pb(L)}$ – [КФГ]» формує складну картину (рис. 6). Зразки чітко розділилися на дві групи.

Перша група містить зразки від вихідного вугілля Д до ВМ(600), який відзначені пунктирною лінією на рис. 6. Для них спостерігається експоненційне зростання ємності $A_{Pb(L)}$ зі збільшенням змісту КФГ. Це передається лінією 1 на рис. 6 і апроксимується рівнянням $0,040\exp(0,729 \cdot [КФГ])$ ($R^2 = 0,956$).

Друга група – зразки ВМ(600) – ВМ(825), які показують тенденцію збільшення ємності $A_{Pb(L)}$, хоча вміст КФГ в них знижується в 5 разів

(з 3,87 ммоль/г до 0,78 ммоль/г). Можна зробити висновок, що тут домінуючим маршрутом поглинання Pb(II) є π -сорбція.

Взаємодія катіонів з π -електронами відіграє велику роль у різних наносистемах і може бути сильною. Наприклад, енергія взаємодії Na^+ з поліаренами варіюється в інтервалі 62,8–180 кДж/моль (Mahadevi, 2013), а катіона Pb(II) з бензолом складає 109,6 кДж/моль (Guo, 1990).

У зразках ВМ взаємодія здійснюється між катіонами Pb(II) та поліареновими (графеновими) фрагментами, які пов'язані $C_{ar}-O-C_{ar}$ та одинарними $C_{ar}-C_{ar}$ зв'язками в жорсткий просторовий каркас та розорієнтовані відносно один одного. Доступ до π -системи поліаренів забезпечує розвинена пористість. Оскільки енергія взаємодії катіонів з π -системою лінійно зростає зі збільшенням розмірів поліаренів (Mahadevi, 2013), доцільно оцінити такий ефект для адсорбції Pb(II) зразками ВМ. На рис. 7 наведено залежність параметра $A_{Pb(L)}$ від площі поліаренового фрагменту S_{ar} (табл. 2).

Зі збільшенням S_{ar} значення $A_{Pb(L)}$ змінюються складним чином. Ряд зразків від вихідного вугілля Д до ВМ(600) характеризується різким зростанням $A_{Pb(L)}$ (лінія 1, рис. 7) та апроксимуються лінійним рівнянням $A_{Pb(L)} = 0,548 \cdot S_{ar} - 0,775$ ($R^2 = 0,923$).

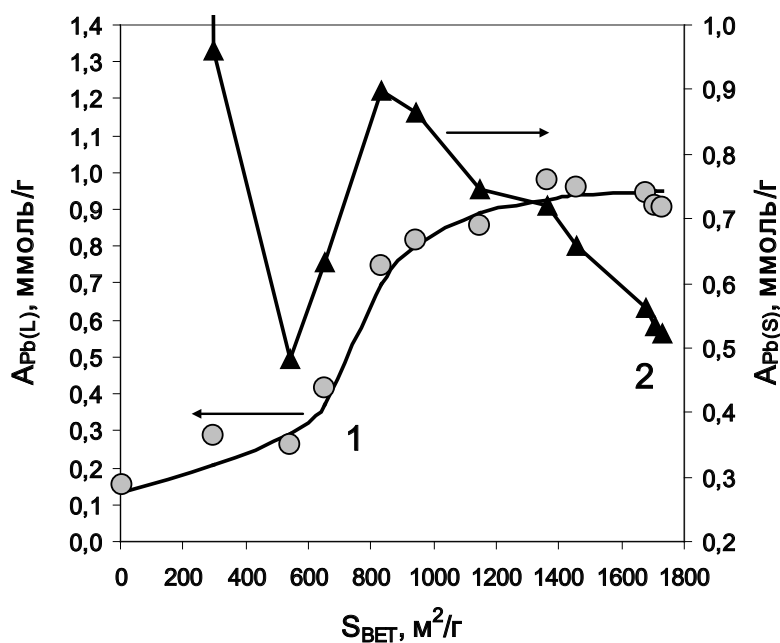


Рис. 5. Залежності адсорбційної ємності $A_{Pb(L)}$ (1) та питомої ємності $A_{Pb(S)}$ (2) зразків ВМ від загальної питомої поверхні S_{BET}

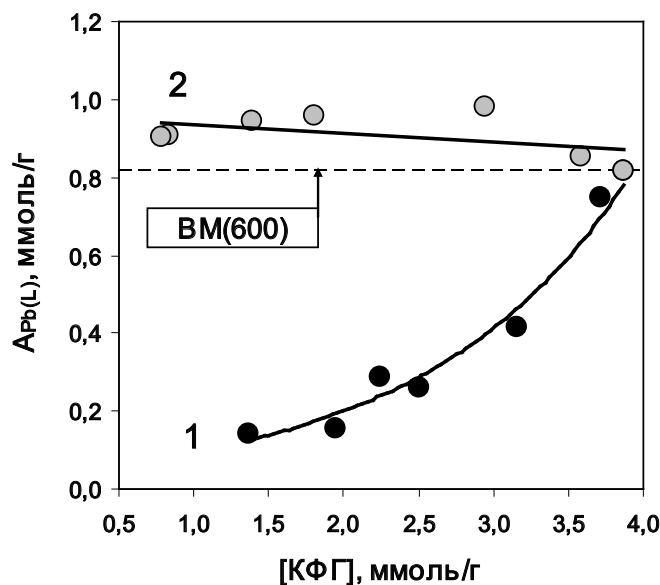


Рис. 6. Ємність моношару $A_{Pb(L)}$ зразків ВМ як функція вмісту КФГ: 1–зразки Д – ВМ(600); 2–зразки ВМ(600) – ВМ(825)

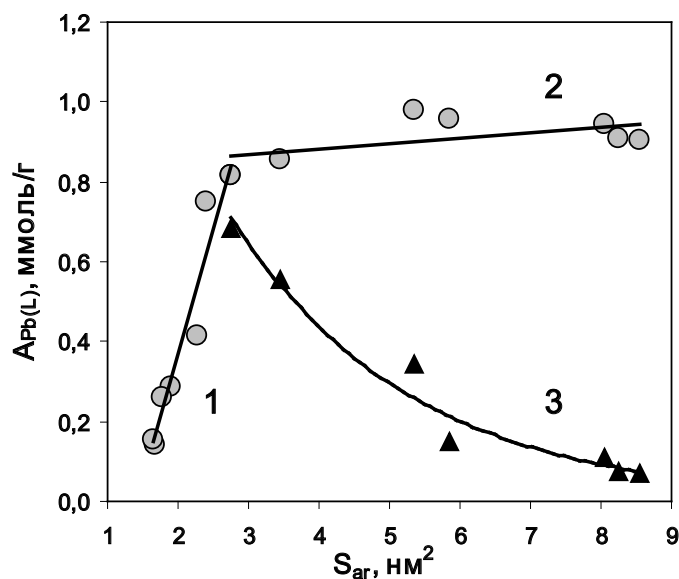


Рис. 7. Залежності $A_{Pb(L)}$ від площі поліаренового фрагменту S_{ar} : 1 – зразки Д – ВМ(600); 2 – зразки ВМ(600) – ВМ(825); 3 – розрахункові значення $A_{Pb(L)}$

Середній коефіцієнт збільшення ємності складає $k_{Pb} = 0,548$ ммоль/г·нм². У цьому ряду ВМ площа поліарена збільшується в 1,65 разів. (з 1,67 нм² до 2,75 нм²), а ємність $A_{Pb(L)}$ – в 5,72 рази. Очевидно, що різке зростання значення $A_{Pb(L)}$ в інтервалі $S_{ar} \leq 3$ нм² додатково обумовлено адсорбцією катіонів свинцю кислотними групами.

Другий інтервал, поданий зразками АВ(Д) (600) – АВ(Д)(825) ($S_{ar} > 2,75$ нм²), показує невелике збільшення ємності $A_{Pb(L)}$ з коефіцієнтом $k_{Pb} = 0,0118$ ммоль/г·нм². Тобто виявляється лише тенденція зростання ємності за Pb(II), що показано лінією 2 на рис. 7. У цьому інтервалі вміст КФГ знижується сильно (з 3,87 ммоль/г до 0,78 ммоль/г). Якщо прийняти, що адсорбційна

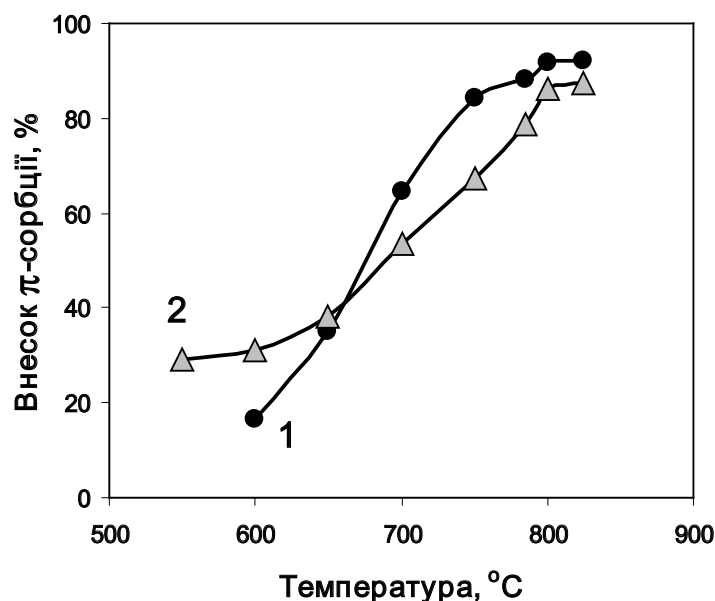


Рис. 8. Внесок π -сорбції в поглинання катіонів свинцю

активність КФГ однакова для всіх ВМ та у другому інтервалі значення $A_{Pb(L)}$ визначаються лише вмістом [КФГ], то отримаємо розрахункове зниження ємності, яке показано лінією 3 на рис. 7. Різниця значень залежностей 2 та 3 є оцінка (метод 1) вкладу π -сорбції у загальне поглинання катіонів свинцю. Цей внесок збільшується зі зростанням температури синтезу ВМ та досягає 91%, що показує залежність 1 на рис. 8.

Метод 2 оцінки вкладів КФГ та π -сорбції в адсорбцію $Pb(II)$ полягає в наступному. Приймаємо, що питомі внески адсорбції кислотними групами $A_{Pb(g)}$ (ммоль/г·ммоль КФГ) та π -сорбції $A_{Pb(\pi)}$ (ммоль/г·нм²) постійні для ВМ, отриманих в інтервалі температур 600 – 825°C. В цих умовах просторовий каркас ВМ вже сформовано і процес активації визначається лише формуванням пористої структури. За умов $A_{Pb(g)} = \text{Const}$ і $A_{Pb(\pi)} = \text{Const}$ адсорбційна ємність зразків АВ(Д)(600) – АВ(Д)(825) визначатиметься загальним рівнянням $A_{Pb(L)} = A_{Pb(g)} \times [\text{КФГ}] + A_{Pb(\pi)} \times S_{ar}$. Використовуючи значення концентрації [КФГ] та площі поліаренів S_{ar} отримаємо наступні рівняння: $3,87 \times A_{Pb(g)} + 2,75 \times A_{Pb(\pi)} = 0,715$ для зразка ВМ(Д)(600) та $0,75 \times A_{Pb(g)} + 8,55 \times A_{Pb(\pi)} = 0,791$ для ВМ(825). Спільне рішення двох рівнянь дає $A_{Pb(g)} = 0,127$ ммоль/г·ммоль КФГ та $A_{Pb(\pi)} = 0,081$ ммоль/г·нм², що дозволяє отримати розрахункові значення ємності $A_{Pb(L)}$ та розрахувати внесок π -сорбції,

який показано лінією 2 на рис. 8. Для високотемпературного зразка ВМ(825) обидва методи дають близькі результати; π -сорбція становить 87–91%. Для зразка ВМ(600) розкид значень суттєво вищий, але вклад π -сорбції малий і не перевищує 30%. У низькотемпературних зразках ВМ площа S_{ar} невелика, а стерична доступність π -систем поліаренів є малою через їхнє агрегування в кристаліти і гірше розвинену пористу структуру.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Вперше досліджено адсорбційну активність по відношенню до $Pb(II)$ вуглецевих матеріалів з довгополуменового вугілля, отриманих лужною активацією за різних температур при невеликому співвідношенні КОН/вугілля (1 г/г). Встановлено, що температура активації є ключовим фактором формування нанопористої структури ВМ та його здатності адсорбувати катіони $Pb(II)$ з водних середовищ при 25°C. Найбільшу питому площу поверхні ($S_{BET} = 1457\text{--}1708$ м²/г) мають ВМ, отримані при 785–825°C. Найбільшу ємність за $Pb(II)$ (0,981 ммоль/г) має ВМ, отриманий при 700°C.

Кінетика адсорбції $Pb(II)$ підпорядковується моделі псевдо-другого порядку; адсорбційна рівновага досягається за ~2 год. Швидкість визначальною стадією є взаємодія катіонів з поверхневими адсорбційними центрами, а не дифузія в пористу систему. Ізотерми адсорбції $Pb(II)$ краще описуються моделлю Ленгмюра,

ніж моделлю Фрейндліха. Застосуванням рівняння Ленгмюра розраховано адсорбційні ємності моношару катіонів $A_{Pb(L)}$, які знаходяться в межах 0,143–0,981 ммоль/г. Встановлено, що на температурній залежності параметру $A_{Pb(L)}$ виділяються три області. В першій ($\leq 350^\circ\text{C}$) значення $A_{Pb(L)}$ не змінюється. Друга область ($350\text{--}700^\circ\text{C}$) характеризується найбільшим приростом величини $A_{Pb(L)}$, а третя область ($700\text{--}825^\circ\text{C}$) показує зниження ємності зі зростанням температури активації. Зіставленням змін вмісту КФГ та розмірів поліаренов з підвищенням температури активації встановлено, що основний внесок у адсорбцію $Pb(II)$ зразками ВМ з довгополуменового вугілля вносять іонообмінні реакції (обмін протонів КФГ на $Pb(II)$) та π -сорбція (взаємодія $Pb(II)$ з π -системою поліаренів вугілля). Показано, що внесок π – сорбції зростає з температурою

активації та є домінуючим (87–91%) у зразків, синтезованих при $800\text{--}825^\circ\text{C}$.

Отримані результати дозволяють прогнозувати досить високу ефективність адсорбентів з довгополуменового вугілля в процесах очищення води від катіонів важких металів. Подальші дослідження орієнтовані на вимірювання адсорбційної активності цих матеріалів по відношенню до інших катіонів, а саме хрому, цинку та міді. Враховуючи розвинену ультрамікропористу структуру отриманих ВМ, перспективним напрямком є застосування отриманих ВМ для уловлювання парофазного йоду та йодистого метилу, що моделює очищення повітря робочих зон АЕС від радіонуклідів.

Подяка. Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку, надану Національною академією наук України (Державний реєстраційний номер теми: 0117U000022).

ЛІТЕРАТУРА:

1. Tiwari D., Bhunia H., Bajpai P.K. Adsorption of CO_2 on KOH activated, N-enriched carbon derived from urea formaldehyde resin: kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Appl. Surf. Sci.*, 2018. Vol. 439. P. 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.203>
2. So S.H., Lee S., Mun J., Rho J., Park C.R. What induces the dense storage of hydrogen of liquid- or solid-like density levels in carbon nanopores with sub-1 nm diameters. *Carbon*, 2023. Vol. 204. P. 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.12.057>
3. Kumar K.V., Preuss K., Titirici M.-M., Rodríguez-Reinoso F. Nanoporous materials for the onboard storage of natural gas. *Chem. Rev.*, 2017. Vol. 117. Is. 3. P. 1796–1825. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00505>
4. Bora M., Bhattacharjya D., Saikia B.K. Coal-derived activated carbon for electrochemical energy storage: status on supercapacitor, Li-Ion battery, and Li-S battery applications. *Energy Fuels*, 2021. Vol. 35. Is. 22. P. 18285–18307. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02518>
5. Ma Z., Han Y., Qi J., Qu Z., Wang X. High iodine adsorption by lignin-based hierarchically porous flower-like carbon nanosheets. *Industrial Crops and Products*, 2021. Vol. 169. Article 113649. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113649>
6. Malini K., Selvakumar D., Kumar N.S. Activated carbon from biomass: Preparation, factors improving basicity and surface properties for enhanced CO_2 capture capacity – A review. *Journal of CO_2 Utilization*. 2023. Vol. 67. Article 102318. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102318>
7. Zhao C., Ge L., Mai L., Li X., Chen S., Li Q., Li S., Yao L., Wang Y., Xu C. Review on coal-based activated carbon: preparation, modification, application, regeneration, and perspectives. *Energy Fuels*, 2023. Vol. 37. Is. 16. P. 11622–11642. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c01866>
8. Mishra R.K., Singh B., Acharya B. A comprehensive review on activated carbon from pyrolysis of lignocellulosic biomass: An application for energy and the environment. *Carbon Resources Conversion*, 2024. Vol. 7. Is. 4. Article 100228. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2024.100228>
9. Kaur B., Gupta R.K., Bhunia H. Chemically activated nanoporous carbon adsorbents from waste plastic for CO_2 capture: Breakthrough adsorption study. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 2019. Vol. 282. P. 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.03.025>
10. Chaudhary P., Bansal S., Sharma B.B., Saini S., Joshi A. Waste biomass-derived activated carbons for various energy storage device applications: A review. *J. Energy Storage*, 2024. Vol. 78. Article 109996. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109996>
11. Yan L., Sorial G.A. Chemical activation of bituminous coal for hampering oligomerization of organic contaminants. *J. Hazard. Mater.*, 2011. Vol. 197. P. 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.093>
12. Li H., Budarin V.L., Clark J.H., North M., Wu X. Rapid and efficient adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by hierarchically porous, activated starbons®: Mechanism and porosity dependence. *J. Hazard. Mater.*, 2022. Vol. 436. Article 129174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129174>

13. Hamyali H., Nosratinia F., Rashidi A., Ardjmand M. Anthracite coal-derived activated carbon as an effectiveness adsorbent for superior gas adsorption and CO₂ / N₂ and CO₂ / CH₄ selectivity: Experimental and DFT study. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2022. Vol. 10. Is.1. Article 107007. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107007>
14. Zhu S., Xu J., Xie J., Zhang Z., Ding Q., Chen K. Ultrafast dyeing wastewater purification by high-performance and reusable lignin-derived activated porous carbon filter. *Separation and Purification Technology*, 2024. Vol. 349. Article 127672. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127672>
15. Yoshizawa N., Maruyama K., Yamada Y., Ishikawa E., Kobayashi M., Toda Y., Shiraishi M. XRD evaluation of KOH activation process and influence of coal rank. *Fuel*, 2002. Vol. 81. Is. 13. P. 1717–1722. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00101-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00101-1)
16. Zhao X.-Y., Huang S.-S., Cao J.-P., Xi S.-C., Wei X.-Y., Kamamoto J., Takarada T. KOH activation of a HyperCoal to develop activated carbons for electric double-layer capacitors. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2014. Vol. 105. P. 116.121. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.010>
17. Кучеренко В.О., Тамаркіна Ю.В., Абакумов О.О. Формування мікропористої структури довгополуменевого вугілля при лужній активації. Вплив температури. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2024. Т. 15. № 2. С. 241–254. <https://doi.org/10.15407/hftp15.02.241>
18. Zhang X., Chen W. Mechanisms of pore formation on multi-wall carbon nanotubes by KOH activation. *Micropor. Mesopor. Mater.* 2015. Vol. 206. P. 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.12.002>
19. Тамаркіна Ю.В., Аніщенко В.М., Редько А.М., Кучеренко В.О. Адсорбційні властивості викопного вугілля, активованого гідроксидом калію. Вплив ступеня метаморфізму. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2020. Т. 11. № 2. С. 175–189. <https://doi.org/10.15407/hftp11.02.175>
20. Тамаркіна Ю.В., Аніщенко В.М., Редько А.М., Кучеренко В.О. Активоване лугом викопне вугілля. Мікропориста структура та здатність адсорбувати фенольні сполуки. *Хімія, фізика та технологія поверхні*. 2022. Т. 13. № 1. С. 111–124. <https://doi.org/10.15407/hftp13.01.111>
21. Редько А.В., Тамаркіна Ю.В., Кучеренко В.О. Нанопористі матеріали з довгополуменевого вугілля для очищення води від барвника метиленового блакитного. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 8, С. 155–167. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.1>
22. Кучеренко В.О., Тамаркіна Ю.В., Редько А.В., Сабєрова В.О. Адсорбенти 4-хлорфенолу з довгополуменевого вугілля, активованого гідроксидом калію. *Питання хімії та хімічної технології*. 2024. № 2, С. 47–54. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-153-2-47-54>
23. Biswal B.K., Balasubramanian R. Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater: A review. *J. Environ. Chem. Eng.* 2023. Vol. 11. Is. 5. Article 110986. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110986>
24. Ghorbani M., Seyedin O., Aghamohammadhassan M. Adsorptive removal of lead (II) ion from water and wastewater media using carbon-based nanomaterials as unique sorbents: A review. *J. Environ. Manage.* 2020. Vol. 254. Article 109814. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109814>
25. Momčilović M., Purenović M., Bojić A., Zarubica A., Randelović M. (). Removal of lead(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto pine cone activated carbon. *Desalination*. 2011. Vol. 276. Is. 1–3. P. 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.013>
26. Li M., Zeng F., Chang H., Xu B., Wang W. Aggregate structure evolution of low-rank coals during pyrolysis by in-situ X-ray diffraction. *Int. J. Coal Geol.* 2013. Vol. 116–117. P. 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.07.008>
27. Li H., Hou Y., He Z., Wei J., Ren S., Wu W. Structural evolution characteristics of lignite during pyrolysis based on alkaline-oxygen oxidation, NMR and FTIR. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2023. Vol. 172. Article 105980. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105980>
28. Jagiello J., Kyotani T., Nishihara H. Development of a simple NLDFT model for the analysis of adsorption isotherms on zeolite templated carbon (ZTC). *Carbon*. 2020. Vol. 169. P. 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.06.032>
29. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases. with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.* 2015. Vol. 87. Is. 9–10. P. 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
30. Редько А.В., Тамаркіна Ю.В., Редько А.М., Фролова І.Б., Кучеренко В.О. Спрямованість змін пористої структури і адсорбційної здатності при топохімічному окисненні активованого лугом викопного вугілля. *Питання хімії та хімічної технології*. 2023. № 2. С. 127–136. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-147-2-127-136>
31. Revellame E.D., Fortela D.L., Sharp W., Zappi M.E. Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Eng. Technol.* 2020. Vol. 1. Article 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>
32. Al-Ghouti M.A., Da'ana D.A. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *J. Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. Article 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>

33. Asuquo E., Martin A., Nzerem P., Siperstein F., Fan X. Adsorption of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions using mesoporous activated carbon adsorbent: Equilibrium, kinetics and characterisation studies. *J. Environ. Chem. Eng.*, 2017. Vol. 5. Is. 1. P. 679–698. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.043>
34. Qiu B., Tao X., Wang H., Li W., Ding X., Chu H. Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2021. Vol. 155. Article 105081. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105081>
35. Jiang J., Li R., Yang K., Li Y., Deng L., Che D. Investigation on Pb²⁺ adsorption characteristics by AAEMs-rich biochar in aqueous solution: Performance and mechanism. *Environmental Research*. 2023. Vol. 236. Part 1. Article 116731. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116731>
36. Liu Y., Chen Y., Li Y., Chen L., Jiang H., Jiang L., Yan H., Zhao M., Hou S., Zhao C., Chen Y. Elaborating the mechanism of lead adsorption by biochar: Considering the impacts of water-washing and freeze-drying in preparing biochar. *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 386. Article 129447. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129447>
37. Mahadevi A.S., Sastry G.N. Cation- π Interaction: Its Role and Relevance in Chemistry, Biology, and Material Science. *Chem. Rev.* 2013. Vol. 113. Is. 3. P. 2100–2138. <https://doi.org/10.1021/cr300222d>
38. Guo B.C., Purnell J.W., Castleman Jr. A.W. **The clustering reactions of benzene with sodium and lead ions.** *Chem. Phys. Letters*. 1990, Vol. 168. Is. 2. P. 155–160. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(90\)85122-S](https://doi.org/10.1016/0009-2614(90)85122-S)

REFERENCES:

1. Tiwari, D., Bhunia, H., & Bajpai, P.K. (2018). Adsorption of CO₂ on KOH activated, N-enriched carbon derived from urea formaldehyde resin: kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Appl. Surf. Sci.*, 439, 760–771. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.203>
2. So, S.H., Lee, S., Mun, J., Rho, J., & Park, C.R. (2023). What induces the dense storage of hydrogen of liquid- or solid-like density levels in carbon nanopores with sub-1 nm diameters. *Carbon*, 204, 594–600. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.12.057>
3. Kumar, K.V., Preuss, K., Titirici, M.-M., & Rodríguez-Reinoso, F. (2017). Nanoporous materials for the onboard storage of natural gas. *Chem. Rev.*, 117(3), 1796–1825. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00505>
4. Bora, M., Bhattacharjya, D., & Saikia, B.K. (2021). Coal-derived activated carbon for electrochemical energy storage: status on supercapacitor, Li-Ion battery, and Li-S battery applications. *Energy Fuels*, 35(22), 18285–18307. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c02518>
5. Ma, Z., Han, Y., Qi, J., Qu, Z., & Wang, X. (2021). High iodine adsorption by lignin-based hierarchically porous flower-like carbon nanosheets. *Industrial Crops and Products*, 169, 113649. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113649>
6. Malini, K., Selvakumar, D., & Kumar, N.S. (2023). Activated carbon from biomass: Preparation, factors improving basicity and surface properties for enhanced CO₂ capture capacity – A review. *Journal of CO₂ Utilization*, 67, 102318. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102318>
7. Zhao, C., Ge, L., Mai, L., Li, X., Chen, S., Li, Q., Li, S., Yao, L., Wang, Y., & Xu, C. (2023). Review on coal-based activated carbon: preparation, modification, application, regeneration, and perspectives. *Energy Fuels*, 37(16), 11622–11642. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c01866>
8. Mishra, R.K., Singh, B., & Acharya, B. (2024). A comprehensive review on activated carbon from pyrolysis of lignocellulosic biomass: An application for energy and the environment. *Carbon Resources Conversion*, 7(4), 100228. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2024.100228>
9. Kaur, B., Gupta, R.K., & Bhunia, H. (2019). Chemically activated nanoporous carbon adsorbents from waste plastic for CO₂ capture: Breakthrough adsorption study. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 282, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.03.025>
10. Chaudhary, P., Bansal, S., Sharma, B.B., Saini, S., & Joshi, A. (2024). Waste biomass-derived activated carbons for various energy storage device applications: A review. *J. Energy Storage*, 78, 109996. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109996>
11. Yan, L., & Sorial, G.A. (2011). Chemical activation of bituminous coal for hampering oligomerization of organic contaminants. *J. Hazard. Mater.*, 197, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.093>
12. Li, H., Budarin, V.L., Clark, J.H., North, M., & Wu, X. (2022). Rapid and efficient adsorption of methylene blue dye from aqueous solution by hierarchically porous, activated starbons®: Mechanism and porosity dependence. *J. Hazard. Mater.*, 436, 129174. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129174>
13. Hamyali, H., Nosratinia, F., Rashidi, A., & Ardjmand, M. (2022). Anthracite coal-derived activated carbon as an effectiveness adsorbent for superior gas adsorption and CO₂ / N₂ and CO₂ / CH₄ selectivity: Experimental and DFT study. *J. Environ. Chem. Eng.*, 10(1), 107007. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107007>
14. Zhu, S., Xu, J., Xie, J., Zhang, Z., Ding, Q., & Chen, K. (2024). Ultrafast dyeing wastewater purification by high-performance and reusable lignin-derived activated porous carbon filter. *Separation and Purification Technology*, 349, 127672. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127672>

15. Yoshizawa, N., Maruyama, K., Yamada, Y., Ishikawa, E., Kobayashi, M., Toda, Y., & Shiraishi, M. (2002). XRD evaluation of KOH activation process and influence of coal rank. *Fuel*, 81(13), 1717–1722. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(02\)00101-1](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(02)00101-1)
16. Zhao, X.-Y., Huang, S.-S., Cao, J.-P., Xi, S.-C., Wei, X.-Y., Kamamoto, J., & Takarada, T. (2014). KOH activation of a HyperCoal to develop activated carbons for electric double-layer capacitors. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 105, 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.010>
17. Kucherenko, V.A. Tamarkina, Ju.V., & Abakumov, O.O. (2024). Formuvannia mikroporystoi struktury dovhopolumenevoho vuhillia pry luzhnii aktyvatsii. Vplyv temperatury [Formation of long-flame coal microporous structure under alkali activation. Influence of temperature]. *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni – Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 15(2), 241–254. <https://doi.org/10.15407/hftp15.02.241>
18. Zhang, X., & Chen, W. (2015) Mechanisms of pore formation on multi-wall carbon nanotubes by KOH activation. *Micropor. Mesopor. Mater.*, 206, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.12.002>
19. Tamarkina, Ju.V., Anishchenko, V.M., Red'ko, A.M., & Kucherenko, V.O. (2020). Adsorbtsiini vlastyvoli vykopnogo vuhillia, aktyvovanoho hidroksydom kaliu. Vplyv stupenia metamorfizmu [Adsorption properties of coals activated with potassium hydroxide. Influence of coal rank]. *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni – Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 11(2), 175–189. <https://doi.org/10.15407/hftp11.02.175>
20. Tamarkina, Ju.V., Anishchenko, V.M., Red'ko, A.M., & Kucherenko, V.O. (2022). Aktyvovane luhom vykopne vuhillia. Mikroporysta struktura ta zdattist adsorbuvaty fenolni spoluky [Alkali activated coals. Microporous structure and capability to adsorb phenol compounds]. *Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni – Chemistry, Physics and Technology of Surface*, 13(1) 111–124. <https://doi.org/10.15407/hftp13.01.111>
21. Redko, A.V., Tamarkina, Ju.V., & Kucherenko, V.O. (2024). Nanoporysti materialy z dovhopolumenevoho vuhillia dlia ochyshchennia vody vid barvnyka metylenovoho blakytynoho [Nanoporous materials from long-flame coal for purifying water from methylene blue dye]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychkh nauk – Ukrainian Journal of Natural Sciences*, 8, 155–167. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.17>
22. Kucherenko, V.O. Tamarkina, Ju.V., Redko, A.V., & Sabierova, V.O. (2024). Adsorbenty 4-khlorfenolu z dovhopolumenevoho vuhillia, aktyvovanoho hidroksydom kaliu [Adsorbents of 4-chlorophenol from long-flame coal activated by potassium hydroxide]. *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 2, 47–54. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-153-2-47-54>
23. Biswal, B.K., & Balasubramanian, R. (2023). Use of biochar as a low-cost adsorbent for removal of heavy metals from water and wastewater: A review. *J. Environ. Chem. Eng.*, 11(5), 110986. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110986>
24. Ghorbani, M., Seyedin, O., & Aghamohammadhassan, M. (2020). Adsorptive removal of lead (II) ion from water and wastewater media using carbon-based nanomaterials as unique sorbents: A review. *J. Environ. Manage.*, 254, 109814. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109814>
25. Momčilović, M., Purenović, M., Bojić, A., Zarubica, A., & Randelović, M. (2011). Removal of lead(II) ions from aqueous solutions by adsorption onto pine cone activated carbon. *Desalination*, 276(1–3), 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.013>
26. Li, M., Zeng, F., Chang, H., Xu, B., & Wang, W. (2013). Aggregate structure evolution of low-rank coals during pyrolysis by in-situ X-ray diffraction. *Int. J. Coal Geol.*, 116–117, 262–269. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2013.07.008>
27. Li, H., Hou, Y., He, Z., Wei, J., Ren, S., & Wu, W. (2023). Structural evolution characteristics of lignite during pyrolysis based on alkaline-oxygen oxidation, NMR and FTIR. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 172, 105980. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105980>
28. Jagiello, J. & Olivier, J.P. (2013). 2D-NLDFT adsorption models for carbon slit-shaped pores with surface energetical heterogeneity and geometrical corrugation / *Carbon*, 55, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2012.12.011>
29. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F., Rouquerol, J., & Sing, K.S.W. (2015). Physisorption of gases. with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure Appl. Chem.*, 87(9–10), 1051–1069. <https://doi.org/10.1515/pac-2014-1117>
30. Redko, A.V., Tamarkina, Ju.V., Redko, A.M., Frolova I.B., & Kucherenko, V.O. (2023). Spriamovanist zmin porystoi struktury i adsorbtsiinoi zdattosti pry topokhimichnomu okysneni aktyvovanoho luhom vykopnogo vuhillia [Direction of changes in porous structure and adsorption capacity during topochemical oxidation of coal activated by alkali]. *Pytannia khimii ta khimichnoi tekhnologii – Issues of Chemistry and Chemical Technology*, 2, 127–136. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2023-147-2-127-136>
31. Revellame, E.D., Fortela, D.L., Sharp, W., & Zappi, M.E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Eng. Technol.*, 1, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100032>
32. Al-Ghouti, M.A., & Da'ana, D.A. (2020). Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. *J. Hazardous Materials*, 393, 122383. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>

33. Asuquo, E., Martin, A., Nzerem, P., Siperstein, F., & Fan, X. (2017). Adsorption of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions using mesoporous activated carbon adsorbent: Equilibrium, kinetics and characterisation studies. *J. Environ. Chem. Eng.*, 5(1), 679–698. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.043>
34. Qiu, B., Tao, X., Wang, H., Li, W., Ding, X., & Chu, H. (2021). Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 155, 105081. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105081>
35. Jiang, J., Li, R., Yang, K., Li, Y., Deng, L., & Che, D. (2023). Investigation on Pb²⁺ adsorption characteristics by AAEMs-rich biochar in aqueous solution: Performance and mechanism. *Environmental Research*, 236(1), 116731. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116731>
36. Liu, Y., Chen, Y., Li, Y., Chen, L., Jiang, H., Jiang, L., Yan, H., Zhao, M., Hou, S., Zhao, C., & Chen, Y. (2023). Elaborating the mechanism of lead adsorption by biochar: Considering the impacts of water-washing and freeze-drying in preparing biochar. *Bioresource Technology*, 386, 129447. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129447>
37. Mahadevi, A.S., & Sastry, G.N. (2013). Cation– π Interaction: Its Role and Relevance in Chemistry, Biology, and Material Science. *Chem. Rev.*, 113(3), 2100–2138. <https://doi.org/10.1021/cr300222d>
38. Guo, B.C., Purnell, J.W., & Castleman Jr., A.W. (1990). The clustering reactions of benzene with sodium and lead ions. *Chem. Phys. Letters.*, 168(2), 155–160. [https://doi.org/10.1016/0009-2614\(90\)85122-S](https://doi.org/10.1016/0009-2614(90)85122-S)

Стаття надійшла: 11.07.2025

Прийнято: 11.08.2025

Опубліковано:

УДК 502.51(282):556"366"(477.41)

DOI

Марина ЛАДИКА

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології агросфери та екологічного контролю, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041

ORCID: 0000-0002-5164-7117**У Жофань**

аспірант кафедри екології агросфери та екологічного контролю, Національний університет біоресурсів і природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, Україна, 03041

ORCID: 0000-0001-8897-4608

Бібліографічний опис статті: Ладика, М., У Жофань. (2025). Якість води в р. Ірпінь в постмілітарний період. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 69–80, doi:

ЯКІСТЬ ВОДИ В Р. ІРПІНЬ В ПОСТМІЛІТАРНИЙ ПЕРІОД

Воєнні дії спричиняють значні зміни у функціонуванні водних екосистем, що проявляються як прямими, так і опосередкованими наслідками для екологічної, соціальної та економічної сфер. Оцінка сучасного стану водних ресурсів у районах, де тривали бойові дії, є необхідною для вивчення масштабів і специфіки їх забруднення та прогнозування довгострокових наслідків.

Метою нашого дослідження було проаналізувати зміни якості води р. Ірпінь в постмілітарний період. Здійснено порівняльну характеристику відібраних у 2024 р. проб води з середньорічними даними державного моніторингу якості поверхневих вод р. Ірпінь (гідрохімічний пост у с. Гостомель) за період 2020–2023 рр. Пункти спостережень обрано в межах Київської області (м. Ірпінь, с. Демидів, с. Козаровичі) з урахуванням просторової різниці впливу воєнних дій та інтенсивності антропогенного навантаження на екосистему річки.

На основі порівняльного аналізу значень екологічних індексів (I_E) якості вод р. Ірпінь довоєнного та постмілітарного періодів встановлено погіршення її якості. Зокрема, за даними пункту державного моніторингу поверхневих вод на р. Ірпінь (с. Гостомель), у довоєнний період (2020–2021 рр.) за найгіршими значеннями ($I_E = 3,98$) вона відносилася до III класу, 4 категорії якості («задовільні», «слабко забруднені» води), а у постмілітарний період (2022–2023 рр.) ($I_E = 4,83$) – до III класу, 5 категорії якості («посередні», «помірно забруднені» з тенденцією до «задовільних», «слабко забруднених»).

Зниження якості води передусім відобразилося у зростанні рівня органічного забруднення та погіршенні трофо-сапробіологічних характеристик. Основними джерелами надходження органічних речовин (переважно сполук азоту і фосфору) є неочищені комунально-побутові стоки (м. Ірпінь, с. Гостомель), а також зливи із сільськогосподарських угідь та приватних домогосподарств (с. Демидів, с. Козаровичі). Це в поєднанні з літнім підвищенням температури води призводить до дефіциту розчиненого кисню ($\leq 4 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$) та порушення природного екологічного балансу в річці.

На затоплених ділянках долини сформувалися лімніофільні (озерні) умови з уповільненим водообміном, що спричиняє погіршення кисневого режиму та сприяє накопиченню органічних сполук у воді. Ступінь антропогенного навантаження на прилеглі території визначає динаміку процесів самоочищення та швидкість відновлення гідроекосистеми.

Ключові слова: якість води, воєнні дії, забруднення, екологічний індекс, органічні речовини, важкі метали, р. Ірпінь.

Maryna LADYKA

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Agrosphere Ecology and Environmental Control, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony str., Kyiv, Ukraine, 03041

ORCID: 0000-0002-5164-7117

Wu RUOFAN

Postgraduate Student at the Department of Agrosphere Ecology and Environmental Control, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15 Heroiv Oborony str., Kyiv, Ukraine, 03041

ORCID: 0000-0001-8897-4608

To cite this article: Ladyka, M., Wu Ruofan (2025). Yakist vody v r. Irpin v postmilitarnyy period [Water quality in the Irpin river in the post-military period]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 69–80, doi:

WATER QUALITY IN THE IRPIN RIVER IN THE POST-MILITARY PERIOD

Military operations lead to significant changes in the functioning of aquatic ecosystems. Both direct and indirect consequences are manifest in the ecological, social, and economic spheres. Assessment of the current state of water resources in areas where hostilities have continued is necessary to study the scale and specifics of their pollution and predict long-term consequences.

The goal of our study was to analyse changes in the water quality of the Irpin River in the post-military period. A comparative characteristic of water samples taken in 2024 with the average annual data of state monitoring of the quality of surface waters of the Irpin River (hydrochemical station in the village of Gostomel) for the period 2020–2023 was carried out. The observation points were chosen within the Kyiv region (Irpin, Demydiv village, Kozarovychi village), taking into account the spatial difference in the impact of military actions and the intensity of anthropogenic load on the river ecosystem.

On the basis of a comparative analysis of the values of ecological indices (IE) of the water quality of the Irpin River in the pre-war and post-war periods, deterioration of its quality was established. In particular, in the pre-war period (2020–2021) according to the worst values (EI = 3.98) it belonged to class III, quality category 4 (“satisfactory”, “slightly polluted” waters), and in the post-war period (2022–2023) (EI = 4.83) – to class III, quality category 5 (“mediocre”, “moderately polluted” with a tendency to “satisfactory”, “slightly polluted”) in accordance with the data of the state monitoring point of surface waters on the Irpin River (Gostomel village).

The decline in water quality was primarily reflected in the increase in the level of organic pollution and the deterioration of trophic and saprobiological characteristics. The main sources of organic matter (mainly nitrogen and phosphorus compounds) are untreated municipal wastewater (Irpin city, Gostomel village), as well as runoff from agricultural lands and private households (Demydiv village, Kozarovychi village). This, in combination with the summer increase in water temperature, leads to a deficit of dissolved oxygen ($\leq 4 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$) and a violation of the natural ecological balance in the river.

The limniophilous (lake) conditions with slowed water exchange have formed in the flooded areas of the valley. This causes a deterioration in the oxygen regime and contributes to the accumulation of organic compounds in the water. The degree of anthropogenic load on the surrounding areas determines the dynamics of self-purification processes and the speed of recovery of the hydroecosystem.

Key words: water quality, hostilities, pollution, ecological index, organic substances, heavy metals, Irpin River.

Актуальність проблеми. Воєнні дії в цілому завдають потужного негативного впливу на довкілля України, спричиняючи фізичну деградацію і забруднення ґрунтового покриття, атмосферного повітря, водних об’єктів та втрати біорізноманіття. Вода в умовах війни виступає одночасно і «зброєю», і «жертвою».

З початку повномасштабного вторгнення зафіксовано руйнування ключових гідротехнічних споруд: дамб Оскільського та Карачунівського водосховищ (2022 р.), греблі Каховського (2023 р.) та Курахівського (2024 р.)

водосховищ, а також пошкодження Козаровицької дамби (2022 р.), що відокремлювала долину р. Ірпін від Київського водосховища.

Наслідками руйнування гідротехнічної інфраструктури (дамб, гребель, насосних станцій, очисних споруд, гідроелектростанцій тощо) стали неконтрольоване затоплення населених пунктів і сільськогосподарських угідь, зміна гідрологічного режиму, загибель риби й інших гідробіонтів, погіршення якості питної води на прилеглих територіях та дефіцит доступної води в цілому. Додатково у водні об’єкти потрапили

паливно-мастильні матеріали, неочищені стічні води, токсичні сполуки та вибухові речовини, що призвело до забруднення води та деградації водних екосистем.

Наслідки цих процесів проявляються як безпосередньо, так і опосередковано, зачіпаючи екологічну, соціальну та економічну сфери. У зв'язку з цим оцінка сучасного стану водних екосистем у районах, де відбувалися бойові дії, є необхідною. Вона дозволить визначити масштаби і специфіку забруднення, спрогнозувати комплексні наслідки як для локальних територій, так і для цілих регіонів, а також розробити ефективні заходи з відновлення водних ресурсів та пов'язаних екосистем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В сучасній науковій літературі з'явилася значна кількість публікацій, присвячених впливу воєнних дій на навколишнє середовище України. Зокрема, аналіз наукометричної бази Scopus за основними ключовими словами, які стосуються впливу воєнної діяльності на гідро-екосистеми дав можливість виокремити такі основні чотири тематичні групи (Кірейцева & Циганенко-Дзюбенко, 2025): фізико-хімічні аспекти забруднення води, специфічні хімічні забруднювачі, екологічний моніторинг та реакції гідробіотів на військові стресори.

Проте, дане групування не враховує прямі та непрямі впливи на водні об'єкти, ризики й наслідки війни для водної безпеки, післявоєнні перспективи водного сектору, можливі стратегії відновлення й реабілітації пошкоджених водних екосистем із урахуванням світового досвіду. Ці питання розкрито у працях Yutilova & Adamski (2025), Строкаль та ін. (2023) Napich, Novitskyi et al. (2024).

Як зазначають, Кірейцева & Циганенко-Дзюбенко (2025) ефективна реабілітація водного середовища потребує стратегічних підходів, диференційованих за типом хімічного забруднення. Відтак, моніторинг якісного стану поверхневих вод у воєнний час набуває особливого значення (Stelmakh et al., 2023).

Питання наслідків впливу воєнної агресії на водні ресурси є досить гострим для українського суспільства. Ми одночасно стикаємося із рядом проблем, пов'язаних із екологічною та водною безпекою внаслідок руйнування гідротехнічної інфраструктури (Ladyka & Starodubtsev, 2022; Строкаль та ін., 2023; Gleick, Vyshnevskyi &

Shevchuk, 2023; Napich, Novitskyi et al. (2024).). В одному випадку відбулося руйнування гребель і опустошення водосховищ (наприклад, Оскільського (Харківська обл.), Курахівського (Донецька обл.), Каховського (Запорізька, Дніпропетровська та Херсонська області), які були джерелом водопостачання для багатьох галузей економіки України: комунального, сільського господарства, промисловості. В іншому ж – це призвело до затоплення значних територій з екологічними, економічними та соціальними наслідками.

Руйнування Козаровицької дамби, яка захищає долину р. Ірпінь від Київського водосховища, рівень якого вище на 5 м від відміток висот самої заплави, викликало затоплення понад 2500 тис. га. Цей крок був стратегічним рішенням українських військових для створення природної перешкоди довжиною близько 20 км для оборони міста Києва (Стародубцев, Ладика та ін., 2022).

За даними супутникової зйомки площа затоплення навесні 2022 року склала 2549 га, з яких 94% – це сільськогосподарські землі. Найсильніше постраждало селище Демидів. У той час воно перетворилось майже в острів, а городи, двори, підвали будівель, колодязі, господарські споруди були або затоплені, або сильно підтоплені. Нині ця площа зменшилася майже у 2 рази (Vlasova, Shevchenko et al., 2023).

Екологічні наслідки воєнних дій для довкілля і людей пов'язані, переважно, із погіршенням якості води внаслідок її забруднення (Строкаль та ін., 2023; Ladyka, Wu Ruofan, 2024; Хільчевський, Гребінь, 2022; Благополучна та ін., 2022). Як було вказано раніше, в ірпінській долині була затоплена велика площа меліорованих ґрунтів, з яких потрапляли у воду агрохімікати, розчинна частина гумусу, продукти гниття рослинної маси із цих земель, тощо. Окрім того, відбувалося й забруднення води відходами життєдіяльності населення внаслідок підтоплення приватних домогосподарств, де розташовані вуличні сільські туалети, вигрібні ями з господарськими відходами, місця утримання худоби, свиней, птахів, що підтверджується даними мікробіологічного аналізу (Ladyka, Wu Ruofan, 2024). Ще більш небезпечним було наявність в цій зоні поховань й скотомогильників.

Іншим фактором зниження якості водних ресурсів стало потрапляння розбитої

і покинутої військової техніки агресора з паливом, технічними мастилами, боєприпасами і навіть тілами загиблих, уламками снарядів. Циганенко-Дзюбенко, Гандзюра та ін. (2023) дослідили, що у штучних водних екосистемах с. Мощун (Київська обл.), де відбувалися активні бойові дії, у перше півріччя відмічено значні перевищення нормативних показників для поверхневих вод рибогосподарського та рекреаційного призначення таких важких металів як: Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Al^{3+} . Донні відклади річки також містять їх значні концентрації, що підтверджує їх активну участь у біологічному кругообігу.

У дослідженні Берії В. Д. та Гандзюри В. П. (2024) за допомогою методу біоіндикації було проаналізовано вплив воєнних дій на функціональний стан екосистеми річки Ірпінь та її приток. Згідно з результатами вивчення літорального зоопланктону (кладоцер, копепод, коловерток), навесні 2024 року екосистема р. Ірпінь класифікувалася як забруднена, а влітку – як помірно забруднена.

Таким чином, аналіз якості води й накопичення токсичних речовин в гідроекосистемі р. Ірпінь мають важливе значення в контексті екологічної безпеки досліджуваної території та розробки ефективних шляхів їх відновлення.

Мета дослідження – проаналізувати зміни якості води р. Ірпінь в постмілітарний період.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вибір пунктів відбору проб води здійснено з урахуванням різного ступеня віддаленого впливу воєнних дій та супутнього антропогенного навантаження на екосистему річки Ірпінь в межах Київської області. Для порівняння та оцінки зміни якості води використано середньорічні дані державного моніторингу якості поверхневих вод р. Ірпінь (гідрохімічний пост у с. Гостомель, 28 км, вплив р. Буча) за період 2020–2023 рр. Інформацію отримано із фонду інформаційно-довідкової та нормативної літератури Галузевого державного архіву матеріалів гідрометеорологічних спостережень Державної служби з надзвичайних ситуацій України Центральної геофізичної обсерваторії ім. Бориса Срезневського (Державний водний кадастр, 2020–2023).

На рис. 1 наведено пункти відбору проб поверхневих вод, призначених для подальшого аналізу змін якості води в річці. Зокрема, пункт

№ 1 – державний пункт моніторингу якості води на р. Ірпінь (с. Гостомель), що розташований приблизно за 6 км нижче за течією від нашого пункту відбору №2. Дослідження залишкових наслідків воєнних дій та опосередкованого впливу міста Ірпінь проводили у пункті № 2 – набережна м. Ірпінь, поблизу залізничного мосту. Якість води у затопленій частині заплави вивчали в пунктах № 3 (околиці с. Демидів, Вишгородський р-н), де прогнозувався інтенсивний вплив унаслідок вилугування речовин із затоплених територій, та у пункті № 4 (поблизу Козаровицької дамби, с. Козаровичі, Вишгородський р-н), де окрім вилугування речовин, додатково фіксувався вплив відкачуваних вод з підтоплених домогосподарств.

Проби води було відібрано нами влітку 2024 р. у трикратній повторності згідно з вимогами ДСТУ ISO 5667-14:2005: Якість води. Відбирання проб (2006). Їх подальші лабораторно-аналітичні дослідження виконано у сертифікованій лабораторії ТОВ «Укрхіманаліз» (сертифікати аналізу № 12793/1, 12793/2 та 12793/3 від 05 липня 2024 р.).

Відповідно до програми і методики досліджень було сформовано базу даних показників сольового складу, еколого-санітарних трофо-сапробіологічних (гідрофізичних і гідрохімічних), а також специфічних речовин токсичної дії у воді річки Ірпінь у довоєнний (2020–2021 рр.) та постмілітарний періоди (2022–2023 та 2024 роки) (табл. 1). На наступному етапі проведено екологічну оцінку якості поверхневих вод р. Ірпінь з визначенням екологічного індексу (I_E) за відповідними категоріями згідно з чинною методикою (Методика, 1998).

Для забезпечення об'єктивності результатів здійснено узагальнену комплексну оцінку екологічного стану річкових вод. Такий підхід дозволив виокремити провідні фактори антропогенного забруднення. Для аналізу використано середні значення показників за 2020–2024 рр., які характеризують відносно стабільний, урівноважений стан водних об'єктів, а також найгірші зафіксовані значення за 2020–2023 рр., що відображають максимальні відхилення від норми внаслідок природних процесів і антропогенного навантаження.

Блок показників сольового складу (I_1) охоплює вміст хлоридів, сульфатів та загальну мінералізацію, які застосовуються для оцінювання та ідентифікації рівня забруднення компонентами сольового складу. Аналіз якості води р. Ірпінь за показником загальної мінералізації (суми йонів) дозволив віднести їх до прісних олігогалинних вод з діапазоном середніх значень від 506 мг/дм³ (2020-2021 рр., с. Гостомель) до 656 мг/дм³ (2024 р., м. Ірпінь). Усі досліджені проби відповідали 2 категорії якості води.

Порівняння значень суми йонів за 2022–2023 рр. (мілітарний та постмілітарний періоди) із попередніми роками засвідчує

зростання їх середніх значень у пункті відбору поблизу селища Гостомель – з 506 до 558 мг/дм³. Таке підвищення, ймовірно, обумовлено тривалим антропогенним навантаженням, у тому числі воєнного характеру, що підтверджується фіксацією найвищих значень – 588 та 634 мг/дм³.

Вміст середніх значень хлорид-іонів коливався в діапазоні 47,80-56,32 мг/дм³, що відповідає 3 категорії якості води. У період 2022–2023 рр. зафіксовано найгірші значення цього показника – 78,2 мг/дм³, що відноситься до 4 категорії якості.

Кількість сульфат-іонів варіювала від 22,0 (1 категорія) до 62,0 мг/дм³ (2 категорія якості).

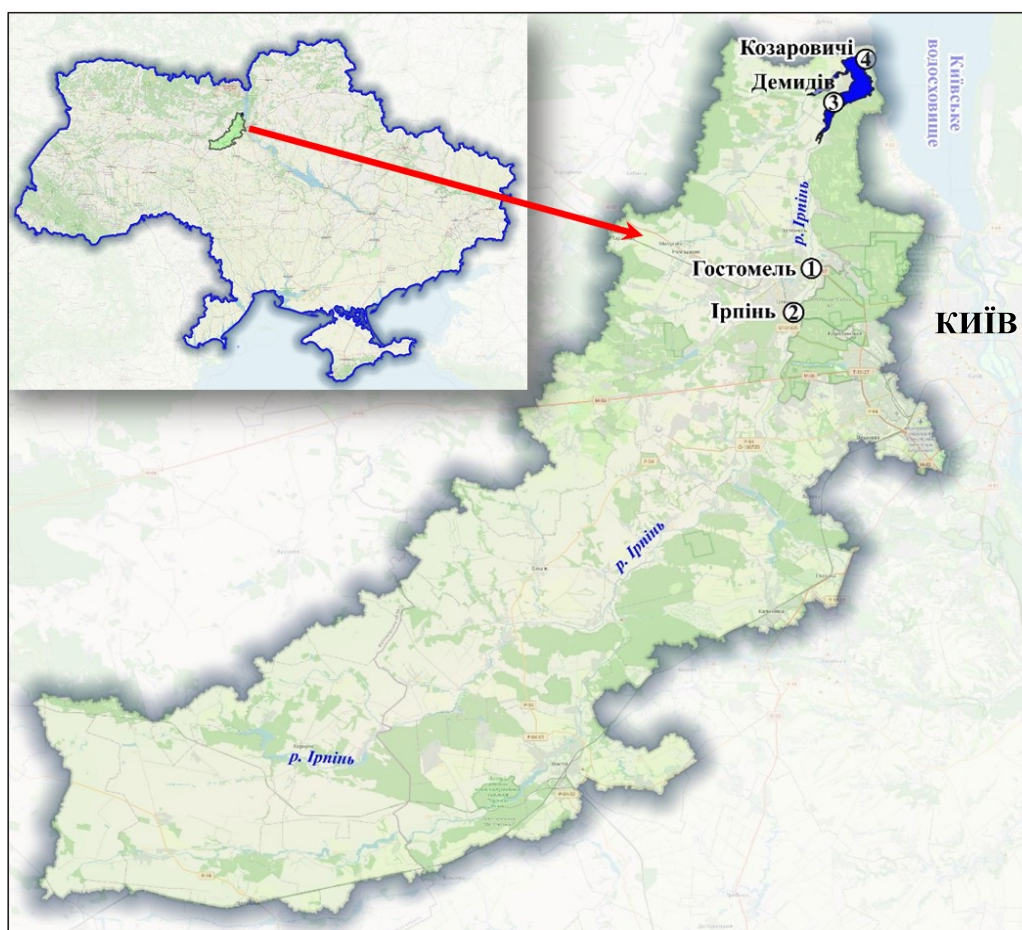


Рис. 1. Розташування басейну р. Ірпінь на карті України та пункти відбору проб поверхневих вод (1 – пункт державного моніторингу якості води на р. Ірпінь, с. Гостомель; 2 – набережна м. Ірпінь поблизу ж/д мосту; № 3 – затоплена територія заплави в околицях с. Демидів; № 4 – затоплена територія заплави поблизу Козаровицької дамби, с. Козаровичі)

Таблиця 1

Показники якості поверхневих вод р. Ірпінь у довоєнний та постмілітарний періоди

Показники якості води та одиниці їх вимірювання	Період та пункти спостережень				
	2020–2021 рр.	2022–2023 рр.	2024 р. (літо)		
	селище Гостомель (28 км, вплив р. Буча)	набережна м. Ірпінь, (вище за течією, біля ж/д мосту)	осколиці с. Демидів, (затоплена заплава)	с. Козаровичі, (затоплена заплава, біля дамби)	
Прозорість по шрифту, см	$\frac{18,39 \pm 1,37^*}{8,00^{**}}$	$\frac{16,91 \pm 1,48^*}{6,00^{**}}$	$15,00 \pm 1,22^*$	$15,00 \pm 1,31^*$	$15,00 \pm 1,19^*$
Завислі речовини, мг/дм ³	$\frac{5,19 \pm 0,80}{8,00}$	дані відсутні	$38,00 \pm 0,30$	$19,00 \pm 1,10$	$6,00 \pm 0,52$
pH, од.	$\frac{7,67 \pm 0,07}{8,14}$	$\frac{7,54 \pm 0,06}{8,25}$	$7,63 \pm 0,03$	$8,01 \pm 0,02$	$8,42 \pm 0,01$
Кисень, мгО ₂ /дм ³	$\frac{10,20 \pm 0,80}{3,52}$	$\frac{8,75 \pm 0,76}{2,72}$	$2,68 \pm 0,21$	$2,84 \pm 0,18$	$3,22 \pm 0,25$
Сума йонів, мг/дм ³	$\frac{506,0 \pm 8,0}{588,0}$	$\frac{558,0 \pm 11,0}{634,0}$	$656,0 \pm 15,0$	$543,0 \pm 10$	$557,0 \pm 13,0$
Жорсткість, мг-екв/дм ³	$\frac{5,65 \pm 0,11}{6,76}$	$\frac{5,99 \pm 0,14}{7,32}$	$4,05 \pm 0,10$	$3,35 \pm 0,13$	$3,35 \pm 0,13$
Гідрокарбонати, мг/дм ³	$\frac{297,2 \pm 6,9}{379,0}$	$\frac{292,6 \pm 5,6}{351,0}$	$366,1 \pm 8,1$	$317,3 \pm 9,1$	$355,6 \pm 7,1$
Хлориди, мг/дм ³	$\frac{47,80 \pm 1,82}{64,50}$	$\frac{56,32 \pm 2,00}{78,20}$	$51,83 \pm 1,53$	$53,25 \pm 2,04$	$54,67 \pm 1,93$
Сульфати, мг/дм ³	$\frac{26,37 \pm 3,25}{52,3}$	$\frac{58,50 \pm 6,0}{150}$	$62,00 \pm 5,93$	$32,00 \pm 3,24$	$22,00 \pm 2,85$
Калій, мг/дм ³	$\frac{5,34 \pm 0,27}{7,00}$	$\frac{6,86 \pm 0,40}{13,00}$	$5,90 \pm 0,35$	$5,50 \pm 0,21$	$5,70 \pm 0,26$
Кальцій, мг/дм ³	$\frac{81,39 \pm 1,73}{94,6}$	$\frac{88,34 \pm 2,37}{115,4}$	$114,0 \pm 5,14$	$82,00 \pm 3,45$	$88,00 \pm 2,81$
Натрій, мг/дм ³	$\frac{26,47 \pm 1,12}{36,00}$	$\frac{32,70 \pm 1,49}{49,00}$	$23,10 \pm 1,15$	$18,70 \pm 1,10$	$20,10 \pm 1,10$
Магній, мг/дм ³	$\frac{19,38 \pm 0,62}{24,8}$	$\frac{19,28 \pm 0,61}{26,3}$	$28,80 \pm 1,41$	$31,20 \pm 1,81$	$27,6 \pm 1,93$
Біхроматна окиснюваність, мгО/дм ³	$\frac{36,35 \pm 1,47}{51,0}$	$\frac{48,88 \pm 2,99}{75,4}$	$77,6 \pm 3,53$	$42,35 \pm 2,44$	$29,8 \pm 1,53$
БСК ₅ , мгО ₂ /дм ³	$\frac{2,52 \pm 0,26}{4,96}$	$\frac{3,59 \pm 0,27}{6,08}$	дані відсутні	$7,84 \pm 0,45$	$4,85 \pm 0,3$
Нітроген амонійний, мгN/дм ³	$\frac{1,03 \pm 0,25}{4,02}$	$\frac{1,69 \pm 0,25}{3,64}$	$0,96 \pm 0,07$	$0,81 \pm 0,07$	$0,59 \pm 0,03$
Нітроген нітритний, мгN/дм ³	$\frac{0,033 \pm 0,005}{0,079}$	$\frac{0,077 \pm 0,014}{0,250}$	$0,305 \pm 0,025$	$0,022 \pm 0,001$	$0,004 \pm 0,002$
Нітроген нітратний, мгN/дм ³	$\frac{0,676 \pm 0,087}{1,400}$	$\frac{0,830 \pm 0,144}{2,400}$	$0,990 \pm 0,068$	$0,730 \pm 0,044$	$0,670 \pm 0,041$
Фосфор ортофосфатів, мг P/дм ³	$\frac{0,196 \pm 0,028}{0,517}$	$\frac{0,281 \pm 0,028}{0,643}$	$1,910 \pm 0,074$	$1,150 \pm 0,082$	$0,810 \pm 0,071$
Залізо (загальне), мкг/дм ³	$\frac{157,0 \pm 22,0}{260,0}$	дані відсутні	$1310,0 \pm 90,0$	$740,0 \pm 60,0$	$280,0 \pm 20,0$
Манган, мкг/дм ³	$\frac{63,86 \pm 13,51}{131,0}$	дані відсутні	$80,00 \pm 4,70$	$18,00 \pm 1,11$	$80,00 \pm 5,60$
Мідь, мкг/дм ³	$\frac{2,86 \pm 0,15}{10}$	дані відсутні	$620,0 \pm 30,0$	$21,00 \pm 3,79$	---***
Цинк, мкг/дм ³	$\frac{25,57 \pm 6,84}{65,00}$	дані відсутні	---***	---***	---***
Хром, мкг/дм ³	$\frac{3,59 \pm 1,07}{8,80}$	дані відсутні	---***	---***	---***
Нікель, мкг/дм ³	дані відсутні	дані відсутні	---***	---***	$40,00 \pm 2,00$
Феноли, мг/дм ³	$\frac{0,0011 \pm 0,0001}{0,002}$	дані відсутні	---***	---***	---***
Нафтопродукти, мг/дм ³	$\frac{0,0086 \pm 0,0014}{0,010}$	дані відсутні	---***	---***	---***
АСПАР, мг/дм ³	$\frac{0,0186 \pm 0,0034}{0,030}$	дані відсутні	$0,68 \pm 0,09$	$0,37 \pm 0,03$	$0,26 \pm 0,02$

Примітка: * – середні значення; ** – найгірші значення ; ---*** – вміст менший за межу визначення.

Слід відмітити, що у 2022–2023 рр. найгірші значення становили 150,0 мг/дм³, що втричі перевищили максимальні показники довоєнного періоду (52,3 мг/дм³). Така динаміка свідчить про надходження у водний об'єкт неорганічних і органічних сполук сірки із стічними водами та іншими джерелами антропогенного походження.

За показником усередненого блокового індексу (I_1) засередненими показниками протягом усього періоду досліджень (2020–2024 рр.) води р. Ірпінь відносилися, переважно, до II класу 2 категорії якості (I_1 2,00–2,33) – «дуже добрі», «чисті» води (рис. 2). Слід відмітити, що у пункті досліджень с. Гостомель (№ 1) у 2022–2023 рр. найгірші значення цього індексу становили 3,33, що відповідало II класу 3 категорії якості – «добрі», «досить чисті» води з тенденцією наближення до «задовільних», «слабко забруднених».

Дослідження трофо-сапробіологічного санітарного блоку здійснювали шляхом співставлення гідрофізичних (завислі речовини, прозорість) і гідрохімічних показників (рН, вміст азоту (амонійного, нітритного та нітратного), фосфору, вміст розчиненого кисню,

біхроматної окисненості та БСК₅) із представленими в Методиці (1998) діапазонами величин і їх відповідності визначеним категоріям і класам якості води. Встановлено, що у довоєнні 2020–2021 роки у пункті державного моніторингу якості поверхневих вод р. Ірпінь (с. Гостомель) за середніми значеннями показників цього блокового індексу ($I_2 = 4,20$) вода за якістю відносилася до III класу якості 4 категорії 4 субкатегорії – «задовільні», «слабко забруднені» води, а за найгіршими значеннями ($I_2 = 5,60$) – до IV класу якості 6 категорії 5–6 субкатегорії, що відповідає перехідним за якістю від «посередніх», «помірно забруднених» до «поганих», «брудних». Зниження якості води в даний період обумовлено органічним забрудненням. Зокрема, за результатами аналізу (табл. 1) у воді відмічено підвищені концентрації сполук азоту (амонійного – 7 категорія якості, нітритного – 6 категорія, нітратного – 6 категорія), форфору (7 категорія), а також високі значення біхроматної окиснюваності (6 категорія) та БСК₅ (5 категорія) при одночасному зниженому вмісті розчиненого кисню зниженим вмістом кисню (7 категорія).

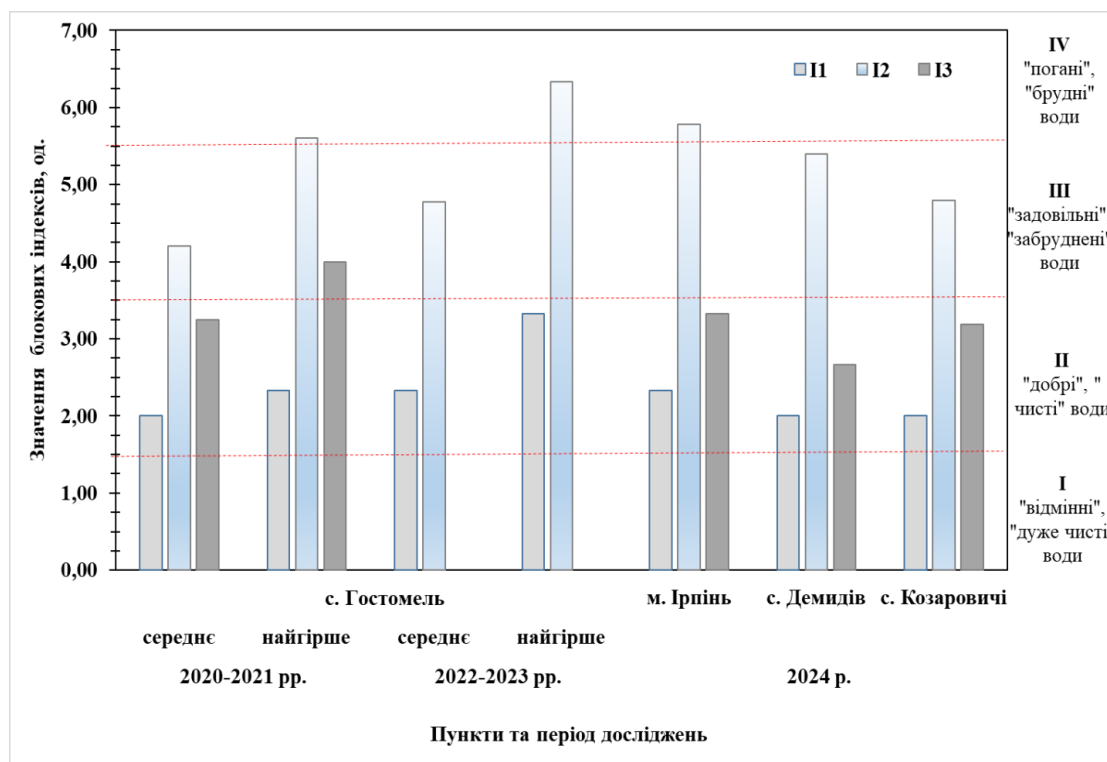


Рис. 2. Якість води р. Ірпінь за блоковими індексами (I_1 – блок сольового складу; I_2 – блок трофо-сапробіологічних санітарних показників; I_3 – блок показників специфічної токсичної дії)

В постмілітарний період, за даними 2022–2023 рр., в даному пункті спостережень спостерігається погіршення якості до 5 категорії 5(4) субкатегорії III класу якості ($I_2 = 4,78$) – води «посередніх», «помірно забруднених» з ухилом до категорії «задовільних», «слабко забруднених». Порівняно із попереднім періодом, тут також зафіксовано підвищений вміст органічних сполук, що є ознакою постійного потрапляння у воду недостатньо очищених стічних вод з населеного пункту. Найгірші значення блокового індексу засвідчують найбільші відхилення величин показників від певної норми, спричинені антропогенною діяльністю та природними явищами (наприклад, кліматичними аномаліями останніх років). За найгіршими показниками ($I_2 = 6,33$) якість води знизилася до IV класу 6 категорії 6(7) субкатегорії якості – «погані», «брудні» води з тенденцією наближення до «дуже поганих», «дуже брудних». Невідповідність встановленим нормативам зафіксовано за вмістом розчиненого кисню (у 2 рази нижче), нітрогену амонійного (у 2,3 рази вище) та фосфору (у 1,7 рази вище), біхроматній окиснюваності (у 2,5–5 разів вище). Це може свідчити про руйнування каналізаційних споруд та локальних септиків внаслідок воєнних дій на цій території й потрапляння у воду стоків.

Аналіз даних 2024 року показує, що відібрані зразки в околицях м. Ірпінь (пункт відбору № 2) за показниками цього індексу ($I_2 = 5,78$) відповідали 6 категорії 6(5) субкатегорії IV класу якості – «погані», «брудні» з ухилом до категорії «посередніх», «помірно забруднених». В околицях с. Демидів (пункт відбору № 3) значення I_2 становило 5,40, а вода класифікувалася за якістю як «посередня», «помірно забруднена» з тенденцією наближення до категорії «поганих», «брудних» III класу 5 категорії 5(6) субкатегорії. В околицях с. Козаровичі (пункт відбору №4) розрахований блоковий індекс складав $I_2 = 4,80$, що характерно для «посередніх», «помірно забруднених» вод з ухилом до категорії «задовільних», «слабко забруднених» (III клас 5 категорія 5(4) субкатегорія). Таким чином, як і попередньому випадку, спостерігаємо забруднення річки органічними компонентами. Однак, як можемо бачити з рис. 2 вниз за течією відбувається часткове самоочищення водної екосистеми.

Оцінювання блоку специфічних показників токсичної дії (I_3) здійснювали за оцінкою вмісту заліза загального, мангану, міді, цинку, хрому, нікелю, фенолів, нафтопродуктів та АСПАР (поверхнево активних речовин). Слід відмітити, що дані за 2022–2023 рр. у пункті державного моніторингу с. Гостомель (пункт досліджень № 1) були відсутні. Тому, за цей період була здійснена неповна екологічна оцінка якості води без урахування цих показників.

Відповідно до проаналізованих середніх значень даних цього блоку ($I_3 = 3,25$) у 2020–2021 рр. (с. Гостомель) вода відносилася до II класу якості, 3 категорії, 3 субкатегорії – «добрі», «досить чисті» води. Натомість за найгіршими значеннями ($I_3 = 4,00$) вона класифікувалася як III клас якості, 4 категорія, 4 субкатегорія, що відповідало характеристиці «задовільні», «слабко забруднені» води (рис. 2).

Проведені у 2024 р. дослідження засвідчили, що проби води, відібрані на набережній м. Ірпінь (пункт відбору № 2), за вмістом речовин специфічної токсичної дії ($I_3 = 3,22$) характеризувалися як «добрі», «досить чисті» води (II клас, 3 категорія, 3 субкатегорія якості). Проби, відібрані із затопленої заплави в районі с. Демидів (пункт відбору № 3) ($I_3 = 2,67$), віднесено до перехідних за якістю від «дуже добрих», «чистих» до «добрих», «досить чистих» (II клас, 3 категорія, 2–3 субкатегорія). У зразках, відібраних в околицях с. Козаровичі поблизу пошкодженої дамби (пункт відбору № 4) ($I_3 = 2,78$), якість води класифікувалася як «добрі», «досить чисті» з тенденцією до «дуже добрих чистих» (II клас, 3 категорія, 3(2) субкатегорія).

У всіх досліджених пунктах зафіксовано підвищений вміст заліза загального – 1310 мкг/дм³ у м. Ірпінь, 740 мкг/дм³ у с. Демидів та 280 мкг/дм³ у с. Козаровичі, що є типовим для природних заболочених умов Полісся, де протікає річка. Водночас на результати суттєво впливає і антропогенний чинник. Крім того, у воді виявлено наявність аніоноактивних синтетичних поверхнево-активних речовин – 0,68 мг/дм³ у м. Ірпінь, 0,37 мг/дм³ у с. Демидів та 0,26 мг/дм³ у с. Козаровичі, що свідчить про надходження у водойму мийних засобів, які негативно впливають на якість води і функціонування екосистеми річки загалом.

Таблиця 2

**Комплексна екологічна оцінка якості води в р. Ірпінь в межах Київської області
у довоєнний та постмілітарний періоди, 2020–2024 рр.**

Пункт спостережень	Роки	ІЕ	Якість води			
			клас	категорія	субкатегорія	характеристика
довоснний період						
с. Гостомель	2020–2021 _{сер}	3,15	II	3	3	«добрі», «досить чисті» води
	2020–2021 _{мах}	3,98	III	4	4(3)	«задовільні», «слабко забруднені» води з ухилом до «добрих», «досить чистих»
постмілітарний період						
с. Гостомель	2022–2023 _{сер}	3,56	III	4	3-4	води, перехідні за якістю від «добрих» «досить чистих» до «задовільних» «слабко забруднених»
	2022–2023 _{мах}	4,83	III	5	5(4)	«посередні», «помірно забруднені» води з ухилом до категорії «задовільних», «слабко забруднених»
м. Ірпінь	2024	3,78	III	4	4(3)	«задовільні», «слабко забруднені» води з ухилом до «добрих», «досить чистих»
с. Демидів	2024	3,33	II	3	3(4)	«добрі», «досить чисті» води з тенденцією наближення до «задовільних» «слабко забруднених»
с. Козаровичі	2024	3,19	II	3	3	«добрі», «досить чисті» води

Узагальнюючим етапом дослідження стало оцінювання екологічного індексу (I_E) якості води в р. Ірпінь (табл. 2). У довоєнний період (2020–2021 рр.) на гідрохімічному посту в с. Гостомель за середніми показниками ($I_E = 3,15$), що відображають природний урівноважений стан водної екосистеми, вода відносилася до II класу, 3 категорії якості – «добрі», «досить чисті» води. За найгіршими значеннями ($I_E = 3,98$) вона класифікувалася як III клас, 4 категорія якості, що відповідає характеристиці «задовільні», «слабко забруднені» води.

У постмілітарний період спостерігається погіршення якісних показників поверхневих вод, зумовлене насамперед наслідками воєнних дій, адже ця територія перебувала в епіцентрі бойових уражень навесні 2022 року. Зокрема, екологічний індекс за найгіршими значеннями становив 4,83, що дозволяє віднести воду до категорії «посередні», «помірно забруднені» з тенденцією до «задовільних», «слабко забруднених» (III клас, 5 категорія).

Подальші дослідження, проведені у 2024 році, засвідчили що в межах м. Ірпінь вода оцінюється як III клас, 4 категорія якості

$I_E = 3,78$) – «задовільні», «слабко забруднені», що свідчить про значний антропогенний вплив урбанізованого середовища на річкову екосистему.

Нижче за течію, на затопленій ділянці долини, спостерігається певне покращення якості води: у районі с. Демидів ($I_E = 3,33$) та с. Козаровичі ($I_E = 3,19$) вона відповідає II класу, 3 категорії якості, що свідчить про активізацію процесів самоочищення та часткове самовідновлення водної екосистеми. Варто зазначити, що за результатами попередніх досліджень (Писанко, 2019) гирлова ділянка р. Ірпінь переважно характеризувалася III класом якості.

Висновки і перспективи подальших досліджень. Порівняльний аналіз отриманих результатів показав погіршення якості води в річці Ірпінь в постмілітарний період. Насамперед збільшився рівень органічного забруднення та погіршення трофо-сапробіологічних показників. Основними джерелами надходження органічних речовин, зокрема сполук азоту і фосфору, залишаються неочищені комунально-побутові стоки (м. Ірпінь, с. Гостомель), а також змиви із сільськогосподарських угідь та приватних

домогосподарств (с. Демидів, с. Козаровичі). Це в поєднанні з літнім підвищенням температури води призводить до дефіциту розчиненого кисню ($\leq 4 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$) та порушення природного екологічного балансу в річці.

На затоплених ділянках долини сформувалися лімніофільні (озерні) умови з уповільненим водообміном, що спричиняє погіршення кисневого режиму та сприяє накопиченню органічних сполук у воді. Ступінь антропогенного навантаження на прилеглі території визначає динаміку процесів самоочищення та швидкість відновлення гідроекосистеми.

Системний моніторинг стану р. Ірпінь у поєднанні із комплексними гідрохімічними,

екотоксикологічними та гідробіологічними дослідженнями є необхідною передумовою для розробки ефективної стратегії екологічної реабілітації річки. Подальші дослідження мають бути спрямовані на: детальне вивчення просторово-часової динаміки забруднення; оцінку біотичних індексів і стану популяцій гідробіонтів; прогнозування темпів природного відношення екосистеми та розробку науково-обґрунтованих заходів для сталого управління водними ресурсами басейну р. Ірпінь.

Подяка. Автори публікації висловлюють подяку доктору біологічних наук, професору В. М. Стародубцеву за консультації щодо організації експедиційних досліджень й відбору проб води в затопленій долині р. Ірпінь.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Napich H., Novitskyi R., Onopriienko D., Dent D., Roubik H. Water security consequences of the Russia-Ukraine war and the post-war outlook. *Water Security*, 2024. 21, 100167. URL: <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2024.100167>
2. Yutilova K., Adamski A. War-induced threats to environmental resilience in Ukraine and recovery perspectives. *Geographical Studies*, 2025. (178). P. 137–152. DOI:10.4467/20833113PG.25.007.21636
3. Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю. Екологічна оцінка впливу військових дій на гідромережу Київської області та стратегії відновлення водних екосистем. *Збірник наукових праць НУК*. 2025. №1. С. 199–207. URL: [https://doi.org/10.15589/znpp2025.1\(499\).28](https://doi.org/10.15589/znpp2025.1(499).28)
4. Gleick P., Vyshnevskiy V., Shevchuk S. Rivers and water systems as weapons and casualties of the Russia-Ukraine War. *Earth's Future*. 2023. 11: e2023EF003910. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2023EF003910>
5. Stelmakh V., Melniichuk M., Melnyk O., & Tokarchuk I. Hydro-ecological state of Ukrainian Water bodies under the influence of military actions. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2023. 25. P. 174–187. URL: <https://bibliotekanauki.pl/articles/27315751.pdf>
6. Ladyka M., & Starodubtsev V. Water reservoirs and the war in Ukraine: environmental problems. *EUREKA: Life Sciences*, 2022. #6. P. 36–43. URL: <https://doi.org/10.21303/2504-5695.2022.002664>
7. Стародубцев В. М., Ладика М. М., У Жофань, Паламарчук С. П., Наумовська О. І. Героїчна оборона та екологічна драма в долині річки Ірпінь. *International scientific journal «Grail of Science»*. 2022. № 23 (December 2022). С. 172–182. URL: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.12.2022.28>
8. Vlasova, O., Shevchenko, A., Shevchenko, I., & Kozitsky, O. (2023). Monitoring Of Water Bodies And Reclaimed Lands Affected By Warfare Using Satellite Data. *Land Reclamation and Water Management*. 2023. 2. P. 59–68. URL: <https://doi.org/10.31073/mivg202302-371>
9. Строкаль В. П., Бережняк Є. М., Наумовська О. І., Вагалюк Л. В., Ладика М. М., Сербенюк Г. А., ... Павлюк С. Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія. За заг. ред. ВП Строкаль. Київ: Видавничий центр НУБіП України. 2023. С. 131–138. URL: <https://dglb.nubip.edu.ua/items/4d10546d-6fb3-4ebf-b29a-75f0335d008d>
10. Ladyka Maryna, Wu Ruofan. Destroying of dams due to war in Ukraine: environmental consequences (case study Irpin Valley flooding). *Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference. Bergen, Norway*. 2024. P. 14–17. URL: <https://isg-konf.com/modern-problems-of-humanity-and-scientific-ways-of-solving-them/>
11. Хільчевський В. К., Гребін В. В. Деякі аспекти щодо стану територій районів річкових басейнів та моніторингу вод під час вторгнення Росії в Україну (2022 р.). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2022. 3(65). С. 6–14. URL: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.1>
12. Благополучна А. Г., Ляховська Н. О., Парахненко В. Г. Еколого-економічні збитки від повномасштабного військового вторгнення росії в Україну. *Економічні горизонти*. 2022. 3(21), С. 53–61. URL: [https://doi.org/10.31499/2616-5236.3\(21\).2022.263572](https://doi.org/10.31499/2616-5236.3(21).2022.263572)
13. 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. Мощун, Київської області. *Екологічні науки*. 2023. (46). С. 53–58. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/37230/1/9.pdf>

14. Берія В. Д., Гандзюра В. П. Зміни еколого-популяційних особливостей угруповань літорального зоопланк-тону водних екосистем річки Ірпінь та її приток у весняно-літній період 2024 року. *Екологічні науки*. 2024. № 4 (55). С. 49–52. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.есо.4-55.8>
15. Державний водний кадастр. Розділ 1. Поверхневі води. Серія 2. Щорічні дані про якість поверхневих вод суші. Частина 1. Річка і канали. Частина 2. Озера та водосховища. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. 2020 р.
16. Державний водний кадастр. Розділ 1. Поверхневі води. Серія 2. Щорічні дані про якість поверхневих вод суші. Частина 1. Річка і канали. Частина 2. Озера та водосховища. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. 2021 р.
17. Державний водний кадастр. Розділ 1. Поверхневі води. Серія 2. Щорічні дані про якість поверхневих вод суші. Частина 1. Річка і канали. Частина 2. Озера та водосховища. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. 2022 р.
18. Державний водний кадастр. Розділ 1. Поверхневі води. Серія 2. Щорічні дані про якість поверхневих вод суші. Частина 1. Річка і канали. Частина 2. Озера та водосховища. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. 2023 р.
19. ДСТУ ISO 5667-14:2005. Якість води. Відбирання проб. Частина 14. Настанови щодо забезпечення якості відбирання та оброблення проб природних вод. Київ Держспоживстандарт України. 2006. 21 с.
20. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями. Затверджено Міністерством України від 31.03.98 р. №44 і погоджено з держгідрометром та Держводгоспом України / Автори Романенко В.Д., Жулинський В.М., Оксіук О.П. та ін. К.:СИМБОЛ-Т. 1998. 48 с.
21. Писанко Я. І. Особливості структурно-функціональної організації техногенно зміненої водної екосистеми гірлової ділянки річки Ірпінь. Автореф. дис. канд. тех. наук. Київ. 2019. 24 с. URL: <https://nau.edu.ua/site/variables/news/2019/4/avtoref%20Pisanko.pdf>

REFERENCES:

1. Hapich, H., Novitskyi, R., Onopriienko, D., Dent, D., & Roubik, H. (2024). Water security consequences of the Russia-Ukraine war and the post-war outlook. *Water Security*, 21, 100167.
2. Yutilova, K., & Adamski, A. (2025). War-induced threats to environmental resilience in Ukraine and recovery perspectives. *Geographical Studies*, (178), 137–152.
3. Kireytseva, H. V., & Tsyhanenko-Dzyubenko, I. YU. (2025). Ekologichna otsinka vplyvu viys'kovykh diy na hidromerezhu Kyivs'koyi oblasti ta stratehiyi vidnovlennya vodnykh ekosystem [Ecological Assessment Of Military Actions Impact On The Kyiv Region Hydronetwork And Strategies For Aquatic Ecosystem Restoration]. *Zbirnyk naukovykh prats' NUK*. 2025. №1. 199–207 [in Ukrainian].
4. Gleick, P., Vyshnevskyi, V., & Shevchuk, S. (2023). *Rivers and water systems as weapons and casualties of the Russia–Ukraine War. Earth's Future II: e2023EF003910*.
5. Stelmakh, V., Melniichuk, M., Melnyk, O., & Tokarchuk, I. (2023). Hydro-ecological state of Ukrainian Water bodies under the influence of military actions. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 25, 174–187.
6. Ladyka, M., & Starodubtsev, V. (2022). Water reservoirs and the war in Ukraine: environmental problems. *EUREKA: Life Sciences*, (6), 36–43.
7. Starodubtsev, V. M., Ladyka, M. M., Wu, Ruofan, Palamarchuk, S. P., Naumovska, O. I. (2022). Heroichna oborona ta ekolohichna drama v dolyni richky Irpin'. [Heroic Defence And Environmental Drama In The Irpin River Valley]. *International scientific journal «Grail of Science»*. № 23 (December 2022). 172–182. [in Ukrainian].
8. Vlasova, O., Shevchenko, A., Shevchenko, I., & Kozytsky, O. (2023). Monitoring Of Water Bodies And Reclaimed Lands Affected By Warfare Using Satellite Data. *Land Reclamation and Water Management*. 2023 (2), 59–68. <https://doi.org/10.31073/mivg202302-371>.
9. Strokal, V. P., Berezhniak, Ye. M., Naumovska, O. I., Vagaliuk, L. V., Ladyka, M. M., Serbeniuk, G. A., Palamarchuk, S. P., Pavliuk, S. D. (2023). Vplyv rosiys'koyi ahresiyi na stan pryrodnykh resursiv Ukrayiny: monohrafiya. [The implications of the Russian-Ukrainian war on the state of natural resources in Ukraine: the monograph]. Za zah. red. V.P. Strokal. Kyiv: Vydavnychyy tsentr NUBiP Ukrayiny, 131–138 [in Ukrainian].
10. Ladyka Maryna, Wu Ruofan. Destroying of dams due to war in Ukraine: environmental consequences (case study Irpin Valley flooding). (2024). *Proceedings of the XXXIV International Scientific and Practical Conference. Bergen, Norway*. 14–17.
11. Khilchevskyi, V.K., Grebin, V.V. (2022). Deyaki aspekty shchodo stanu terytoriy rayoniv richkovykh baseyniv ta monitorynhu vod pid chas vtorhnennya Rosiyi v Ukrayinu (2022 r.) [Some aspects regarding the state of the territory of the river basins districts and water monitoring during Russia's invasion of Ukraine (2022)]. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia [Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology]*, 3(65), 6–14 [in Ukrainian].

12. Blahopoluchna, A. H., Liakhovska, N.O., Parakhnenko, V. H. (2022). Ekoloho-ekonomichni zbytky vid povnomasshtabnoho viys'kovoho vtorhnennya rosiyi v Ukrainu. [Environmental And Economic Damage From The Full-Scale Military Invasion Of Russia In Ukraine]. *Ekonomichni horyzonty*, (3(21), 53–61. [in Ukrainian].
13. Tsyganenko-Dzyubenko I. Yu., Ghandzyura V., Alpatova O., Demchuk L., Khomyak, I., Vovk, V. (2023). Hidrokhimichnyy status post-militarykh vodnykh ekosystem s. Moshchun, Kyiv's'koyi oblasti. [Hydrochemical status of post-military water ecosystems of the village Moshchun, Kyiv region]. *Ekolohichni nauky*, (46), 53–58 [in Ukrainian].
14. Beriia, V. D., & Handzyura, V. P. Zminy ekoloho-populyatsiynykh osoblyvostey uhrupovan' litoral'noho zooplanktonu vodnykh ekosystem richky Irpin' ta yiyi pryток u vesnyano-litniy period 2024 roku. [Changes in ecological and population characteristics of littoral zooplankton communities of aquatic ecosystems of the Irpin River and its tributaries in the spring-summer period of 2024]. *Ekolohichni nauky*, 2024, № 4(55), 49–52 [in Ukrainian].
15. Tsentralna heofizychna observatoriia imeni Borysa Sreznevskoho. (2020). *Derzhavnyi vodnyi kadastr. Rozdil 1. Poverkhnevi vody. Seriya 2. Shchorichni dani pro yakist poverkhnevykh vod sushi. Chastyna 1. Richky i kanaly. Chastyna 2. Oзера ta vodoskhovyshcha* [State Water Cadastre. Section 1. Surface Waters. Series 2. Annual data on the quality of surface waters of land. Part 1. Rivers and canals. Part 2. Lakes and reservoirs]. [in Ukrainian].
16. Tsentralna heofizychna observatoriia imeni Borysa Sreznevskoho. (2021). *Derzhavnyi vodnyi kadastr. Rozdil 1. Poverkhnevi vody. Seriya 2. Shchorichni dani pro yakist poverkhnevykh vod sushi. Chastyna 1. Richky i kanaly. Chastyna 2. Oзера ta vodoskhovyshcha* [State Water Cadastre. Section 1. Surface Waters. Series 2. Annual data on the quality of surface waters of land. Part 1. Rivers and canals. Part 2. Lakes and reservoirs]. [in Ukrainian].
17. Tsentralna heofizychna observatoriia imeni Borysa Sreznevskoho. (2022). *Derzhavnyi vodnyi kadastr. Rozdil 1. Poverkhnevi vody. Seriya 2. Shchorichni dani pro yakist poverkhnevykh vod sushi. Chastyna 1. Richky i kanaly. Chastyna 2. Oзера ta vodoskhovyshcha* [State Water Cadastre. Section 1. Surface Waters. Series 2. Annual data on the quality of surface waters of land. Part 1. Rivers and canals. Part 2. Lakes and reservoirs]. [in Ukrainian].
18. Tsentralna heofizychna observatoriia imeni Borysa Sreznevskoho. (2023). *Derzhavnyi vodnyi kadastr. Rozdil 1. Poverkhnevi vody. Seriya 2. Shchorichni dani pro yakist poverkhnevykh vod sushi. Chastyna 1. Richky i kanaly. Chastyna 2. Oзера ta vodoskhovyshcha* [State Water Cadastre. Section 1. Surface Waters. Series 2. Annual data on the quality of surface waters of land. Part 1. Rivers and canals. Part 2. Lakes and reservoirs]. [in Ukrainian].
19. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2006). *DSTU ISO 5667-14:2005. Yakist vody. Vidbyrannia prob. Chastyna 14. Nastanovy shchodo zabezpechennia yakosti vidbyrannia ta obroblyennia prob pryrodnykh vod* [State Standard ISO 5667-14:2005. Water quality — Sampling — Part 14: Guidance on quality assurance of sampling and handling of natural water samples]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy. [in Ukrainian].
20. Metodyka ekolohichnoi otsinky yakosti poverkhnevykh vod za vidpovidnymi katehoriiami [Methodology of ecological assessment of surface water quality by relevant categories] (1998). Kyiv : Symvol-T [in Ukrainian].
21. Pysanko, YA. I. (2019). Osoblyvosti strukturno-funktsional'noyi orhanizatsiyi tekhnogenno zminenoyi vodnoyi ekosystemy hyrlovoyi dilyanky richky Irpin'. [Features of the structural and functional organization of technogenically modified water ecosystem of the mouth of the Irpin river. Skilled work on the rights of manuscripts]. PhD Thesis. Kyiv, 24 [in Ukrainian].

Стаття надійшла: 20.08.2025

Прийнято: 03.09.2025

Опубліковано:

УДК 502.33:630*6:574.2

DOI

Вікторія МЕЛЬНИК-ШАМРАЙ

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0002-3551-5085**Володимир ШАМРАЙ**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих технологій та будівництва імені професора Бакка М.Т., Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0001-9441-9379**Ірина ПАЦЕВА**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0002-6572-681X

Бібліографічний опис статті: Мельник-Шамрай, В., Шамрай, В., Пацева, І. (2025). Післяпроектний моніторинг як основа екологічної оцінки щодо збереження біологічного різноманіття в лісових екосистемах. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 81–89, doi:

ПІСЛЯПРОЄКТНИЙ МОНІТОРИНГ ЯК ОСНОВА ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ЩОДО ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО РІЗНОМАНІТТЯ В ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ

У статті досліджено роль післяпроектного моніторингу як ключового інструмента оцінки впливу на довкілля в контексті збереження біологічного різноманіття лісових екосистем. Висвітлено правові та організаційні основи запровадження механізмів оцінки впливу на довкілля в Україні, що стали результатом адаптації національного законодавства до вимог Європейського Союзу та міжнародних екологічних угод та розглянуто особливості її застосування у сфері лісового господарства. У статті наведено результати аналізу матеріалів післяпроектного моніторингу лісових екосистем, які демонструють комплексний характер впливів на компоненти довкілля – атмосферне повітря, водні ресурси, ґрунти, рослинний і тваринний світ. Встановлено, що найбільш вразливим елементом є біологічне різноманіття, оскільки порушення природних трофічних зв'язків, скорочення чисельності рідкісних і зникаючих видів, деградація оселищ і фрагментація біотопів призводять до зниження екологічної стійкості лісів. На прикладі діяльності ДП «Словечанський лісгосп АПК» проведено SWOT-аналіз, що дозволив виявити сильні та слабкі сторони, можливості й загрози ведення лісгосподарської діяльності з урахуванням необхідності збереження біологічного різноманіття. Особлива увага приділена інтеграції результатів післяпроектного моніторингу у систему екологічного управління, що сприяє прийняттю науково обґрунтованих рішень для збереження екосистем. Практичне значення роботи полягає у виробленні рекомендацій для органів влади, лісгосподарських підприємств і природоохоронних організацій щодо вдосконалення системи післяпроектного моніторингу, оптимізації лісокористування, розширення природоохоронних територій та посилення взаємодії з місцевими громадами. Перспективи подальших досліджень свідчать про необхідність впровадження геоінформаційних технологій і дистанційного моніторингу для аналізу просторової динаміки біорізноманіття. Таким чином, післяпроектний моніторинг визначено як ключовий механізм екологічного супроводу лісгосподарської діяльності, що забезпечує не лише контроль, а й адаптивне управління природними ресурсами у відповідності до екологічних вимог ЄС.

Ключові слова: лісові екосистеми, збереження біологічного різноманіття, оцінка впливу на довкілля, післяпроектний моніторинг, лісокористування, екологічне управління.

Viktoriia MELNYK-SHAMRAI

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0002-3551-5085

Volodymyr SHAMRAI

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Mining Technologies and Construction named after Professor M.T. Bakka, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0001-9441-9379

Iryna PATSEVA

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ecology and Environmental Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0002-6572-681X

To cite this article: Melnyk-Shamrai, V., Shamrai, V., Patseva, I. (2025). *Pisliaproiektnyi monitorynh yak osnova ekolohichnoi otsinky shchodo zberezhennia biolohichnoho riznomanittia v lisovykh ekosystemakh* [Post-project monitoring as a basis for environmental assessment for biodiversity conservation in forest ecosystems]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 81–89, doi:

POST-PROJECT MONITORING AS A BASIS FOR ENVIRONMENTAL ASSESSMENT FOR BIODIVERSITY CONSERVATION IN FOREST ECOSYSTEMS

The article examines the role of post-project monitoring as a key tool for environmental impact assessment in the context of biodiversity conservation in forest ecosystems. It outlines the legal and organizational frameworks for implementing environmental impact assessment mechanisms in Ukraine, which were developed to adapt national legislation to the requirements of the European Union and international environmental agreements. The study also discusses the specifics of their application in the forestry sector. The article presents an analysis of post-project monitoring data from forest ecosystems, which demonstrates the complex nature of impacts on environmental components, including atmospheric air, water resources, soils, flora, and fauna. It was found that biodiversity is the most vulnerable element, as the disruption of natural trophic links, a decrease in the number of rare and endangered species, habitat degradation, and fragmentation lead to a decline in the ecological stability of forests. A SWOT analysis was conducted using the example of the "Slovchansky Forest Enterprise of the Agro-Industrial Complex" to identify the strengths, weaknesses, opportunities, and threats of forestry activities, while considering the need for biodiversity conservation. Special attention is paid to integrating the results of post-project monitoring into the environmental management system, which helps in making science-based decisions for ecosystem preservation.

The practical value of this work lies in providing recommendations for government bodies, forestry enterprises, and environmental protection organizations on how to improve the post-project monitoring system, optimize forest use, expand protected areas, and enhance cooperation with local communities. Future research prospects suggest the need to implement geoinformation technologies and remote monitoring to analyze the spatial dynamics of biodiversity. In conclusion, post-project monitoring is defined as a key mechanism for the environmental support of forestry activities, ensuring not only control but also adaptive management of natural resources in accordance with EU environmental requirements.

Key words: forest ecosystems, biodiversity conservation, environmental impact assessment, post-project monitoring, forest management, environmental governance.

Вступ. Прагнення України до євроінтеграції з Європейським Союзом стало одним із мотивуючих чинників внесення змін до низки нормативно-правових актів. Гармонізації національного законодавства з європейськими стандартами передбачала не лише адаптацію існуючих нормативно-правових актів, але й запровадження нових законів, інструментів

та механізмів. Одним із базових напрямів такої імплементації стала екологічна безпека держави, адже наявна нормативно-правова база не забезпечувала дієвих механізмів контролю та запобігання негативному впливу на довкілля. Як наслідок, Україна не виконувала в повному обсязі зобов'язання, взяті за низкою міжнародних екологічних угод, зокрема Орхуською

конвенцією про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля (Орхуська Конвенція, 2001), а також положеннями Конвенції Еспо про оцінку впливу на навколишнє середовище у транскордонному контексті (Конвенції Еспо, 1999).

Прийняття Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» (ОВД) (Закон України «Про ОВД», 2017) стало підґрунтям щодо виконання міжнародних зобов'язань за Орхуською конвенцією та Конвенції Еспо, а також сприяло створенню правового механізму, який гарантував, що будь-який вид планованої діяльності перед початком реалізації проходить процедуру ОВД з метою виявлення та запобігання потенційним негативним наслідкам для довкілля.

Закон України «Про Оцінку впливу на довкілля» (Закон України «Про ОВД», 2017) передбачає чітку процедуру, яка дає змогу комплексно проаналізувати та оцінити можливий вплив планової діяльності на довкілля та вчасно вжити необхідних заходів для його локалізації чи зменшення. В статті 3 Закону (Закон України «Про ОВД», 2017) регламентовано перелік видів планової діяльності, що підлягають оцінці впливу на довкілля. Ведення лісогосподарської діяльності потрапляє під сферу застосування ОВД, бо лісові екосистеми відіграють важливу роль у збереженні біологічного різноманіття, підтриманні природної стійкості, а також виконують безліч захисних та регулюючих функцій.

Ключовим елементом, який дозволяє з'ясувати, чи дійсно планована діяльність після її впровадження не завдає суттєвої шкоди довкіллю, є післяпроектний моніторинг. Післяпроектний моніторинг здійснюється, після завершення проектних робіт та введення об'єкта в експлуатацію, з метою виявлення будь-яких розбіжностей і відхилень у прогнозованих рівнях впливу та ефективності заходів із запобігання забрудненню довкілля та його зменшення. Звичайно, післяпроектний моніторинг має свою специфіку залежно від виду діяльності, об'єктів впливу та екосистем, у межах яких він проводить. Післяпроектний моніторинг в лісовому господарстві забезпечує моніторингові спостереження за станом представників рослинного та тваринного світу, оцінку стану лісових насаджень та процесів

відновлення екосистеми. На основі отриманих результатів керівники лісогосподарських підприємств мають змогу вчасно виявляти негативні тенденції у стані лісових екосистем, прогнозувати ризики їх розвитку, а також формувати еколого-управлінські рішення щодо подальшого функціонування та розвитку лісового господарства. Отже, післяпроектний моніторинг виступає не лише інструментом контролю, а й основою для адаптивного управління природними ресурсами, спрямованого на збереження екологічної рівноваги та відповідність діяльності екологічним вимогам ЄС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Після прийняття та ведення в дію Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» постало багато питань щодо особливостей проведення процедур ОВД у різних галузях господарської діяльності, що створило широке коло дискусій серед влади, науковців та бізнесу. Міжнародна благодійна організація «Екологія—Право—Людина» однією з перших почала розглядати впровадження в Україні інституту оцінки впливу на навколишнє середовище європейського зразка (Єндрюшка, Алексєєва & Скрильніков, 2013), а в роботі (Шаравара, Бондаренко, Тарасова, Гаврилюк, Гулевець & Савченко, 2018) проаналізовано наявні проблемні положення Закону ОВД та його нормативно-правове забезпечення, а також розглянуто шляхи його вдосконалення та подальшого впровадження. У публікаціях (Гоштинар, 2017) оцінка впливу на довкілля розглядається як важливий елемент забезпечення екологічної безпеки держави та як інструменту виявлення усіх можливих екологічних наслідків реалізації планованої діяльності на довкілля. Авторами (Барна, 2017, Барна, 2019, Волкова, 2021, Єремєєва, 2017) проаналізовано правові та організаційні засади оцінки впливу на довкілля, особлива увага приділена практичним аспектам реалізації процедури оцінки впливу на довкілля та переліку підстав для ухвалення рішення про відмову у видачі висновку з оцінки впливу на довкілля. В роботі (Самойленко, 2017) розглядаються напрями удосконалення системи оцінки впливу на довкілля в контексті екологічного супроводу проектів та діяльності підприємств.

Лісові екосистеми відіграють важливу роль у збереженні ґрунту, фільтрації води та регулюванні клімату. Здійснення оцінки впливу на довкілля для лісогосподарської діяльності

необхідне, адже будь-які рубки чи зміни лісового покриву в лісах змінюють структуру екосистем. Зникнення або зменшення чисельності видів порушує природні трофічні ланцюги, знижує стійкість екосистем до зовнішніх впливів і ускладнює процеси їх відновлення. Види діяльності, що підлягають ОВД (Закон України «Про ОВД», 2017):

- суцільні та поступові рубки головного користування на площі понад 1 га;
- суцільні санітарні рубки на територіях та об'єктах природно-заповідного фонду;
- будівництво лісових доріг, складів, інфраструктури.

Для того щоб лісгосподарське підприємство могло здійснювати рубки необхідно отримати спеціальний дозвіл на заготівлю деревини у порядку рубок головного користування на виділеній лісовій ділянці – лісорубний квиток. Отримання такого документа регламентується статтею 69 Лісового кодексу України (Лісовий кодекс України, 1994), а видача лісорубного квитка здійснюється відповідно до постанови «Про врегулювання питань щодо спеціального використання лісових ресурсів» (Постанова № 761, 2007) та Закону України «Про дозвільну систему у сфері господарської діяльності» (Закон України «Про дозвільну систему у сфері господарської діяльності», 2005). Проведення процедури оцінки впливу на довкілля та отримання допустимого висновку є передумовою для видачі лісорубного квитка (Методичні рекомендації, 2020).

Проведення ОВД у лісових екосистемах є досить складним та багатокомпонентним процесом. Лісові екосистеми зазвичай мають високий рівень видового та генетичного багатства, складні трофічні зв'язки та багато екологічно цінних природоохоронних територій. Під час здійснення ОВД необхідно враховувати сезонність, здійснювати аналіз кумулятивного впливу та забезпечити проведення належного післяпроектного моніторингу стану насаджень і компонентів довкілля для своєчасного виявлення можливих негативних змін.

Метою статті є вивчення ролі післяпроектного моніторингу як основного інструмента щодо збереження біологічного різноманіття лісових екосистем після проведення рубок та інших видів господарської діяльності.

Новизна отриманих результатів полягає в розробленні SWOT-аналізу сильних і слабких

сторін, можливостей та загроз у сфері ведення лісгосподарської діяльності на основі даних одного з реальних звітів післяпроектного моніторингу. Такий аналіз сприяв виявленню ключових чинників, що впливають на стан біологічного різноманіття після проведення рубок, та дає змогу визначити напрями для підвищення ефективності заходів з його збереження.

Результати дослідження можуть бути використані органами державного та регіонального управління для вдосконалення нормативно-правових вимог до післяпроектного моніторингу у лісовій галузі; лісгосподарськими підприємствами для оптимізації планування рубок і лісовідновлювальних заходів; екологічними організаціями при підготовці звітів з ОВД та програм моніторингу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз матеріалів звітів з ОВД (Реєстр ОВД) свідчить, що використання лісових ресурсів у порядку проведення рубок головного користування та суцільних санітарних рубок та території лісових екосистем впливає на низку компонентів довкілля (табл. 1). Планована діяльність матиме комплексний тиск на всі ключові компоненти довкілля – від атмосферного повітря та вод до біоти й акустичного режиму.

Біологічне різноманіття є одним із найчутливіших компонентів довкілля, яке найбільше страждає від господарської діяльності в лісових екосистемах. Проведення рубок, робота техніки, викиди та шумові навантаження змінюють природні умови існування як для рослин, так і для тварин. З боку флори найбільший негативний вплив проявляється у зменшенні чисельності підросу, пригніченні росту чутливих видів через осідання пилу та випадання забруднюючих речовин, що призводить до спрощення видового складу лісових насаджень.

Для фауни основними наслідками є руйнування або фрагментація середовищ існування, зменшення кормової бази та витіснення видів, які потребують тиші й стабільних умов середовища. Шум і світлове забруднення порушують ритми життя птахів та ссавців, а механізовані роботи призводять до загибелі безхребетних і дрібних наземних тварин. Це спричиняє ланцюгові ефекти в екосистемі, зокрема порушення трофічних зв'язків.

Таким чином, біологічне різноманіття виявляється найбільш вразливим елементом під час

реалізації лісогосподарської діяльності. Його зниження має довготривалі наслідки: від втрати локальних популяцій до зменшення екологічної стійкості лісових екосистем загалом, що ускладнює їхнє природне відновлення та підтримання екологічної рівноваги.

Ми проаналізували матеріали звіту з Оцінки впливу на довкілля дочірнього підприємства «Словечанський лісгосп АПК» Житомирського обласного комунального агролісогосподарського підприємства «ЖИТОМИРОБЛАГРОЛІС» Житомирської обласної ради (Звіт з ОВД, 2024). Лісові екосистеми мають високу видову представленість фауністичного та флористичного біорізноманіття, саме тому ми приділили значну увагу даному питанню. Так, на території ДП «Словечанський лісгосп АПК» наявні наступні природоохоронні території, що займають площу 6365,12 га (8,8 %): ландшафтні заказники «Глушець», «Городище», «Білчанські рови», «Вітковське» та «Бокиївський рів»; лісовий заказник Урочище «Дуби», ботанічний заказник «Черевківський», гідрологічні заказники «Коморище» та «Можарівський», загальнозоологічні заказники «Токовище» та «Заболоття». Варто відмітити, щот територія ДП «Словечанський лісгосп АПК» включає складові елементи Екомережі Житомирської області: ключові території національного рівня (І – Убортська, ІІ – Чорнобильська (Народицьке суб'ядро), V – Словечанський кряж); сполучні території національного рівня (V – Убортсько – Народицька); ключові території регіонального рівня (1 – Піщаницьке, 3 – Липницьке).

Важливе місце на території в районі розташування ДП «Словечанський лісгосп АПК» займають об'єкти Смарагдової мережі

(Звіт післяпроектний моніторинг, 2024): Ovrutskiy (UA0000090), Slovechanskyi Kriazh (UA0000173), Zakhidno-Ovrutskiy (UA0000091), Poliskiy (UA 0000001), Olevskiy (UA0000482), Pivnichno-Ovrutskiy (UA0000483), Hrezlianskiy (UA0000481), UA0000172 Drevlianskyi Nature Reserve.

На території лісового господарства трапляються рідкісні та зникаючі види рослин, занесені до Червоної книги України, серед яких Плаун річний (*Lycopodium annotinum* L.), Підсніжник білосніжний (*Galanthus nivalis* L.), Пальчатокорінник плямистий (*Dactylorhiza maculata* (L.) Soó), Півники сибірські (*Iris sibirica* L.), Коручка чемерниковидна (*Epipactis helleborine* (L.) Crantz), Росичка середня (*Drosera intermedia* Hayne), Косарика черепитчаста (*Gladiolus imbricatus* L.), Сон розкритий (*Pulsatilla patens* (L.) Mill), Водяний жовтець плаваючий (*Batrachium fluitans* (Lam.) Wimm.) (Звіт післяпроектний моніторинг, 2024). Варто зазначити, що окремі види підлягають охороні згідно з Додатком «Конвенції про міжнародну торгівлю видами дикої фауни і флори» та Бернській конвенції.

На території лісового господарства також виявлено угруповання, занесені до Зеленої книги України, які підлягають особливій охороні, зокрема: угруповання звичайноосновних лісів жовторо-додендронових та звичайнодубово-звичайноосновних лісів жовторо-додендронових, угруповання формації глечиків жовтих, а також угруповання клейковільхових лісів із домінуванням у травостойі страусового пера звичайного.

Фауністичний комплекс також представлений охоронними видами тварин, включеними

Таблиця 1

Характер впливу планованої діяльності, яка пов'язана з використанням лісових ресурсів, рубок головного користування та суцільних санітарних рубок на компоненти довкілля

Компонент довкілля	Вид впливу
Атмосферне повітря	Викиди забруднюючих речовин від роботи технологічного обладнання, транспорту, сушильних установок
Поверхневі та підземні води	Стічні води після миття обладнання, опади з промислових майданчиків, можливе потрапляння забруднень до ґрунтових вод
Ґрунтовий покрив	Потрапляння забруднюючих речовин з викидами, відходами, стічними водами; ущільнення ґрунту від техніки
Рослинний світ	Зміна середовища існування через забудову і технологічні процеси; осідання пилу та викидів на рослинність
Тваринний світ	Шум, світлове забруднення, зміна кормової бази, порушення ареалів
Акустичний режим	Шум від роботи обладнання та транспорту

Побудовано авторами на основі матеріалів з Єдиний реєстр з оцінки впливу на довкілля

до Червоної книги України, зокрема (Звіт післяпроектний моніторинг, 2024): Ведме́диця-госпо́диня (*Calimorpha dominula*), Вусач великий дубовий (*Cerambyx cerdo*), Жук-олень (*Lucanus cervus* L.), Красуня діва (*Calopteryx virgo* L.), Мідянка (*Coronella austriaca* Laurenti), Вільшанка (*Erithacus rubecula* (L.)), Горобець польовий (*Passer montanus*), Дрізд співочий (*Turdus philomelos* C.L. Brehm), Дрізд чорний (*Turdus merula* L.), Дятел звичайний (*Dendrocopos major* (L.)), Дятел малий (*Dendrocopos minor* (L.)), Дятел середній (*Dendrocopos medius* (L.)), Жайворонок лісовий (*Lullula arborea*), Жайворонок польовий (*Alauda arvensis*), Зозуля звичайна (*Cuculus canorus*), Зяблик (*Fringilla coelebs*), Ластівка сільська (*Hirundo rustica* L.), Лелека білий (*Ciconia ciconia* (L.)), Лелека чорний (*Ciconia nigra* (L.)), Одуд (*Upupa epops* L.), Повзик (*Sitta europaea* L.), Соловейко східний (*Luscinia luscinia* (L.)), Орлан-білохвіст (*Haliaeetus albicilla*), Голуб-синяк (*Columba oenas*), Тетерук (*Lyrurus tetrix* (L.)), Журавель сірий (*Grus grus* (L.)), Пугач (*Bubo bubo*), Орябок (*Tetrastes bonasia* (L.)), Сова болотяна (*Asio flammeus* (Pontop.)), Шуліка чорний (*Milvus migrans* (Bodd.)), Бобер європейський (*Castor fiber*), Вивірка звичайна (*Sciurus vulgaris*),

Видра річкова (*Lutra lutra* L.), Заєць сірий (*Lepus europaeus*), Козуля європейська (*Capreolus capreolus*), Рись (*Lynx lynx*), Норка європейська (*Mustela lutreola*), Мишівка лісова (*Sicista betulina*), Кажан пізній (*Eptesicus serotinus*), Нетопир Натузіуса (*Pipistrellus nathusii*).

Отже, проведений аналіз матеріалів свідчить про високу екологічну цінність територій, що перебувають у користуванні ДП «Словечанський лісгосп АПК», а також про наявність значної кількості об'єктів флори та фауни, занесених до Червоної і Зеленої книг України та міжнародних списків охорони. Незважаючи на це, за результатами проведеної процедури оцінки впливу на довкілля підприємству було надано дозвіл на здійснення планованої діяльності за умови виконання природоохоронних заходів та проведення подальшого післяпроектного моніторингу. Саме результати цього моніторингу стали підґрунтям для проведення SWOT-аналізу, який дозволив оцінити сильні та слабкі сторони, можливості та загрози ведення лісгосподарської діяльності з урахуванням збереження біологічного різноманіття (табл. 2).

Проведений SWOT-аналіз показав, що у ДП «Словечанський лісгосп АПК» післяпроектний моніторинг є дієвим інструментом для збереження біологічного різноманіття, оскільки

Таблиця 2

SWOT-аналіз збереження біологічного різноманіття після проведення рубок головного користування та суцільних санітарних в ДП «Словечанський лісгосп АПК» на основі післяпроектного моніторингу

Сильні сторони (Strengths) - Моніторингові спостереження. Післяпроектний моніторинг проводиться планово, з визначеною періодичністю та чітким переліком завдань. - Залучення кваліфікованих фахівців. Робоча група включала науковців та спеціалістів лісової галузі. - Збереження біологічного різноманіття. Ідентифіковано 21 природне оселище Бернської Конвенції, виявлено угруповання Зеленої книги України та представників, що занесені до Червоної книги України. - Інтеграція з міжнародними природоохоронними ініціативами. Охорона об'єктів Смарагдової мережі.	Слабкі сторони (Weaknesses) - Відсутність Закону про території Смарагдової мережі, робить їх вразливими. - Збереження біологічного різноманіття. Мала площа та фрагментарність цінних біотопів. - Фінансова залежність. Обмежене фінансування, що не дає змоги проводити більш довготривалі спостереження. - Можливі побічні впливи у зв'язку з використанням ресурсів лісу. Збір населенням ягід, грибів, лікарських рослин та відпочинок можуть негативно впливати на біотопи
Можливості (Opportunities) - Збереження біологічного різноманіття. Створення природоохоронних територій та розробка програм зеленого туризму. - Лісгосподарська діяльність. Дані моніторингових спостережень можна використати для планування лісокористувань та вивчення стану лісів в умовах змін клімату. - Партнерство з громадськістю та залучення міжнародних інвестицій. Наявність об'єктів Смарагдової мережі дає змогу претендувати на підтримку ЄС та залучення місцевих громад до покращення та збереження біологічного різноманіття.	Загрози (Threats) - Лісові пожежі, шкідники та хвороби. Можуть знищити цінні біотопи. - Інвазійні види. Інтенсивне поширення може привести до втрати аборигенних видів. - Кліматичні зміни. Зміна гідрологічного та температурного режиму може призвести до деградації лісових екосистем, а від так і знищення біологічного різноманіття. - Господарська діяльність. Регламентовані рубки можуть негативно впливати на біотопи, ще більш негативний вплив проявляється при неконтрольованому використанні ресурсів лісу (полювання, збір рослин, вирубка).

він базується на регулярних спостереженнях, залученні фахівців та врахуванні міжнародних природоохоронних ініціатив. Водночас існують суттєві слабкі сторони, серед яких відсутність законодавчого закріплення охорони Смарагдової мережі, фрагментарність цінних біотопів та недостатнє фінансування, що знижує ефективність моніторингу.

Можливості подальшого розвитку пов'язані з розширенням природоохоронних територій, інтеграцією результатів моніторингу у лісогосподарське планування та залученням міжнародної підтримки. Проте потенційні загрози, зумовлені кліматичними змінами, поширенням інвазійних видів, лісовими пожежами та господарською діяльністю, створюють високі ризики для стабільності екосистем.

Таким чином, збереження біологічного різноманіття потребує системного підходу, що поєднує науково обґрунтовані заходи моніторингу, удосконалення законодавчої бази та практичну взаємодію між державними структурами, науковцями та місцевими громадами.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Післяпроєктний моніторинг у лісових екосистемах доводить свою ефективність як інструмент перевірки прогнозів оцінки впливу на довкілля та корекції управлінських рішень у сфері лісокористування. Його проведення забезпечує не лише фіксацію фактичних змін стану довкілля, а й формує науково

обґрунтовану базу даних для виявлення тенденцій у динаміці біорізноманіття та стійкості екосистем. На прикладі ДП «Словечанський лісгосп АПК» встановлено, що поєднання систематичних спостережень за флорою і фауною з аналізом кумулятивних впливів створює умови для вироблення адаптивних екологоуправлінських заходів, спрямованих на збереження охоронних видів та природних угруповань. Таким чином, післяпроєктний моніторинг виступає ключовим механізмом не лише контролю, а й наукового супроводу ведення лісового господарства, який дозволяє зменшити ризики деградації екосистем та наблизити національну практику природокористування до стандартів ЄС.

Подальші наукові пошуки доцільно зосередити на удосконаленні методик кількісної оцінки впливів лісогосподарської діяльності на біорізноманіття та вивченні кумулятивних ефектів господарського і рекреаційного навантаження. Перспективним напрямом є застосування геоінформаційних технологій і дистанційного моніторингу для просторового аналізу змін лісових екосистем, а також дослідження ролі інвазійних видів і кліматичних змін у трансформації біотопів. Важливим завданням залишається оцінка ефективності природоохоронних заходів у межах Смарагдової мережі та пошук моделей інтеграції інтересів місцевих громад у систему управління лісовими ресурсами.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Конвенція про доступ до інформації, участь громадськості в процесі прийняття рішень та доступ до правосуддя з питань, що стосуються довкілля. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_015#Text (дата звернення: 01.08.2025 р.).
2. Конвенція про оцінку впливу на навколишнє середовище у транскордонному контексті. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_272#Text (дата звернення: 01.08.2025 р.).
3. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text> (дата звернення: 01.08.2025 р.).
4. Єндрюшка Є., Алексєєва Є., Скрильніков Д. Оцінка впливу на довкілля та участь громадськості: аналітичний порівняльний огляд європейського й українського законодавства та рекомендації щодо впровадження європейських стандартів в Україні. Львів : ЕПЛ, 2013. 96 с.
5. Шаравара В. В., Бондаренко О. О., Тарасова О. Г., Гаврилюк Р. Б., Гулевець Д. В., Савченко С. А. Впровадження оцінки впливу на довкілля в Україні: аналіз ризиків і перспектив (громадське бачення). *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2018. №2. С. 94–106. DOI: 10.31471/2415-3184-2018-2(18)-94-106.
6. Гоштинар С. Л. Правове регулювання екологічної оцінки впливу на довкілля як інституту управління природокористування. *Вісник ОНДІСЕ*. 2017. Вип. 1. С. 26–35.
7. Барна І. М. ОВД як механізм забезпечення екологічної безпеки. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія : Географія*. 2019. № 1. С. 217–225. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.19.2.27>
8. Барна І. М. Концепт оцінки впливу на довкілля через призму системного аналізу. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*. 2021. №51(2). С. 15–23. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.21.2.2>

9. Волкова А. О. Правові та організаційні засади оцінки впливу на довкілля. *Економіка та право*. 2021, № 3. С. 28–36. <https://doi.org/10.15407/econlaw.2021.03.028>
10. Єремєєва Н.В. Проблеми правового забезпечення оцінки впливу на довкілля. *Економіка та право*. 2017. № 1 (46). С. 54–60. <https://doi.org/10.15407/econlaw.2017.01.054>
11. Самойленко Ю. Удосконалення системи оцінки впливу на довкілля в контексті екологічного супроводу проєктів. *Економічний дискурс*. 2017. Вип. 3. С. 109–117.
12. Лісовий кодекс України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12> (дата звернення: 01.08.2025 р.).
13. Постанова «Про врегулювання питань щодо спеціального використання лісових ресурсів». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2007-%D0%BF#Text> (дата звернення: 01.08.2025 р.).
14. Закон України «Про дозвільну систему у сфері господарської діяльності». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2806-15#Text> (дата звернення: 01.08.2025 р.).
15. Методичні рекомендації з розробки звіту з оцінки впливу на довкілля в галузі лісового господарства. URL: https://eia.menr.gov.ua/upload/files/bakVgo9Va_.pdf (дата звернення: 05.08.2025 р.).
16. Єдиний реєстр з оцінки впливу на довкілля. URL: <https://eco.gov.ua/categories/e-ovd> (дата звернення: 15.08.2025 р.).
17. Звіт за результатами післяпроєктного моніторингу впливу на довкілля (2024 звітний рік) планової діяльності «Спеціальне використання лісових ресурсів у порядку проведення рубок головного користування та суцільних санітарних». URL: <https://surl.li/mehhmu> (дата звернення: 15.07.2025 р.).

REFERENCES:

1. Konventsiiia pro dostup do informatsii, uchast hromadskosti v protsesi pryiniattia rishen ta dostup do pravosudiva z pytan, shcho stosuetsia dovkillia (2005). [Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-Making and Access to Justice in Environmental Matters]. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_015#Text [in Ukrainian].
2. Konventsiiia pro otsinku vplyvu na navkolyshnie seredovyshe u transkordonnomu konteksti (2004). [Convention on Environmental Impact Assessment in a Transboundary Context]. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_272#Text [in Ukrainian].
3. Zakon Ukrainy «Pro otsinku vplyvu na dovkillia» (2017). [Law of Ukraine «On Environmental Impact Assessment»]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text> [in Ukrainian].
4. Iendroshka, Ye., Aleksiieva, Ye., Skrylnikov, D. (2013) Otsinka vplyvu na dovkillia ta uchast hromadskosti: analitychnyi porivnialnyi ohliad yevropeiskoho y ukrainskoho zakonodavstva ta rekomendatsii shchodo vprovadzhennia yevropeyskykh standartiv v Ukraini [Environmental Impact Assessment and Public Participation: Analytical Comparative Review of European and Ukrainian Legislation and Recommendations for the Implementation of European Standards in Ukraine]. Lviv : EPL, 96. [in Ukrainian].
5. Sharavara, V. V., Bondarenko, O. O., Tarasova, O. H., Havryliuk, R. B., Hulevets, D. V., & Savchenko, S. A. (2018). Vprovadzhennia otsinky vplyvu na dovkillia v Ukraini: analiz ryzykiv i perspektyv (hromadske bachennia) [Implementation of environmental impact assessment in Ukraine: risks analysis and perspectives (public vision)]. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia – Environmental safety and balanced resource use*, 2, 94–106. DOI: 10.31471/2415-3184-2018-2(18)-94-106 [in Ukrainian].
6. Hoshtynar, S. L. (2017) Pravove rehuliuвання ekolohichnoi otsinky vplyvu na dovkillia yak instytutu upravlinnia pryrodokorystuvannia [Legal regulation of environmental impact assessment as an institution of nature management]. *Visnyk ONDISE – ONDISE Bulletin*, 1, 26–35 [in Ukrainian].
7. Barna, I. M. (2019) OVD yak mekhanizm zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky [Eia (Environmental impact assessment) as a mechanism for ensuring environmental safety]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii : Heohrafiia – Scientific notes of the Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University. Series: Geography*, 1, 217–225. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.19.2.27> [in Ukrainian].
8. Barna, I. M. (2021) Kontsept otsinky vplyvu na dovkillia cherez pryzmu systemnoho analizu [The concept of environmental impact assessment from the perspective of systematic analysis]. *Naukovi zapysky Ternopilskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Serii : heohrafiia – Scientific notes of the Volodymyr Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University. Series: Geography*, 51(2), 15–23. <https://doi.org/10.25128/2519-4577.21.2.2> [in Ukrainian].
9. Volkova, A. O. (2021) Legal and organizational principles of assessing the impact of flooding on the environment [Legal and organizational basis of environmental impact assessment]. *Ekonomik ta pravo – Economics and law*, 3, 28–36 <https://doi.org/10.15407/econlaw.2021.03.028> [in Ukrainian].

10. Ieremieieva, N.V. (2017) Problemy pravovoho zabezpechennia otsinky vplyvu na dovkillia [Problems of legal maintenance of environmental impact assessment]. *Ekonomik ta pravo – Economics and law*, 1 (46), 54–60. <https://doi.org/10.15407/econlaw.2017.01.054> [in Ukrainian].
11. Samoilenko, Yu. (2017) Udoshkonalennia systemy otsinky vplyvu na dovkillia v konteksti ekolohichnoho suprovodu proektiv [Improving the system of environmental impact assessment in the context of environmental monitoring of projects]. *Ekonomichnyi dyskurs – Economic discourse*, 3, 109–117. [in Ukrainian].
12. Lisovyi kodeks Ukrainy (1994) [Forest Code of Ukraine]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12> [in Ukrainian].
13. Postanova «Pro vrehuliuvannia pytan shchodo spetsialnoho vykorystannia lisovykh resursiv» (2007) [On the settlement of issues related to the special use of forest resources]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2007-%D0%BF#Text> [in Ukrainian].
14. Zakon Ukrainy «Pro dozvilnu systemu u sferi hospodarskoi diialnosti» (2005) [On the permitting system in the sphere of economic activity]. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2806-15#Text> [in Ukrainian].
15. Metodychni rekomendatsii z rozrobky zvituz otsinky vplyvu na dovkillia v haluzi lisovoho hospodarstva (2020) [Methodological recommendations for developing an environmental impact assessment report in the forestry sector]. Retrieved from: https://eia.menr.gov.ua/upload/files/bakVgo9Va_.pdf [in Ukrainian].
16. Iedynyi reiestr z otsinky vplyvu na dovkillia [Unified Register of Environmental Impact Assessment]. Retrieved from: <https://eco.gov.ua/categories/e-ovd> [in Ukrainian].
17. Zvit za rezultatamy pisliaproiektnoho monitorynhu vplyvu na dovkillia (2024) planovoi diialnosti «Spetsialne vykorystannia lisovykh resursiv u poriadku provedennia rubok holovnoho korystuvannia ta sutsilnykh sanitarnykh». Retrieved from: <https://surl.li/mehhmu> [in Ukrainian].

Стаття надійшла: 25.08.2025

Прийнято: 03.09.2025

Опубліковано:

УДК 630*1(477.82)

DOI

Богдан ФЕНЬ

здобувач вищої освіти кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

Олена ДЖАМ

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Волинський національний університет імені Лесі Українки, пр. Волі, 13, м. Луцьк, Волинська обл., Україна, 43025

ORCID: 0000-0003-2222-3734

Бібліографічний опис статті: Фень, Б., Джам, О. (2025). Екологічні аспекти стану лісового фонду Ківерцівського надлісництва. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 90–95, doi:

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТАНУ ЛІСОВОГО ФОНДУ КІВЕРЦІВСЬКОГО НАДЛІСНИЦТВА

Сучасний стан екологічної безпеки в Україні та світі вимагає переосмислення підходів щодо використання природних ресурсів, зокрема, лісових. Ліси відіграють надзвичайно важливу роль у стабілізації клімату, збереженні біорізноманіття, водоохороні, рекреації а також у підтриманні сталого розвитку економіки. В умовах глобального потепління, посилення антропогенного тиску на довкілля та збільшення частоти природних катастроф особливого значення набуває проблема ефективного управління лісовими ресурсами, збереження та відновлення лісових екосистем.

Актуальність теми дослідження зумовлена низкою суперечностей: з одного боку, економічна вигода від лісокористування стимулює інтенсивну експлуатацію деревини, з іншого – екологічні наслідки надмірного вирубування спричиняють деградацію лісів, ерозію ґрунтів, зменшення запасів вологи тощо. Незважаючи на розробку багатьох нормативних документів, питання екологічної збалансованості лісокористування залишаються недостатньо вивченими в прикладному контексті окремих підприємств. Локальний аналіз лісового фонду з урахуванням динаміки рубок, лісовідновлення й зонування за функціональним призначенням висвітлений у науковій літературі недостатньо.

У роботі проведено дослідження структури та екологічних параметрів лісових ресурсів Ківерцівського надлісництва філії «Поліський лісовий офіс» державного спеціалізованого господарського підприємства «Ліси України», здійснено аналіз ведення лісового господарства на території досліджуваного регіону.

Структуровані дані щодо динаміки лісового фонду за категоріями лісових ділянок, поділу площ та запасів насаджень панівної породи сосни звичайної та дуба звичайного за класами віку.

Ключові слова: лісовий фонд, лісові ресурси, лісове господарство, екологічна оцінка.

Bogdan FEN

Higher Education Student at the Department of Ecology and Protection of Environment, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

Olena DZHAM

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Protection of Environment, Lesya Ukrainka Volyn National University, 13 Voli ave., Lutsk, Volyn region, Ukraine, 43025

ORCID: 0000-0003-2222-3734

To cite this article: Fen, B., Dzham, O. (2025). Ekologichni aspekty stanu lisovoho fondu Kivertsivskoho nadlisnytstva [Ecological aspects of the state of the forest fund of the Kivertsiv Forest District]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 90–95, doi:

© Б. Фень, О. Джам, 2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

ECOLOGICAL ASPECTS OF THE STATE OF THE FOREST FUND OF THE KIVERTSIV FOREST DISTRICT

The current state of environmental security in Ukraine and the world requires a rethinking of approaches to the use of natural resources, in particular, forest resources. Forests play an extremely important role in stabilizing the climate, preserving biodiversity, water protection, recreation, and in supporting sustainable economic development. In the context of global warming, increasing anthropogenic pressure on the environment, and increasing the frequency of natural disasters, the problem of effective management of forest resources, preservation and restoration of forest ecosystems is of particular importance.

The relevance of the research topic is due to a number of contradictions: on the one hand, the economic benefits from forest use stimulate intensive timber exploitation, on the other hand, the environmental consequences of excessive logging cause forest degradation, soil erosion, reduction of moisture reserves, etc. Despite the development of many regulatory documents, the issues of ecological balance of forest use remain insufficiently studied in the applied context of individual enterprises. Local analysis of the forest fund taking into account the dynamics of felling, reforestation and zoning by functional purpose is not sufficiently covered in the scientific literature.

The work conducted a study of the structure and ecological parameters of forest resources of the Kivertsiv Forestry Department of the Polissya Forest Office branch of the State Specialized Economic Enterprise "Forests of Ukraine", and an analysis of forestry management in the studied region was carried out.

Structured data on the dynamics of the forest fund by categories of forest plots, division of areas and stocks of stands of the dominant species of Scots pine and Scots oak by age classes.

Key words: forest fund, forest resources, forestry, ecological assessment.

Актуальність проблеми. Охорона лісів спрямована на забезпечення стабільності екологічних процесів в регіонах і оптимізацію порушених природних екосистем, на збереження генофонду рідкісних видів рослин і асоціацій, а також тваринного світу, на розвиток і вдосконалення рекреаційного використання територій. Наукове дослідження структури територій та їх місця і ролі у природно-ресурсному потенціалі є важливим і витікає з їх особливої цінності як середовищеформуєчих та природовідтворюючих природних комплексів, з високим рівнем ландшафтного та біологічного різноманіття.

Вирішити цю багатопланову проблему охорони навколишнього середовища можна тільки на основі довгострокового природоохоронного дослідження, вивчення кількісних і якісних змін в структурі природних екосистем і їх компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання моніторингу лісових екосистем описані у (Генсирук С. А., 2002; Медведев Ю., 20005; Рушак М., 2008; Свириденко В. С., 2008; Хрик В. М., 2021). Оцінка екологічного стану лісів України зроблена у (Джам О., 2024; Копій Л. І., 2002; Потапенко В. В., 2018; Юрченко М. В., 2004; Яценко В. О., 2010).

Метою дослідження є динаміка утримання лісового фонду, екологічний стан запасів деревостанів за панівними породами на території Ківерцівського надлісництва.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Ківерцівське надлісництво філії «Поліський лісовий офіс» державного спеціалізованого господарського підприємства «Ліси України» розташоване в західній частині Волинської області на території Луцького адміністративного району.

У таблиці 1 представлено поділ загальної площі лісового фонду Ківерцівського надлісництва за категоріями лісових ділянок, їх динаміка за ревізійний період.

Порівнюючи дані лісовпорядкування 2003–2012 рр. та 2013–2023 рр. щодо розподілу площі лісового фонду за категоріями лісових ділянок, які показані в таблиці 1, спостерігається загальне незначне зменшення площі земель лісового фонду постійного користування – з 33495,8 га до 33249,7 га, що становить зниження на 246,1 га або 0,9%. Це може свідчити про вилучення частини земель з лісового фонду або уточнення меж землекористування. Незважаючи на це, лісові ділянки залишаються основною частиною лісофонду, а їх частка навіть трохи зросла – з 94,0% до 94,4%.

В межах лісових ділянок стабільною залишилася частка вкритих лісовою рослинністю площ, яка практично не змінилася: 29922,1 га у період 2003–2012 рр. проти 29910,1 га у період 2013–2023 рр. Проте в їхній структурі помітно зменшилась площа лісових культур – на 951,9 га, або 6,6%. Це свідчить про зменшення площ штучного відновлення лісів, що може бути

наслідком зниження обсягів лісовідновлення або переведення культур у категорію природних насаджень.

Значна частка змін припадає на не вкриті лісовою рослинністю землі. Їх площа зменшилася на 56 га, або 3,6%. Найбільше скоротилися безімкнуті лісові культури – на 212,4 га, що свідчить про певну втрату молодих лісонасаджень або їхнє заростання й перехід до інших категорій. Водночас зросли площі, зайняті лісовими розсадниками (+4,6 га), підкошельками (+1,5 га), галявинами (+38,9 га) та лісовими інфраструктурними об'єктами, такими як просіки та протипожежні розриви (+96,7 га). Це може бути свідченням посиленої господарської діяльності у сфері лісової інфраструктури та забезпечення протипожежного захисту.

Категорія згарищ, загиблих насаджень і зрубів демонструє зниження на 78,6 га, що може бути як позитивним сигналом (успішна рекультивація), так і результатом переведення цих площ до інших категорій. Нелісові землі зменшилися на 178,1 га (або 8,7%), що також вказує на тенденцію до збільшення площ лісових угідь за рахунок раніше нелісових земель.

Таким чином, загальна структура лісового фонду зазнала певних змін упродовж ревізійного періоду. Незначне скорочення площі лісового фонду супроводжується стабільністю вкритих

лісом площ, але з певним зменшенням лісових культур. При цьому зростання площі інфраструктурних та спеціалізованих об'єктів свідчить про активізацію господарської діяльності та підвищення уваги до охорони й організації лісових територій.

У таблиці 2 показана динаміка поділу площі та запасів насаджень панівної породи сосни звичайної за класами віку.

Сосна звичайна продовжує залишатися провідною панівною породою в лісовому фонді. Загальна площа її насаджень за період між попереднім і теперішнім лісовпорядкуванням зросла на 584,7 га, а загальний запас деревини зріс на 413,45 тис. м³. Середній запас на 1 га також зріс з 276 до 303 м³, що свідчить про загальне покращення продуктивності соснових лісів. У молодих вікових класах (1–3) спостерігається зменшення площі насаджень. Наприклад, у першому класі площа зменшилась на 35,8 га, у другому – на 109,3 га, а в третьому – аж на 252,1 га. Разом молодняки втратили майже 400 га. Однак варто зазначити, що середній запас на 1 га залишився стабільним або зріс: у першому класі – на 3 м³/га, у другому – на 10 м³/га, що може свідчити про покращення догляду або природного приросту залишених ділянок. У третьому класі він зменшився лише на 1 м³/га, що не є критичним. Середньовікові

Таблиця 1

**Поділ загальної площі лісового фонду за категоріями лісових ділянок,
їх динаміка за ревізійний період**

Категорії лісових ділянок	Минулий період (2003–2012 рр.)		Теперішній період (2013–2023 рр.)		Зміни за минулий період	
	га	%	га	%	+ га	+ %
Площа земель лісового фонду постійного користування	33495,8	100,0	33249,7	100,0	-246,1	-0,9
Лісові ділянки – усього	31446,4	94,0	31378,4	94,4	-68,0	-0,4
у тому числі:						
вкриті лісовою рослинністю ділянки – усього	29922,1	89,5	29910,1	90,0	-12,0	-0,0
у них лісові культури	14523,1	43,4	13571,2	40,8	-951,9	-6,6
не вкриті лісовою рослинністю землі – разом	1524,3	4,5	1468,3	4,4	-56,0	-3,6
безімкнуті лісові культури	552,6	1,6	340,2	1,0	-212,4	-38,4
лісові розсадники плантації	43,6	0,1	48,2	0,1	4,6	10,6
підкошельки	1,0	0,0	2,5	0,0	1,5	150,0
згарища, загиблі насадження, зруби	353,4	1,1	275,8	0,8	-78,6	-22,2
галявини, біогалявини	354,6	1,1	393,5	1,2	38,9	11,0
лісові шляхи, просіки, протипожежні розриви	371,9	1,1	468,6	1,5	96,7	26,0
Нелісові землі	2049,4	6,0	1871,3	5,6	-178,1	-8,7

насаджень (класи 4-5) демонструють тенденцію до скорочення. Площа в цих класах загалом зменшилась на понад 700 га, а загальний запас зменшився майже на 154 тис. м³. У четвертому класі середній запас навіть зріс на 26 м³/га, але в п'ятому зменшився на 12 м³/га. Такі зміни можуть свідчити про вибіркові вирубки або про перехід насаджень у старші вікові класи. У класах 6 і 7, що характеризують стиглі насадження, спостерігається позитивна динаміка. Площа збільшилася на 357,6 га, загальний запас – на 205,52 тис. м³. Це вказує на стабільне накопичення біомаси в період найвищої продуктивності соснових насаджень. Середній запас на 1 га зріс на 25 м³ у класі 6 і на 20 м³ у класі 7, що свідчить про ефективне лісовирощування або добрий природний приріст. У перестійних класах (8–9) площі починають зменшуватися, зокрема в класі 8 – на 213 га, що може бути пов'язано з вилученням деревостанів через втрату господарського значення або старіння. Проте середній запас на 1 га у цих класах зростає, що вказує на накопичення біомаси за рахунок менших площ. Старовікові ліси (класи 10–16) демонструють змішані тенденції: деякі класи (наприклад, 10, 13, 15) додали в площі, інші втратили. Однак, показовим є стабільне зростання середнього запасу на 1 га майже у всіх

старших класах, що свідчить або про вищу точність обліку, або про збереження високопродуктивних залишків. Найбільший приріст середнього запасу спостерігається у 16 класі – на 75 м³/га. У підсумку можна сказати, що сосна звичайна як головна порода має позитивну динаміку: зростання площі, запасів і середньої продуктивності. Основна проблема – скорочення площ у молодших і середньовікових класах, що може вплинути на структуру лісів у майбутньому. Водночас, у стиглих і перестійних класах спостерігається стабільне накопичення деревини, що дає підстави говорити про ефективність ведення лісового господарства в цей період.

У таблиці 3 показана динаміка поділу площі та запасів насаджень панівної породи дуба звичайного за класами віку.

Аналіз динаміки зміни площі, запасу деревини та середнього запасу на 1 гектар за класами віку демонструє загальне зменшення площі насаджень при збільшенні середньої продуктивності лісів у розрізі вікових груп. Це може свідчити про оптимізацію структури лісового фонду, поступове вирубування старих насаджень і формування більш продуктивних молодих лісів. У першому класі віку спостерігається значне збільшення площі з 44,2 га до 140,2 га (+96 га),

Таблиця 2

Динаміка поділу площі та запасів насаджень панівної породи сосни звичайної за класами віку

Класи віку	Попереднє лісовпорядкування			Теперішнє лісовпорядкування			Зміни в абсолютних величинах		
	площа, га	загальний запас, тис. м ³	середній запас на 1 га, м ³	площа, га	загальний запас, тис. м ³	середній запас на 1 га, м ³	площа, га	загальний запас, тис. м ³	середній запас на 1 га, м ³
1	265,0	3,83	14	229,2	4,01	17	-35,8	0,18	3
2	392,3	16,66	42	501,6	26,20	52	109,3	9,54	10
3	654,2	31,24	48	402,1	18,87	47	-252,1	-12,37	-1
4	669,2	109,96	164	235,9	44,82	190	-433,3	-65,14	26
5	1815,8	468,32	258	1540,8	379,5	246	-275,0	-88,82	-12
6	2178,7	651,94	299	2475,3	801,02	324	296,6	149,08	25
7	1871,7	560,67	299	1932,7	617,11	319	61,0	56,44	20
8	1530,4	401,54	262	1317,4	375,60	285	-213,0	-25,94	23
9	1004,7	260,67	259	993,2	276,37	278	-11,5	15,70	19
10	780,7	217,34	278	826,6	246,64	298	45,9	29,30	20
11	512,1	153,5	300	456,6	138,7	304	-55,5	-14,8	4
12	183,2	62,55	341	151,3	52,75	349	-31,9	-9,8	8
13	82,5	25,4	308	84,9	29,7	350	2,4	4,3	42
14	33,5	9,3	278	30,4	10,5	345	-3,1	1,2	67
15	31,3	7,2	230	34,2	9,7	284	2,9	2,5	54
16	23,7	6,3	266	23,4	8,0	341	-0,3	1,7	75
Разом	8664,2	2392,65	276	9248,9	2806,10	303	584,7	413,45	27

Таблиця 3

Динаміка поділу площі та запасів насаджень панівної породи дуба звичайного за класами віку

Класи віку	Попереднє лісовпорядкування			Теперішнє лісовпорядкування			Зміни в абсолютних величинах		
	площа, га	загальний запас, тис. м ³	середній запас на 1 га, м ³	площа, га	загальний запас, тис. м ³	середній запас на 1 га, м ³	площа, га	загальний запас, тис. м ³	середній запас на 1 га, м ³
1	44,2	0,44	10	140,2	1,74	12	96	1,3	2
2	154,2	5,93	38	111,9	3,55	32	-42,3	-2,38	-6
3	241,5	18,64	77	114	9,84	86	-127,5	-8,8	9
4	559,1	69,58	124	134,5	18,15	135	-424,6	-51,43	11
5	1212,1	196,47	162	370,6	67,56	182	-841,5	-128,91	20
6	1663,5	321,15	193	1107,9	227,61	205	-555,6	-93,54	12
7	1995,6	415,61	208	1976	448,93	227	-19,6	33,32	19
8	1548,5	373,4	241	1513	359,83	238	-35,5	-13,57	-3
9	1210,6	302,13	250	1076,9	279,32	259	-133,7	-22,81	9
10	538,9	142,98	265	900,3	230,68	256	361,4	87,7	-9
11	317,3	89,59	282	322,8	87,33	271	5,5	2,26	-11
12	237,6	68,15	287	239,7	64,43	269	2,1	-3,72	-18
13	34,5	8,41	244	49,9	12,36	248	15,4	3,95	4
14	114,9	29,41	256	78,4	19,34	247	-36,5	-10,07	-9
15	76,6	19,36	253	86,4	19,42	225	9,8	0,06	-28
16	40,9	8,64	211	28	6,02	215	-12,9	-2,62	4
17	56,1	12,89	230	13,3	2,6	195	-42,8	-10,29	-35
18	75,6	16,82	222	98	22,67	231	22,4	5,85	9
19	31,3	7,21	230	42,1	7,94	189	10,8	0,73	-41
20	8,6	2,06	240	8,5	2,22	261	-0,1	0,16	21
Разом	10161,6	2108,87	208	8412,4	1891,54	225	-1749,2	-217,33	17

що свідчить про активне відновлення лісів або збільшення площ нових насаджень. При цьому середній запас на 1 га зріс лише незначно – з 10 до 12 м³, що відповідає раннім стадіям росту дерев. У наступних вікових класах (2–6) відбувається поступове зменшення як площі, так і загального запасу, що може вказувати на рубки стиглих насаджень або зміну методики обліку. Наприклад, у 5 класі площа зменшилась на 841,5 га, а запас – на 128,91 тис. м³. Водночас середній запас на 1 га підвищився з 162 до 182 м³, що говорить про більш продуктивні насадження, які залишилися. У середніх і старших вікових класах (7-12) спостерігається змішана динаміка. Наприклад, у 7 класі площа майже не змінилась (зменшення лише на 19,6 га), але запас зріс на 33,32 тис. м³, а середній запас на гектар піднявся з 208 до 227 м³. Подібна ситуація і в 10 класі: площа значно зросла (на 361,4 га), запас – на 87,7 тис. м³, хоча середній запас дещо знизився. Починаючи з 13 класу і вище, тенденція менш однозначна. Наприклад, у 17 класі площа скоротилась майже вчетверо (з 56,1 до 13,3 га), а середній запас знизився на 35 м³/га, що може свідчити про вирубку старих насаджень. Проте в деяких

класах (наприклад, 18, 20) площа і середній запас зростають, що вказує на збереження частини старших, якісних насаджень. У підсумку, загальна площа лісів зменшилась з 10161,6 до 8412,4 га, тобто на 1749,2 га. Загальний запас деревини також скоротився на 217,33 тис. м³. Проте середній запас на 1 га зріс із 208 до 225 м³/га. Це свідчить про якісне оновлення лісів, в якому менші за площею, але більш продуктивні насадження замінюють старі або неефективні ділянки.

Висновки та перспективи подальших досліджень. За результатами аналізу можна сказати про різноспрямовану, але в цілому логічну та обґрунтовану динаміку площі й запасів деревостанів за панівними породами упродовж ревізійного періоду. Всі породи реагують по-різному на господарське використання, природні чинники та умови зростання, однак помітною є загальна тенденція до оптимізації структури лісових насаджень – як за продуктивністю, так і за віковим складом.

Сосна звичайна зберігає лідерство серед порід: її площа і загальний запас зросли,

а середній запас на 1 га підвищився з 276 до 303 м³. Це свідчить про добру стратегію вирощування та стабільність соснових лісів. Найбільш продуктивними залишаються стиглі і перестійні класи, тоді як молодші вікові групи втрачають площі, що може викликати занепокоєння щодо відновлення лісу в майбутньому.

Дуб звичайний, натомість, демонструє стійкість: попри загальне зменшення площі, середній запас на гектар зріс із 208 до 225 м³. Це вказує на збереження високопродуктивних ділянок

і грамотну роботу з деревостаном у межах господарства.

Загальна тенденція полягає в тому, що лісовий фонд зазнав скорочення площ, але продуктивність збережених лісів покращується. Це може свідчити як про ефективне ведення лісового господарства, так і про селективне збереження найякісніших насаджень у межах обліку. У майбутньому важливим стане питання балансу між збереженням продуктивності та забезпеченням відновлення молодих лісів, щоб не допустити прогалин у віковій структурі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Генсирук С. А. Ліси України. Львів: РВВ НЛТУ України, 2002. 495 с.
2. Джам О., Дяк Т., Гулай Л., Караїм О., Лавринюк З. Моніторинг екологічного стану лісових ресурсів Філії “Рафалівське лісове господарство” ДП “Ліси України”. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. № 4. С. 49–56.
3. Копій Л. І. Оптимізація лісистості західного регіону України. Львів: Український видавничий інститут, 2002. 20 с.
4. Медведев Ю., Дяченко Я. Проблеми розвитку лісопромислового комплексу: пріоритети, структура, ефективність. К.: Вища школа, 2005. 244 с.
5. Потапенко В. В. Екологічні проблеми лісів Волинської області. Луцьк: Вежа, 2018. 245 с.
6. Рушак М. Ліси України: управління, експлуатація, відтворення. К.: Академія, 2008. 531 с.
7. Свириденко В. С. Лісівництво. К.: Арістей, 2005. 544 с.
8. Хрик В. М., Кімейчук І. В. Лісівництво. Біла Церква: Знання, 2021. 119 с.
9. Юрченко М. В. Екологічна політика в лісовому господарстві України. К.: Освіта, 2004. 188 с.
10. Яценко В. О. Оцінка впливу лісового господарства на навколишнє середовище. Харків: ХНАУ, 2010. 191 с.

REFERENCES:

1. Hensyruk, C. A. (2002). *Lisy Ukrainy [Forests of Ukraine]*. Lviv: RVV NLTU Ukrainy [in Ukrainian].
2. Dzham, O., Diak, T., Hulai, L., Karaim, O., Lavryniuk Z. (2024). Monitorynh ekolohichnoho stanu lisovykh resursiv Filii “Rafalivske lisove hospodarstvo” DP “Lisy Ukrainy” [Monitoring the ecological state of forest resources of the Rafaliv Forestry Branch of the State Enterprise Forests of Ukraine]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku*, 4, 49–56 [in Ukrainian].
3. Kopii, L. I. (2002). *Optymizatsiia lisystosti zakhidnoho rehionu Ukrainy [Optimization of forest cover in the western region of Ukraine]*. Lviv: Ukrainskyi vydavnychiy instytut [in Ukrainian].
4. Medvedev, Yu., & Diachenko, Ya. (2005). *Problemy rozvytku lisopromyslovoho kompleksu: pryorytety, struktura, efektyvnist [Problems of the development of the forestry complex: priorities, structure, efficiency]*. Kyiv: Vyshcha shkola [in Ukrainian].
5. Potapenko, V. V. (2018). *Ekolohichni problemy lisiv Volynskoi oblasti [Ecological problems of forests of Volyn region]*. Luts'k: Vezha [in Ukrainian].
6. Rushchak, M. (2008). *Lisy Ukrainy: upravlinnia, ekspluatatsiia, vidtvorennia [Forests of Ukraine: management, exploitation, reproduction]*. Kyiv: Akademiia [in Ukrainian].
7. Svyrydenko, V. S. (2005). *Lisivnytstvo [Forestry]*. Kyiv: Aristei [in Ukrainian].
8. Khryk, V. M., & Kimeichuk, I. V. (2021). *Lisivnytstvo [Forestry]*. Bila Tserkva: Znannia [in Ukrainian].
9. Yurchenko, M. V. (2004). *Ekolohichna polityka v lisovomu hospodarstvi Ukrainy [Environmental policy in forestry in Ukraine]*. Kyiv: Osvita [in Ukrainian].
10. Yatsenko, V. O. (2010). *Otsinka vplyvu lisovoho hospodarstva na navkolyshnie seredovyshche. [Assessment of the impact of forestry on the environment]*. Kharkiv: KhNAU [in Ukrainian].

Стаття надійшла: 19.08.2025

Прийнято: 09.09.2025

Опубліковано:

УДК 574.24:574.5:355.01

DOI

Ілля ЦИГАНЕНКО-ДЗЮБЕНКО

доктор філософії у галузі екології, доцент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0002-3240-8719

Вікторія МЕЛЬНИК-ШАМРАЙ

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, Україна, 10005

ORCID: 0000-0002-3551-5085

Бібліографічний опис статті: Циганенко-Дзюбенко, І., Мельник-Шамрай, В. (2025). Токсикологічні ризики лісовідновлення на територіях з боєприпасним забрудненням. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 96–105, doi:

**ТОКСИКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ЛІСОВІДНОВЛЕННЯ
НА ТЕРИТОРІЯХ З БОЄПРИПАСНИМ ЗАБРУДНЕННЯМ**

Оглядове дослідження токсикологічних ризиків лісовідновлення на територіях з боєприпасним забрудненням систематизує сучасні наукові знання про комплексні взаємодії між військовими забруднювачами та лісовими екосистемами в контексті російсько-української війни та міжнародного досвіду. Проаналізовано понад 160 публікацій з токсикології вибухових речовин, накопичення важких металів та екологічних бар'єрів відновлення лісів після військових дій. Систематизовано фітотоксичні ефекти основних вибухових речовин: тринітролуол (ТНТ) демонструє найвищу фітотоксичність з LC50 для проростків сосни звичайної 45 мг/л та спричиняє деградацію рослинних тканин на 26,8%, гексоген (RDX) та октоген (HMX) характеризуються зниженням життєздатності на 20,4% і 18,4% відповідно при вищій персистентності у ґрунтового середовищі. Узагальнено дані про накопичення важких металів від військової діяльності з критичними концентраціями свинцю до 1067 мг/кг у ґрунтах та 1495 мкг/л у підземних водах, що у 53 рази перевищує фонові значення та створює довгострокові геохімічні бар'єри для лісової регенерації протягом десятиліть. Розглянуто специфічні екологічні перешкоди відновлення лісів після російсько-української війни, включаючи 38589 гектарів пошкоджених лісових покривів у трьох регіонах протягом 2022 року, забруднення нерозірваними боєприпасами, каскадні порушення біогеохімічних циклів азоту та фосфору, деградацію мікоризних симбіозів та структурну вразливість монокультурних насаджень. Систематизовано міжнародний досвід біоремедіації з польовими випробуваннями генетично модифікованої просяної трави для деградації гексогену (швидкість очищення 27 кг/га протягом трьох років) та постконфліктними дослідженнями в Колумбії після мирної угоди ФАРК 2016 року, що виявили парадоксальне збільшення швидкості знеліснення на 177% після припинення військових дій. Розроблено концептуальну класифікацію військових забруднювачів за фітотоксичністю та персистентністю, матричну модель оцінки ризиків для різних типів лісових біогеоценозів та ієрархічну схему екологічних бар'єрів лісової сукцесії. Представлено комплексний алгоритм оцінювання біобезпеки лісовідновлювальних заходів за критеріями ризик-аналізу, що включає шість послідовних етапів від ідентифікації контамінантів до формування технічних рекомендацій щодо ремедіаційних заходів. Результати огляду демонструють критичну необхідність інтеграції токсикологічного аналізу з сучасними ремедіаційними технологіями та розвитку міждисциплінарних підходів військової екології для ефективного відновлення військово порушених лісових ландшафтів у післявоєнний період.

Ключові слова: лісові екосистеми, боєприпасне забруднення, фітотоксичність, важкі метали, лісовідновлення.

Illia TSYHANENKO-DZIUBENKO

Candidate of Economic Sciences, Associate Professor at the Department of Earth Sciences, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0002-3240-8719

Viktoriia MELNYK-SHAMRAI

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies, Zhytomyr Polytechnic State University, 103 Chudnivska str., Zhytomyr, Ukraine, 10005

ORCID: 0000-0002-3551-5085

To cite this article: Tsyhanenko-Dziubenko, I., Melnyk-Shamrai, V. (2025). Toksykologichni ryzyky lisovidnovlennia na terytoriakh z boieprypasnym zabrudnenniam [Toxicological risks of forest restoration on territories with ammunition contamination]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 96–105, doi:

TOXICOLOGICAL RISKS OF FOREST RESTORATION ON TERRITORIES WITH AMMUNITION CONTAMINATION

This review study of toxicological risks of forest restoration on territories with ammunition contamination systematizes current scientific knowledge about complex interactions between military contaminants and forest ecosystems in the context of the Russian-Ukrainian war and international experience. Over 160 publications on explosive compound toxicology, heavy metal accumulation, and ecological barriers to forest recovery after military actions were analyzed. Phytotoxic effects of major explosive compounds were systematized: trinitrotoluene (TNT) demonstrates highest phytotoxicity with LC50 for Scots pine seedlings of 45 mg/l and causes plant tissue degradation of 26.8%, while hexogen (RDX) and octogen (HMX) are characterized by viability reduction of 20.4% and 18.4% respectively with higher persistence in soil environment. Data on heavy metal accumulation from military activities were generalized, showing critical lead concentrations up to 1067 mg/kg in soils and 1495 µg/l in groundwater, which is 53 times higher than background values and creates long-term geochemical barriers for forest regeneration over decades. Specific ecological obstacles to forest recovery after the Russian-Ukrainian war were examined, including 38,589 hectares of damaged forest cover in three regions during 2022, contamination with unexploded ordnance, cascade disruptions of nitrogen and phosphorus biogeochemical cycles, degradation of mycorrhizal symbioses, and structural vulnerability of monoculture plantations. International bioremediation experience was systematized, including field trials of genetically modified switchgrass for hexogen degradation (remediation rate 27 kg/ha over three years) and post-conflict studies in Colombia after the 2016 FARC peace agreement, which revealed paradoxical increase in deforestation rate by 177% after cessation of military actions. A conceptual classification of military contaminants by phytotoxicity and persistence, matrix model for risk assessment for different types of forest biogeocenoses, and hierarchical scheme of ecological barriers to forest succession were developed. A comprehensive algorithm for assessing biosafety of forest restoration measures based on risk analysis criteria was presented, including six sequential stages from contaminant identification to technical recommendations formation for remediation measures. Review results demonstrate critical necessity of integrating toxicological analysis with modern remediation technologies and developing interdisciplinary approaches in military ecology for effective restoration of militarily disturbed forest landscapes in the post-war period.

Key words: forest ecosystems, ammunition contamination, phytotoxicity, heavy metals, forest restoration.

Актуальність. Дослідження токсикологічних ризиків лісовідновлення на територіях з боєприпасним забрудненням набуває критичної значущості в контексті російсько-української війни та зростаючої кількості військово порушених лісових ландшафтів у світі. Військова діяльність та бойові дії спричиняють мультифакторіальний деструктивний вплив на лісові екосистеми, призводячи до їх тотальної дегенерації та порушення екологічного гомеостазу через акумуляцію вибухових речовин, важких

металів та токсичних сполук у ґрунтових горизонтах. Інтенсивне застосування артилерійських систем, балістичних ракет, протитанкових засобів та інших видів боєприпасів призводить до масштабної емісії фітотоксичних полутантів, які через біогеохімічні цикли та кореневі системи потрапляють до лісових біоценозів, спричиняючи їх контамінацію, генотоксичні ефекти та екотоксикологічну деградацію деревостанів.

Метою дослідження є аналіз токсикологічних ризиків та бар'єрів лісовідновлення

на територіях з боєприпасним забрудненням у контексті російсько-української війни та визначення науково обґрунтованих підходів до ремедіації та відновлення уражених лісових екосистем.

Наукова новизна. Уперше проведено комплексний токсикологічний аналіз впливу боєприпасного забруднення на лісові екосистеми України в період 2022-2024 років з використанням інтегрального індексу екологічного ризику та молекулярних маркерів фітотоксичності. Виявлено специфічні геохімічні бар'єри та каскадні ефекти військових забруднювачів у лісових біоценозах зон активних бойових дій, розроблено алгоритм оцінювання біобезпеки лісовідновлювальних заходів за критеріями ризик-аналізу.

Практичне значення. Результати дослідження можуть бути використані для розробки комплексної стратегії зменшення токсикологічних ризиків лісовідновлення, вдосконалення протоколів оцінки біобезпеки лісогосподарських робіт на забруднених територіях та створення науково обґрунтованих рекомендацій щодо ремедіації військово порушених лісових ландшафтів у післявоєнний період. Сучасні дослідження впливу військових дій на лісові екосистеми демонструють складні взаємодії між забрудненням вибуховими речовинами, накопиченням важких металів та екологічними бар'єрами відновлення, що формують нові виклики для лісового господарства на постконфліктних територіях. Дослідження фітотоксичності військових забруднювачів виявили, що тринітротолуол, гексоген та октоген порушують метаболічні шляхи рослин на клітинному рівні, викликаючи деградацію на 26,8%, 20,4% та 18,4% відповідно у рослинних тканинах, спричиняючи вимірювані порушення флуоресценції хлорофілу та систем антиоксидантних ферментів (Yang et al., 2021). Водночас встановлено критичні взаємодії між концентраціями вибухових речовин у ґрунті та водним стресом, де умови посухи посилюють токсичність експлозивів у рослинних угрупованнях, при цьому рослини під водним стресом демонстрували знижену здатність переробляти гексоген, що призводило до вищих концентрацій у тканинах та більш серйозних фізіологічних впливів (Lance et al., 2020). Особливо важливим прорывом стали польові випробування

генетично модифікованої просіяної трави для деградації гексогену, що досягла швидкості очищення 27 кг на гектар протягом трьох років на військових об'єктах, представляючи значову демонстрацію біотехнологічних застосувань для ремедіації експлозивів на забруднених ландшафтах (Cary et al., 2021).

Забруднення важкими металами від військової діяльності створює стійкі зміни хімічного складу ґрунтів, що впливають на лісові угруповання десятиліттями після завершення воєн. Комплексний аналіз накопичення сурми, миш'яку, міді, свинцю та вольфраму від військових навчань показав, що міграція металів залишається обмеженою на артилерійських та ракетних полігонах, але створює тривалі порушення ґрунтової хімії, що довгостроково впливають на рослинні угруповання (Barker et al., 2021). Рівні забруднення досягають критичних значень 1067 мг/кг у ґрунтах та 349 мкг/л у водних системах, з забрудненням підземних вод до 1495 мкг/л у сильно уражених районах, демонструючи, як військове металеве забруднення створює каскадні ефекти через лісові екосистеми (Rahman et al., 2023).

Відновлення лісів після воєн стикається з множинними екологічними бар'єрами, що виходять за межі прямих військових пошкоджень. Аналіз 39 природоохоронних територій Колумбії після мирної угоди ФАРК 2016 року виявив парадоксальне збільшення швидкості знеліснення на 177% після припинення військових дій, що розкрило, як інституційна слабкість, незаконне захоплення земель та розширення вирощування коки створюють більш серйозні загрози для відновлення лісів, ніж активні військові дії (Clerici et al., 2020). Дослідження російсько-української війни задокументували 38589 гектарів пошкоджених війною лісових покривів у трьох регіонах протягом 2022 року, ідентифікуючи критичні бар'єри відновлення, включаючи забруднення нерозірваними боєприпасами, що перешкоджає лісогосподарській діяльності, підвищену пожежну небезпеку від пошкоджених війною ландшафтів та структурну вразливість монокультурних насаджень до каскадних порушень, виявляючи, що військові пошкодження створюють нові екосистемні стани, які протистоять традиційним суцесійним моделям (Matsala et al., 2024). Водночас продемонстровано, що природоохоронна

політика може підтримувати відновлення лісів навіть під час активних воєн в дослідженнях європейських науково-дослідних інститутів (Bilous et al., 2023).

Біогеохімічні порушення від військового забруднення поширюються за межі видимих пошкоджень, фундаментально змінюючи біогеохімічні цикли лісів через множинні шляхи. Синтез свідчень з понад 160 публікацій показав, що військова діяльність порушує циклювання поживних речовин через забруднення потенційно токсичними елементами, енергетичними сполуками та агентами хімічної зброї, при цьому аналіз виявив, що зміни ґрунтової хімії зберігаються десятиліттями після подій забруднення, створюючи спадкові ефекти на продуктивність лісів та видовий склад (Broomandi et al., 2020). Нещодавні екотоксикологічні дослідження ґрунтових організмів вивчили відповіді на військове забруднення, переглянувши 111 публікацій, зосереджених на мікробних угрупованнях, дощових червах та ґрунтових безхребетних, експонованих свинцю та енергетичним сполукам, демонструючи, що військове забруднення порушує фундаментальні ґрунтові процеси через вплив на організми-деструктори з каскадними ефектами на доступність поживних речовин та продуктивність лісів (Rodríguez-Seijo et al., 2024).

Сучасні дослідницькі тренди вказують на зростаюче визнання військової екології як окремої галузі, що потребує міждисциплінарних підходів, які поєднують токсикологію, лісову екологію та науку про відновлення. Російсько-українська війна прискорила дослідження екологічних впливів у реальному часі, тоді як постконфліктні дослідження в Колумбії та інших регіонах надають розуміння довгострокових моделей відновлення. Методологічні інновації виникають у застосуванні дистанційного зондування для оцінки забруднених ділянок з використанням супутникових знімків Sentinel та алгоритмів LandTrendr для картування забруднення та моніторингу відновлення. Однак значні прогалини в дослідженнях залишаються у розумінні довгострокових біогеохімічних впливів, розробці лісоспецифічних технологій ремедіації та створенні стратегій управління забрудненими лісовими ландшафтами. Сучасні дослідження виявляють, що військові впливи на лісові екосистеми створюють

нові екологічні виклики, що вимагають інноваційних рішень за межами традиційного лісового управління, при цьому інтеграція токсикології вибухових сполук, біогеохімії важких металів та відновлення екосистем представляє швидко розвинену галузь з прямими застосуваннями для післявоєнного екологічного відновлення.

Проблематика відновлення лісових екосистем на територіях, що зазнали впливу військових дій, характеризується складним комплексом взаємопов'язаних токсикологічних ризиків, які формують багаторівневу систему перешкод для природної та штучної регенерації деревостанів. Боеприпасне забруднення створює специфічні геохімічні умови, що кардинально змінюють біотичні та абіотичні компоненти лісових біоценозів, порушуючи фундаментальні процеси живлення рослин, ґрунтоутворення та біологічних циклів. Системний підхід до оцінки токсикологічних ризиків вимагає врахування як безпосередніх токсичних ефектів військових контамінантів, так і каскадних екологічних наслідків, що проявляються на різних рівнях організації біосистем – від молекулярно-клітинного до екосистемного рівня.

Класифікація військових забруднювачів за критеріями фітотоксичності та персистентності (Рис. 1) демонструє принципово різні підходи до оцінки ризиків лісовідновлення залежно від природи контамінантів. Сvineць, віднесений до першої категорії з низькою фітотоксичністю але високою персистентністю, характеризується здатністю до тривалого накопичення в ґрунтових горизонтах без прямого пригнічення ростових процесів у короткостроковій перспективі. Механізм його токсичної дії реалізується через поступове заміщення есенціальних металів у ферментативних системах, що призводить до хронічного стресу рослинного організму. Тринітротолуол (ТНТ) представляє протилежний тип ризику – високу гостру фітотоксичність при відносно швидкій деградації в ґрунтовому середовищі. Його нітрогрупи здатні порушувати процеси клітинного дихання та фотосинтезу, викликаючи некротичні ураження меристематичних тканин молодих рослин. Мідь займає проміжну позицію, демонструючи помірну фітотоксичність при швидкому розкладанні, що робить її менш критичною для довгострокових програм лісовідновлення. Кадмій

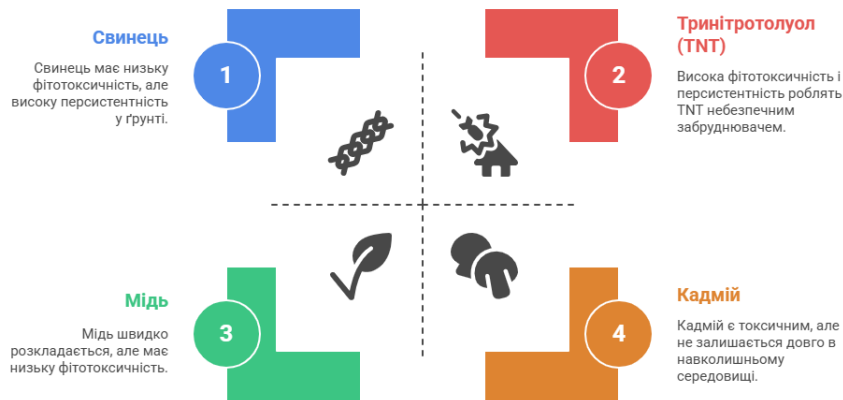


Рис. 1. Класифікація забруднювачів за фітотоксичністю та персистентністю



Рис. 2. Оцінка ризиків лісовідновлення на територіях з боєприпасним забрудненням

представляє найбільш небезпечну категорію контамінантів, поєднуючи високу токсичність з тривалою персистентністю в навколишньому середовищі, що вимагає спеціальних підходів до ремедіації перед початком лісовідновлювальних заходів.

Матрична модель оцінки ризиків (Рис. 2) ілюструє інтегральний підхід до прогнозування успішності лісовідновлення з урахуванням двох ключових параметрів: рівня забруднення території та інтенсивності впливу на екосистему. Квадрант низького ризику забруднення з великим впливом відображає ситуації, коли

незначні концентрації токсикантів можуть бути ефективно нейтралізовані природними буферними механізмами ґрунту та інтенсивними біогеохімічними процесами. Високий ризик забруднення з великим впливом характеризує критичні зони, де синергетична дія множинних стресорів створює каскадні ефекти деградації, що вимагають комплексних ремедіаційних заходів перед початком лісовідновлення. Зона низького ризику забруднення з малим впливом представляє оптимальні умови для природної сукцесії, де мінімальні інтервенції можуть забезпечити успішне відновлення лісових

біоценозів. Високий ризик забруднення з малим впливом відображає парадоксальні ситуації, коли локальні концентрації токсикантів не призводять до системних порушень екосистемних функцій, що може бути обумовлено специфічними едафічними умовами або природною резистентністю місцевих біоценозів.

Концептуальна модель екологічних бар'єрів (Рис. 3) демонструє послідовність перешкод, що перешкоджають природному відновленню лісових екосистем на військово порушених ландшафтах. Початковий стан порушеного ландшафту характеризується максимальною дестабілізацією всіх компонентів екосистеми, де домінуючими факторами є фізичні

порушення структури біотопу. Фізичні бар'єри включають механічні ушкодження ґрунтового покриву, ерозійні процеси та зміни мікрорельєфу, що створюють несприятливі умови для закріплення насіння та розвитку проростків. Хімічні бар'єри формуються внаслідок акумуляції токсичних сполук, зміни кислотно-лужних умов та порушення балансу поживних речовин, що безпосередньо впливає на фізіологічні процеси рослин. Біологічні бар'єри проявляються через порушення симбіотичних відносин, зокрема мікоризних асоціацій, та зниження активності ґрунтової мікрофлори, що є критичним для успішної колонізації території деревними видами. Екологічні бар'єри відображають

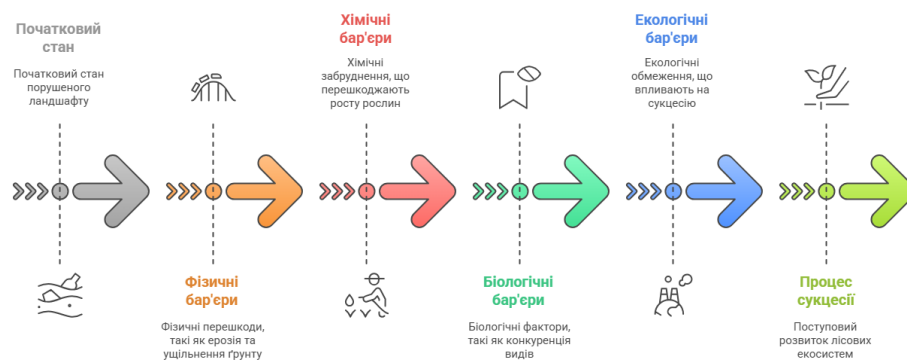


Рис. 3. Ієрархічна модель екологічних бар'єрів лісової сукцесії



Рис. 4. Досягнення лісової сукцесії на військово порушених ландшафтах

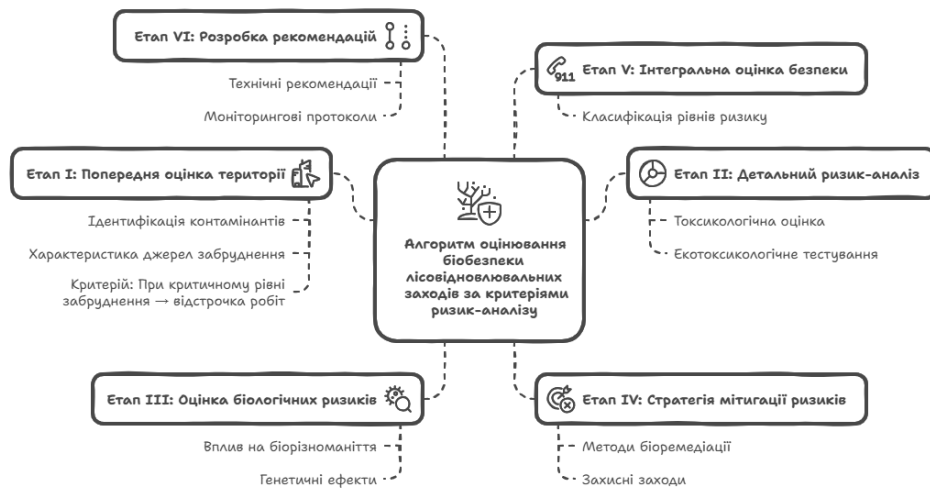


Рис. 5. Алгоритм оцінювання біобезпеки лісовідновлювальних заходів

системні порушення трофічних зв'язків та біо-геохімічних циклів, що перешкоджають формуванню стабільних біоценотичних структур. Завершальний етап – процес сукцесії – може бути досягнутий лише за умови поступового подолання всіх попередніх рівнів обмежень через природні або антропогенні механізми ремедіації.

Поетапна модель досягнення лісової сукцесії (Рис. 4) представляє структурований підхід до планування лісовідновлювальних заходів з урахуванням специфіки військово порушених територій. Перший етап – ідентифікація забруднювачів – передбачає комплексне обстеження території з використанням сучасних аналітичних методів для визначення видового складу, концентрацій та просторового розподілу токсикантів. Цей етап є фундаментальним для розробки подальшої стратегії ремедіації, оскільки різні типи забруднювачів вимагають специфічних підходів до нейтралізації. Другий етап – оцінка фітотоксичності – включає проведення біотестів на модельних рослинних об'єктах для визначення реального впливу забруднювачів на ростові процеси та виживаність рослин. Третій етап – розробка стратегій пом'якшення – передбачає вибір оптимальних методів ремедіації з урахуванням економічних та екологічних критеріїв ефективності. Четвертий етап – впровадження заходів – включає практичну реалізацію ремедіаційних технологій та початкові заходи з лісовідновлення. П'ятий етап – моніторинг прогресу – забезпечує контроль ефективності проведених заходів

та можливість корекції стратегії відновлення. Завершальний шостий етап – досягнення лісової сукцесії – характеризується формуванням стабільних лісових біоценозів з відновленими екосистемними функціями.

Алгоритмічна схема оцінювання біобезпеки (Рис. 5) інтегрує всі попередні компоненти аналізу в єдину систему прийняття рішень щодо можливості та доцільності проведення лісовідновлювальних заходів. Центральним елементом схеми є алгоритм оцінювання біобезпеки, який базується на критеріях ризик-аналізу та забезпечує систематичний підхід до оцінки всіх аспектів токсикологічної безпеки. Етап попередньої оцінки території включає ідентифікацію контамінантів та характеристику джерел забруднення, що формує базову інформаційну основу для подальшого аналізу. Детальний ризик-аналіз передбачає проведення токсикологічної оцінки та екотоксикологічного тестування для визначення реального рівня загроз для майбутніх лісових насаджень. Оцінка біологічних ризиків фокусується на аналізі впливу забруднювачів на біорізноманіття та генетичні ефекти, що можуть проявлятися в довгостроковій перспективі. Стратегія мітигації ризиків включає розробку методів біоре mediaції та планування захисних заходів для мінімізації негативного впливу токсикантів. Інтегральна оцінка безпеки передбачає класифікацію рівнів ризику на основі комплексного аналізу всіх факторів. Завершальний етап – розробка рекомендацій – включає формування технічних рекомендацій та моніторингових протоколів для забезпечення

довгострокової успішності лісовідновлювальних програм на забруднених територіях.

Висновки:

1. Токсикологічні ризики лісовідновлення на територіях з боєприпасним забрудненням формують багаторівневу систему перешкод, що вимагає комплексного підходу до оцінки та управління. Дослідження фітотоксичності вибухових речовин демонструють критичні порушення метаболічних шляхів рослин на клітинному рівні, з особливо високими ризиками для тринітротолуолу та гексогену у стресових умовах.

2. Забруднення важкими металами створює довгострокові геохімічні бар'єри, що впливають на лісові угруповання десятиліттями після завершення військових дій. Критичні концентрації металів у ґрунтах перевищують допустимі норми в десятки разів, формуючи каскадні ефекти через біогеохімічні цикли лісових екосистем.

3. Відновлення лісів після російсько-української війни стикається з новими типами

екологічних бар'єрів, включаючи забруднення нерозірваними боєприпасами та структурну вразливість монокультурних насаджень. Військові пошкодження створюють екосистемні стани, що протистоять традиційним суцесійним моделям.

4. Біогеохімічні порушення від військового забруднення поширюються за межі видимих пошкоджень, фундаментально змінюючи кругообіг поживних речовин та активність ґрунтових організмів. Ефекти військової контамінації зберігаються в екосистемах десятиліттями, створюючи спадкові впливи на продуктивність лісів.

5. Розроблений алгоритм оцінювання біобезпеки лісовідновлювальних заходів забезпечує науково обґрунтований підхід до прийняття рішень щодо можливості проведення лісогосподарських робіт на забруднених територіях. Інтеграція токсикологічного аналізу з ремедіаційними технологіями відкриває перспективи для ефективного відновлення військово порушених лісових ландшафтів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Barker A. J., Douglas T. A., Jacobson A. D., McCarter M. K., Barbato R. A., Thoms A. V., Walsh M. E. Environmental impact of metals resulting from military training activities: A review. *Chemosphere*. 2021. Vol. 265. Article 129059. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129059>
2. Bilous A., Matsala M., See L., Danylo O., Bilous S., Kovalevskyi S., Lesiv M. Forest management practices in post-conflict landscapes: A European perspective. *Forest Policy and Economics*. 2023. Vol. 148. Article 102891. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.102891>
3. Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12, No. 21. Article 9002. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219002>
4. Cary T. J., Rylott E. L., Bruce N. C., Baumann H. J., Baumann J. A., Snelson C. A., Zhang C. Field trial demonstrating phytoremediation of the military explosive RDX by XplA/XplB-expressing switchgrass. *Nature Biotechnology*. 2021. Vol. 39, No. 10. P. 1216–1219. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41587-021-00909-4>
5. Clerici N., Armenteras D., Kareiva P., Botero R., Ramírez-Delgado J. P., Forero-Medina G., Balch J. K. Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10, No. 1. Article 4971. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61861-y>
6. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 378–395. DOI: <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.070315>
7. Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Palii O. Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-7730/2025-16-1-4>
8. Lance A., Hogan S., Johnson K., Peng P., Valdes E., Jones A., Gao W. Multiple stressors in multiple species: Effects of different RDX soil concentrations and differential water-resourcing on RDX fate, plant health, and plant survival. *PLoS One*. 2020. Vol. 15, No. 6. Article e0234166. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234166>
9. Matsala M., Bilous A., See L., Danylo O., Kovalevskyi S., Bilous S., Lesiv M. War drives forest fire risks and highlights the need for more ecologically-sound forest management in post-war Ukraine. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, No. 1. Article 4811. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55253-7>
10. Rahman M. M., Singh K., Ahmed S., Thompson L., Wilson D. Heavy metal contamination assessment in military-impacted soils: A comprehensive analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2023. Vol. 195, No. 3. Article 412. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11025-3>

11. Rodríguez-Seijo A., Arenas-Lago D., Camps-Arbestain M., Arias-Estévez M., Vega F. A. Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review. *Biology and Fertility of Soils*. 2024. Vol. 60, No. 8. P. 835–851. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01842-8>
12. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, No. 4. P. 227–234. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.227>
13. Yang Q., Li Z., Zhang M., Wang W., Qi Y., He Y., Liu J. Analysis of the biodegradation and phytotoxicity mechanism of TNT, RDX, HMX in alfalfa (*Medicago sativa*). *Chemosphere*. 2021. Vol. 280. Article 130659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130659>
14. Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю. Екологічна оцінка впливу військових дій на гідромережу Київської області та стратегії відновлення водних екосистем. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2025. № 1 (499). С. 199–207. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2025.1\(499\).25](https://doi.org/10.15589/znp2025.1(499).25)
15. Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Хоменко С. В., Легенчук Р. В. Застосування багатовимірних статистичних методів для аналізу кліматичних проєкцій. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 26–33. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5925.2025.3.4>
16. Кірейцева Г. В., Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Хоменко С. В., Хрутьба В. О., Мазуркевич К. В. Інтеграція LST-індексів та сценаріїв RCP як інструмент прогнозування теплового режиму міст в умовах трансформаційних змін. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2024. № 6. С. 50–59. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-7714.2024.6.7>
17. Хом'як І. В., Брень А. Л., Медвідь О. В., Хом'як А. К., Максименко І. Ю. Динаміка рослинності суходолу та території кар'єрів як модель постмілітарного відновлення дикої природи. *Український журнал природничих наук*. 2023. Вип. 5. С. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.31675/2524-0463-2023-5-61-69>
18. Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Кірейцева Г. В., Герасимчук О. Л., Скиба Г. В., Хоменко С. В. Антропогенний вплив війни на водні ресурси: аналіз та потенційні шляхи відновлення. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. № 3. С. 51–59. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-9504.2024.3.7>
19. Циганенко-Дзюбенко І. Ю., Хом'як І. В., Кірейцева Г. В. Моделювання динаміки водних і прибережно-водних рослинних угруповань у пост-мілітарних умовах. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. Вип. 2. С. 26–37. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-9504.2023.2.4>

REFERENCES:

1. Barker, A. J., Douglas, T. A., Jacobson, A. D., McCarter, M. K., Barbato, R. A., Thoms, A. V., ... & Walsh, M. E. (2021). Environmental impact of metals resulting from military training activities: A review. *Chemosphere*, 265, 129059.
2. Bilous, A., Matsala, M., See, L., Danylo, O., Bilous, S., Kovalevskyi, S., ... & Lesiv, M. (2023). Forest management practices in post-conflict landscapes: A European perspective. *Forest Policy and Economics*, 148, 102891.
3. Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: A critical review. *Sustainability*, 12(21), 9002.
4. Cary, T. J., Rylott, E. L., Bruce, N. C., Baumann, H. J., Baumann, J. A., Snelson, C. A., ... & Zhang, C. (2021). Field trial demonstrating phytoremediation of the military explosive RDX by XplA/XplB-expressing switchgrass. *Nature Biotechnology*, 39(10), 1216-1219.
5. Clerici, N., Armenteras, D., Kareiva, P., Botero, R., Ramírez-Delgado, J. P., Forero-Medina, G., ... & Balch, J. K. (2020). Deforestation in Colombian protected areas increased during post-conflict periods. *Scientific Reports*, 10(1), 4971.
6. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 378-395
7. Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Palii O. Integral assessment of the effectiveness of water resource management in communities for sustainable development. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 27-38.
8. Lance, A., Hogan, S., Johnson, K., Peng, P., Valdes, E., Jones, A., ... & Gao, W. (2020). Multiple stressors in multiple species: Effects of different RDX soil concentrations and differential water-resourcing on RDX fate, plant health, and plant survival. *PLoS One*, 15(6), e0234166.
9. Matsala, M., Bilous, A., See, L., Danylo, O., Kovalevskyi, S., Bilous, S., ... & Lesiv, M. (2024). War drives forest fire risks and highlights the need for more ecologically-sound forest management in post-war Ukraine. *Scientific Reports*, 14(1), 4811.
10. Rahman, M. M., Singh, K., Ahmed, S., Thompson, L., & Wilson, D. (2023). Heavy metal contamination assessment in military-impacted soils: A comprehensive analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(3), 412.

11. Rodríguez-Seijo, A., Arenas-Lago, D., Camps-Arbestain, M., Arias-Estévez, M., & Vega, F. A. (2024). Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: An ecotoxicological review. *Biology and Fertility of Soils*, 60(8), 835–851.
12. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, No. 4. P. 227–234.
13. Yang, Q., Li, Z., Zhang, M., Wang, W., Qi, Y., He, Y., ... & Liu, J. (2021). Analysis of the biodegradation and phytotoxicity mechanism of TNT, RDX, HMX in alfalfa (*Medicago sativa*). *Chemosphere*, 280, 130659.
14. Kireitseva, H. V., Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu. (2025). Ekolohichna otsinka vplyvu viiskovykh dii na hidromerezh Kyivskoi oblasti ta stratehii vidnovlennia vodnykh ekosystem [Ecological assessment of the impact of military actions on the hydro network of the Kyiv region and strategies for restoring aquatic ecosystems]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admiral Makarova*, 1(499), 199–207.
15. Kireitseva, H. V., Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Khomenko, S. V., Lehenchuk, R. V. (2025). Zastosuvannia bahatovymirnykh statystychnykh metodiv dlia analizu klimat ychnykh proektsii [Application of multivariate statistical methods for the analysis of climate projections]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politehniki. Seriya: Tekhnichni nauky*, 3, 26–33.
16. Kireitseva, H. V., Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Khomenko, S. V., Khrutba, V. O., Mazurkevych, K. V. (2024). Intehratsiia LST-indeksiv ta stsenariiv RCP yak instrument prohnozuvannia teplovoho rezhymu mist v umovakh transformatsiinykh zmin [Integration of LST indices and RCP scenarios as a tool for forecasting the thermal regime of cities under transformational changes]. *Ekolohichna bezpeka ta tekhnolohii zakhystu dovkillia*, 6, 50–59.
17. Khomiak, I. V., Bren, A. L., Medvid, O. V., Khomiak, A. K., Maksymenko, I. Yu. (2023). Dynamika roslynnosti sukhodolu ta terytorii kar'ieriv yak model postmilitarnoho vidnovlennia dykoi pryrody [Dynamics of terrestrial and quarry vegetation as a model of post-military wildlife restoration]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychyykh nauk*, 5, 61–69.
18. Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Kireitseva, H. V., Herasymchuk, O. L., Skyba, H. V., Khomenko, S. V. (2024). Antropohennyi vplyv viiny na vodni resursy: analiz ta potensiini shliakhy vidnovlennia [Anthropogenic impact of war on water resources: Analysis and potential restoration paths]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku*, 3, 51–59.
19. Tsyhanenko-Dziubenko, I. Yu., Khomiak, I. V., Kireitseva, H. V. (2023). Modeliuvannia dynamiky vodnykh i pryberezhno-vodnykh roslynnykh uhrupovan u postmilitarnykh umovakh [Modeling the dynamics of aquatic and coastal-aquatic plant communities under post-military conditions]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku*, 2, 26–37.

Стаття надійшла: 15.08.2025

Прийнято: 25.08.2025

Опубліковано:

УДК 502/504

DOI

Ангеліна ЧУГАЙ

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, вул. Змієнка Всеволода, 2, м. Одеса, Україна, 65082

ORCID: 0000-0002-8091-8430

Оксана ЧЕРНЯКОВА

старший викладач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, вул. Змієнка Всеволода, 2, м. Одеса, Україна, 65082

ORCID: 0000-0002-5221-6001

Андрій МОЗГОВИЙ

доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, пр. Центральний, 3, м. Миколаїв, 54007

ORCID: 0000-0001-9315-169X

Марія СКАЛОЗУБ

здобувач вищої освіти, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, вул. Змієнка Всеволода, 2, м. Одеса, Україна, 65082

Бібліографічний опис статті: Чугай, А., Чернякова, О., Мозговий, А., Скалозуб, М. (2025). Оцінка стану повітряного басейну регіонів Західної України за показниками сталого розвитку. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 106–114, doi:

ОЦІНКА СТАНУ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ РЕГІОНІВ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ ЗА ПОКАЗНИКАМИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Оцінка техногенного навантаження на повітряний басейн є важливою задачею, яка набула ще більшої актуальності з початком повномасштабних військових дій на території України. Внаслідок цього за останні 3 роки в атмосферне повітря надійшла значна кількість шкідливих речовин і заподіяні значні збитки довкіллю. Територія Західної України порівняно з іншими регіонами України не характеризується високими показниками техногенного впливу на повітряний басейн. Більшість наукових публікацій присвячено оцінці транспортного навантаження на атмосферне повітря у західних областях. Метою роботи є оцінка стану повітряного басейну із застосуванням параметрів сталого розвитку. Для оцінки було використано параметри розрахунку індексу екологічного виміру метрики для вимірювання процесів сталого розвитку. Розрахунки виконані для двох категорій екологічної політики – Екологічні системи і Екологічне навантаження. Отримано, що територія Західної України у 2019–2023 рр. характеризувалась помірними показниками навантаження на повітряний басейн. У категорії «Екологічні системи» найгірші показники з позицій сталого розвитку відзначаються за вмістом діоксиду сірки. Найбільш напруженими областями за рівнем забруднення є Тернопільська і Хмельницька області. У категорії «Екологічне навантаження» найгірша ситуація відзначалась у Львівській, Рівненській і Тернопільській областях. Найкращі показники відзначались у Волинській і Чернівецькій областях. Висловлено припущення, що до областей з гіршими умовами можна віднести Івано-Франківську область. З урахуванням параметрів викидів від транспортних засобів, щільності викидів найгірші показники відзначаються у Рівненській, Тернопільській і Львівській областях, найкращі – у Чернівецькій. По параметрах викидів окремих забруднюючих речовин найгірші умови відзначались у Львівській області, найкращі – у Закарпатській. Параметри категорії «Екологічні системи» характеризуються гіршими показниками з позицій сталого розвитку.

Ключові слова: повітряний басейн, сталий розвиток, екологічні системи, екологічне навантаження, параметр.

Angelina CHUGAI

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Science and Environmental Protection, Odesa I.I. Mechnikov National University, 2 Zmiienska Vsevoloda str., Odesa, Ukraine, 65082
ORCID: 0000-0002-8091-8430

Oksana CHERNYAKOVA

Senior Lecturer at the Department of Environmental Science and Environmental Protection, Odesa I.I. Mechnikov National University, 2 Zmiienska Vsevoloda str., Odesa, Ukraine, 65082
ORCID: 0000-0002-5221-6001

Andriy MOZGOVYY

Associate Professor at the Department of Ecology and Environmental Technologies, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, 3 Tsentralnyi ave., Mykolaiv, 54007
ORCID: 0000-0001-9315-169X

Mariia SKALOZUB

Higher Education Student, Odesa I.I. Mechnikov National University, 2 Zmiienska Vsevoloda str., Odesa, Ukraine, 65082

To cite this article: Chugai, A., Chernyakova, O., Mozgovyy, A., Skalozub, M. (2025). Otsinka stanu povitrianoho basynu rehioniv Zakhidnoi Ukrainy za pokaznykamy staloho rozvytku [Assessment of the air basin state of the western Ukraine regions in conditions of sustainable development]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 106–114, doi:

ASSESSMENT OF THE AIR BASIN STATE OF THE WESTERN UKRAINE REGIONS IN CONDITIONS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

Assessing the technogenic load on the air basin is an important task that has become even more urgent since the outbreak of full-scale military operations in Ukraine. As a result, over the last 3 years, a significant amount of pollutants has been emitted into the air and significant environmental damage has been caused. The territory of Western Ukraine, compared to other regions of Ukraine, is not characterized by high indicators of technogenic impact on the air basin. Most scientific publications are focused on assessing the transport load on the atmospheric air in the western regions. The aim of the study is to assess the state of the air basin using the parameters of sustainable development. For the assessment, the parameters for calculating the environmental dimension index of the metric for measuring sustainable development processes were used. The calculations were made for two categories of environmental policy – Environmental Systems and Environmental Load. It was determined that the territory of Western Ukraine in 2019–2023 was characterized by moderate indicators of the air basin load. In the category “Environmental Systems”, the worst performance in terms of sustainable development is recorded for sulfur dioxide. Ternopil and Khmelnytsky regions are the most pressured regions in pollution levels. The worst situation in the category “Environmental Load” was registered in Lviv, Rivne and Ternopil regions. The best indicators were registered in Volyn and Chernivtsi regions. It has been suggested that Ivano-Frankivsk region may be among the regions with the worst conditions. In terms of transport emissions and emission density, the worst indicators were registered in Rivne, Ternopil, and Lviv regions, and the best in Chernivtsi. In terms of emissions of certain pollutants, the worst conditions were registered in Lviv region, and the best in Zakarpattia region. The parameters of the “Environmental Systems” category are characterized by the worst indicators in terms of sustainable development.

Key words: air basin, sustainable development, environmental systems, environmental load, parameter.

Вступ. Оцінка техногенного навантаження на складові довкілля, в тому числі і на повітряний басейн, є важливою задачею, яка набула ще більшої актуальності з початком повномасштабного вторгнення росії в Україну. За останні 3 роки в атмосферне повітря надійшла значна кількість шкідливих речовин внаслідок різних процесів – ведення бойових дій в більшості

регіонів України, знищення різних видів ворожої бойової техніки та ін. Розміри збитків, які заподіяні навколишньому середовищу, за оцінками різних експертів, науковців, державних службовців є дуже великими.

Слід відзначити, що територія Західної України серед інших областей в цілому не характеризується високими показниками

техногенного впливу на повітряний басейн. За даними Центральної геофізичної обсерваторії імені Б. Срезневського у 2024 р. До десятки найбільш забруднених міст з переліку західних областей увійшли м. Львів і м. Луцьк (*KI3A* відповідно складало 8,9 і 8,6) (*Огляд стану...*, 2025).

Останні наукові публікації щодо оцінки рівня забруднення та техногенного навантаження на повітряний басейн даної території були присвячені оцінці впливу транспортної галузі. Так, у роботі (Кузик та ін., 2024) розглянуто вплив автомобільного транспорту на формування загального рівня забруднення атмосферного повітря у м. Львів. За оцінками, виконаними раніше, даний вид джерел переважним для Львова, а також для більшості областей Західної України (Chugai et al, 2025). Також у роботі (Стецько, 2019) розглянуто питання транспортного навантаження на повітряний басейн Тернопільської області. Також окремі результати оцінки стану і якості повітряного басейну регіонів Західної України наведені у роботі (Chugai et al, 2023).

Матеріали і методи досліджень. Метою роботи є оцінка стану повітряного басейну із застосуванням параметрів сталого розвитку (СР). Як відомо, СР передбачає досягнення

17 цілей (17 цілей..., 2025), серед яких виділяються ціль 3 «Міцне здоров'я», ціль 11 «Сталий розвиток міст і громад» і ціль 13 «Боротьба зі зміною клімату». Саме ці цілі безпосередньо пов'язані в тому числі з питаннями забруднення атмосферного повітря, що підкреслює актуальність дослідження.

В якості вихідних даних для розрахунків використані матеріали Регіональних доповідей про стан навколишнього природного середовища по окремих областях Західної України у період 2019–2023 рр. (Регіональна доповідь... Волинської області..., 2024; Доповідь... Закарпатської області..., 2024; Регіональна доповідь... Івано-Франківській області..., 2024; Щорічна доповідь..., 2024; Доповідь... Рівненській області..., 2024; Регіональна доповідь..., 2023; Стан..., 2024; Регіональна доповідь... Тернопільській області..., 2024).

Для оцінки стану повітряного басейну на засадах сталого розвитку було використано метрику для вимірювання процесів сталого розвитку (Сталий розвиток..., 2025). Згідно з методикою визначаються три індекси, в тому числі індекс екологічного виміру (*I_e*), який визначається з урахуванням трьох категорій екологічної політики:

Таблиця 1

**Оцінка стану повітряного басейну регіонів Західної України
за параметрами сталого розвитку у 2019–2023 рр.**

Параметр	Волинська обл.	Закарпатська обл.	Івано-Франківська обл.	Львівська обл.	Рівненська обл.	Тернопільська обл.	Хмельницька обл.	Чернівецька обл.
Категорія «Екологічні системи»								
Середні концентрації діоксиду азоту (<i>I_{NO2}</i>)	0,57	0,4	0,24	0,43	0,51	0,8	0,49	0,49
Середні концентрації діоксиду сірки (<i>I_{SO2}</i>)	0,6	0,69	0,56	0,48	0,25	0,44	0,65	0,4
Середні концентрації пилу (<i>I_{TSP}</i>)	0,36	0,49	0,44	0,53	0,4	0,42	0,64	0,53
Категорія «Екологічне навантаження»								
Викиди оксидів азоту (<i>I_{NOX}</i>)	–	0,44	0,41	0,5	0,49	–	0,5	–
Викиди діоксиду сірки (<i>I_{SOT}</i>)	–	0,4	0,37	0,47	0,37	–	0,5	–
Викиди летких органічних сполук (<i>I_{VOC}</i>)	–	0,2	0,42	0,63	–	–	–	–
Викиди ЗР від автомобільного транспорту (<i>I_{CAR}</i>)	0,49	0,56	0,32	0,6	0,59	0,57	0,56	0,38
Викиди у розрахунку на 1 км ² (<i>I_{EKM}</i>)	0,3	0,53	0,5	0,54	0,65	0,5	0,57	0,25
Викиди у розрахунку на 1 особу (<i>I_{EPC}</i>)	0,46	0,47	–	0,56	0,65	0,67	0,53	0,43

- 1) екологічні системи (I_{SYS});
- 2) екологічне навантаження (I_{STR});
- 3) регіональне екологічне керування (I_{REG}).

Ці категорії містять 13 індикаторів і 44 показники (Сталий розвиток..., 2025).

З урахуванням фізичної сутності кожного з параметрів вихідні дані були приведені до значень від 0 до 1 із застосуванням принципу лінійного нормування:

$$\tilde{x}_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}. \quad (1)$$

Результати дослідження та їх обговорення.

Для оцінки були використані дані, які дозволяють розрахувати окремі параметри в двох категоріях екологічної політики – Екологічні системи і Екологічне навантаження. Результати розрахунків наведені у табл. 1.

Аналіз представленої таблиці показав, що в цілому територія Західної України характеризувалась у 2019–2023 рр. помірними показниками навантаження на повітряний басейн за параметрами СР. Мінімальні (умовно $\leq 0,3$)

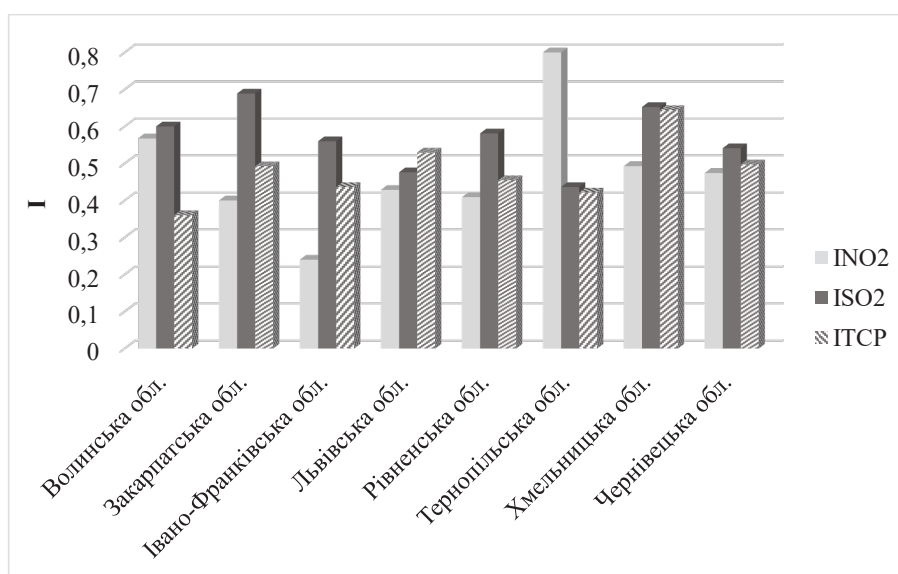


Рис. 1. Значення параметрів СР для повітряного басейну регіонів Західної України в категорії «Екологічні системи» (I_{SYS})

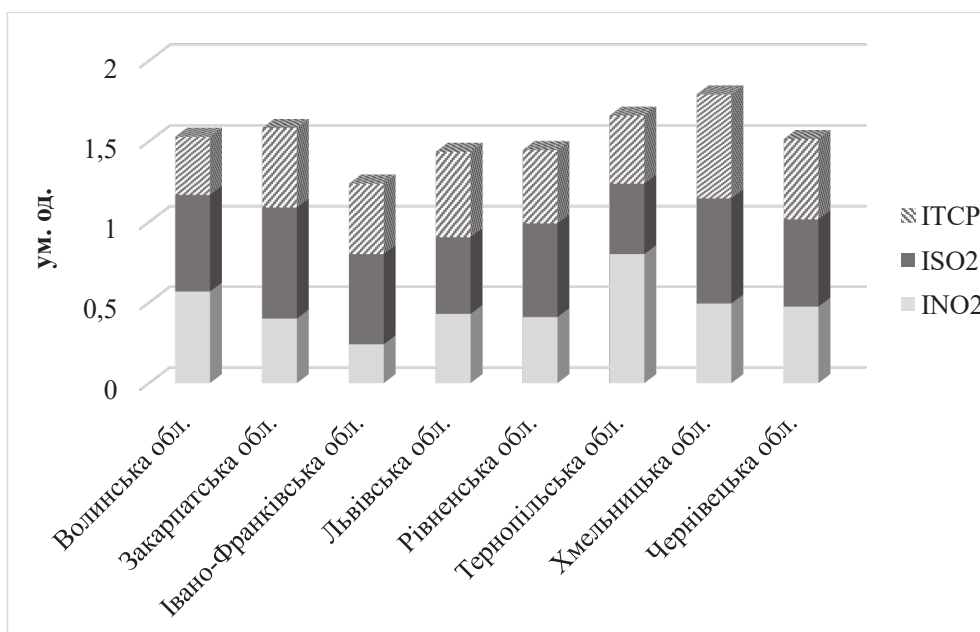


Рис. 2. Накопичена діаграма параметрів СР для повітряного басейну регіонів Західної України в категорії «Екологічні системи» (I_{SYS})

і максимальні (умовно $\geq 0,8$) значення відзначались лише по окремих параметрах.

Цікавим є детальний аналіз зміни параметрів СР по окремих категоріям екологічної політики в окремих областях Західної України.

На рис. 1 наведено динаміку зміни параметрів СР в категорії «Екологічні системи» (I_{SYS}). Як видно, індикатор «повітря» I_{AIR} за період дослідження був представлений всіма

параметрами. Слід відзначити, що у переважній більшості областей найгірші показники з позицій СР відзначаються за вмістом діоксиду сірки. Вміст діоксиду азоту і пилу не має загальних тенденцій розподілу. За вмістом діоксиду азоту гірші показники відзначались у Волинській, Тернопільській і Чернівецькій областях, за вмістом пилу – у Львівській, Хмельницькій і Чернівецькій областях.

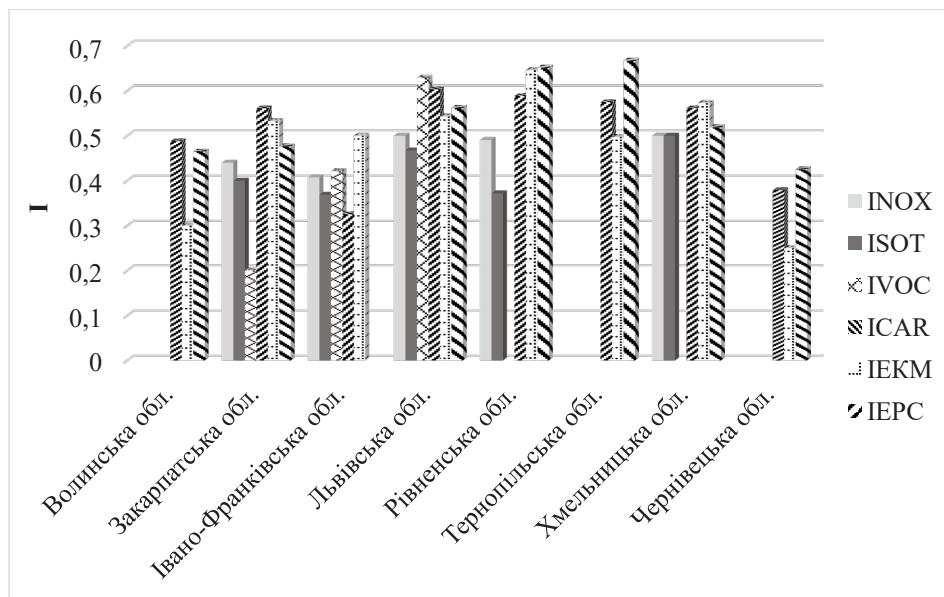


Рис. 3. Значення параметрів СР для повітряного басейну регіонів Західної України в категорії «Екологічне навантаження» (I_{STR})

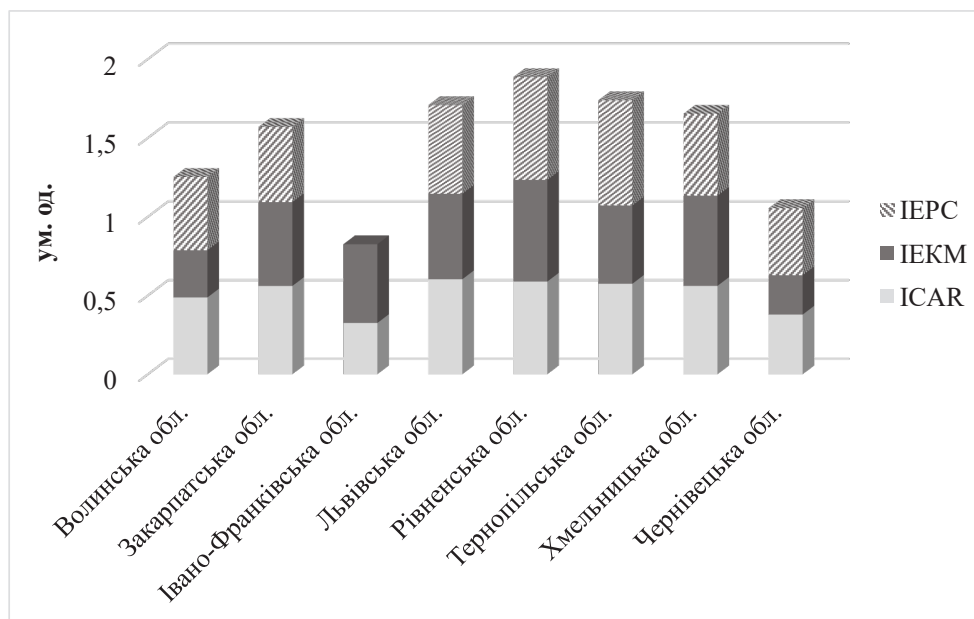


Рис. 4. Накопичена діаграма параметрів СР для повітряного басейну регіонів Західної України (викиди від транспорту, щільність викидів) в категорії «Екологічне навантаження» (I_{STR})

Аналіз накопиченої діаграми в цій категорії (рис. 2) показав, що найбільш напруженими областями за рівнем забруднення є Тернопільська і Хмельницька області. Також Волинська, Закарпатська і Чернівецька області характеризуються гіршими сумарними показниками забруднення з позицій СР.

При аналізі показників СР в категорії «Екологічне навантаження» (I_{STR}) з 6 параметрів, які аналізувались, інформація дуже різнилась. Практично

постійно були дані щодо викидів забруднюючих речовин (ЗР) від автомобільного транспорту, а також щільність викидів на площу регіону (1 км^2) і щільність населення (1 особа). Вказані два останні параметри іноді виключали обсяги викидів ЗР від пересувних джерел. Проте обмеженими були дані щодо викидів окремих ЗР у повітряний басейн на території Західної України.

На рис. 3 наведено відомості щодо динаміки зміни окремих параметрів СР в категорії

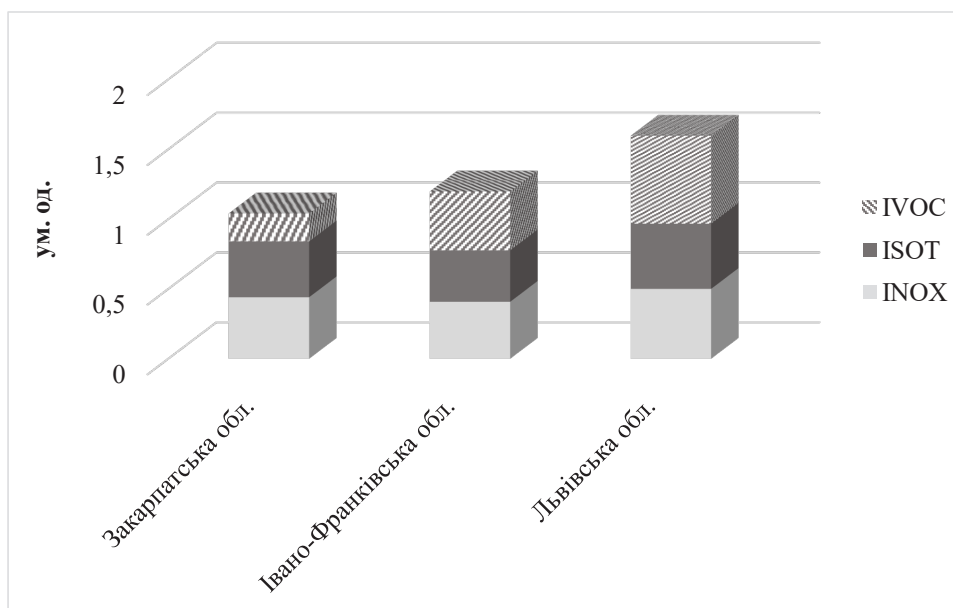


Рис. 5. Накопичена діаграма параметрів СР для повітряного басейну регіонів Західної України (викиди окремих ЗР) в категорії «Екологічне навантаження» (I_{STR})

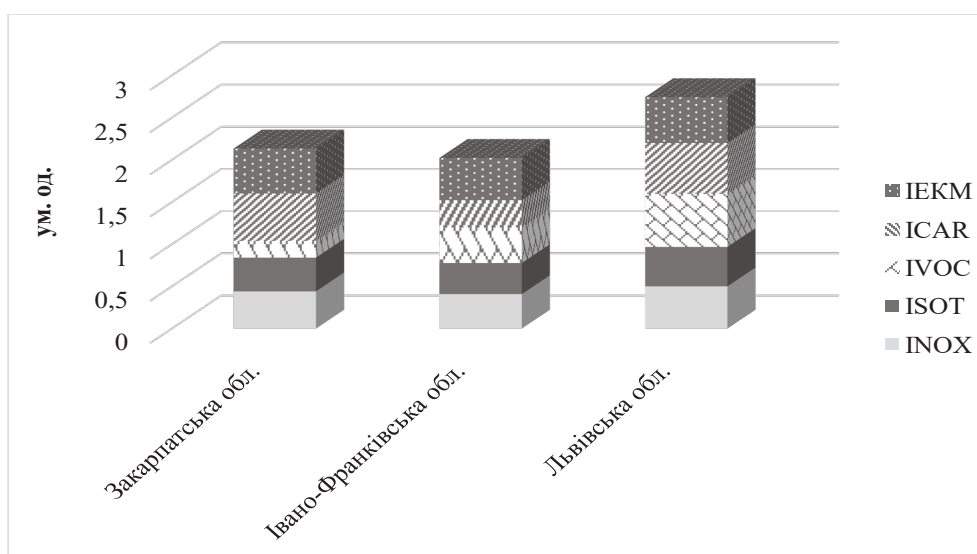


Рис. 6. Накопичена діаграма параметрів СР для повітряного басейну окремих регіонів Західної України в категорії «Екологічне навантаження» (I_{STR})

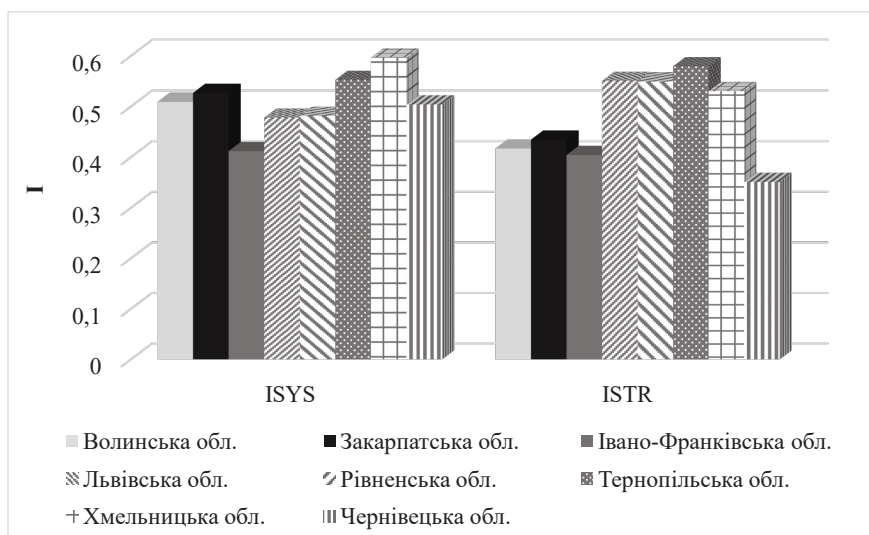


Рис. 7. Параметри СР для повітряного басейну регіонів Західної України

«Екологічне навантаження». Загальний аналіз показує, що найгірша ситуація відзначалась у Львівській, Рівненській і Тернопільській областях. У даних регіонах максимальними були параметри викидів від автомобільного транспорту, а також відносні показники викидів ЗР на площу території і щільність населення. Найкращі показники, які на жаль несуттєво відрізняються від показників у вказаних вище областях, відзначались у Волинській і Чернівецькій областях.

Враховуючи відсутність даних по окремих параметрах в категорії «Екологічне навантаження», було проаналізовано декілька накопичених діаграм (рис. 4–6).

Як видно з рис. 4, з урахуванням параметрів викидів від транспортних засобів, а також щільності викидів найгірші показники з позицій СР відзначаються у Рівненській, Тернопільській і Львівській областях. Слід відзначити, що для Івано-Франківської області була відсутня інформація щодо щільності викидів з урахуванням населення регіону. Враховуючи, що регіон є досить промислово напруженим на території дослідження, можна припустити, що ця область також характеризується гіршими показниками СР. Найкращі умови відзначались у Чернівецькій області.

Інформація щодо викидів окремих ЗР була наявна лише для трьох областей (рис. 5). З рисунку видно, що найгірші умови відзначались у Львівській області, найкращі – у Закарпатській.

Узагальнення щодо параметрів СР в категорії «Екологічне навантаження» було виконано

також лише для трьох областей Західної України (рис. 6). З представленого рисунку видно, що найгірші умови з позицій СР в цій категорії відзначались для Львівської області. Закарпатська та Івано-Франківська області характеризуються порівняними значеннями сумарних показників.

Порівняння окремих параметрів СР в двох категоріях екологічної політики наведено на рис. 7. Так, параметри категорії «Екологічні системи» в цілому характеризуються гіршими показниками з позицій СР. Проте слід ще раз зауважити, що інформація для розрахунку параметрів в категорії «Екологічне навантаження» була значно обмеженою, що могло вплинути на кінцевий результат.

Висновки. У роботі виконано оцінку стану повітряного басейну регіонів Західної України із застосуванням параметрів сталого розвитку. В результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Територія Західної України у 2019–2023 рр. характеризувалась помірними показниками навантаження на повітряний басейн. Мінімальні і максимальні значення відзначались лише по окремих параметрах.

2. У категорії «Екологічні системи» найгірші показники з позицій СР відзначаються за вмістом діоксиду сірки. Найбільш напруженими областями за рівнем забруднення є Тернопільська і Хмельницька області.

3. У категорії «Екологічне навантаження» найгірша ситуація відзначалась у Львівській,

Рівненській і Тернопільській областях. Найкращі показники відзначались у Волинській і Чернівецькій областях.

4. З урахуванням параметрів викидів від транспортних засобів, щільності викидів найгірші показники з позицій СР відзначаються у Рівненській, Тернопільській і Львівській областях. Для Івано-Франківської області була відсутня інформація щодо щільності викидів з урахуванням населення регіону. Можна припустити, що ця область також характеризується гіршими показниками СР. Найкращі умови відзначались у Чернівецькій області. По параметрах викидів окремих ЗР (3 області з 8) найгірші умови відзначались у Львівській області, найкращі – у Закарпатській.

5. У категорії «Екологічне навантаження» за даними аналізу по трьох областях найгірші умови з позицій СР відзначались для Львівської області. Закарпатська та Івано-Франківська області характеризуються порівняними значеннями сумарних показників.

6. Параметри категорії «Екологічні системи» в цілому характеризуються гіршими показниками з позицій СР.

Так, за результатами проведеного дослідження встановлено, що більшість регіонів Західної України характеризуються помірним рівнем техногенного навантаження на повітряний басейн. Отримані результати можуть бути використані для розробки ефективних природоохоронних заходів для відновлення довкілля повоєнної України.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України у 2024 році. Київ, 2025. 58 с. URL: http://www.cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/images/%D0%9E%D0%93%D0%9B%D0%AF%D0%94_2024_%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BD%D1%82doc_1-%D1%81%D0%B6%D0%B0%D1%82%D1%8B%D0%B9.pdf (дата звернення: 27.06.2025).
2. Кузик А.Д., Думас І.З., Олійник О.Т. Забруднення атмосферного повітря автомобільним транспортом на в'їздах до м. Львова. *Вісник ЛДУБЖД*. 2024. № 29. С. 12–23. doi: 10.32447/20784643.29.2024.02.
3. Chugai A., Nedostrellov M., Lutek W. Assessment of technogenic load on the air basin of the Western Ukraine Regions. *Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, Number 2. P. 97–103. doi: 10.23939/ep2025.02.104.
4. Стецько Н. Транспортне техногенне навантаження на повітряне середовище в Тернопільській області. *Вісник Тернопільського відділу Українського географічного товариства*. 2019. № 3. С. 31–40.
5. Chugai A., Nedostrellov M., Bratov K. Condition and quality of the air of the Chernivtsi region. *Environmental problems*. 2023. Vol. 8, Number 3. P. 133–141. doi: 10.23939/ep2023.03.133.
6. 17 цілей сталого розвитку. URL: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/> (дата звернення: 28.06.2025).
7. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Волинській області за 2023 рік. Луцьк, 2024. 203 с.
8. Доповідь про стан навколишнього природного середовища Закарпатської області за 2023 рік. Ужгород, 2024. 148 с.
9. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Івано-Франківській області за 2023 рік. Івано-Франківськ, 2024. 134 с.
10. Щорічна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Львівській області в 2023 році. Львів, 2024. 268 с.
11. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Рівненській області у 2023 році. Рівне, 2024. 230 с.
12. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища у Чернівецькій області за 2022 рік. Чернівці, 2023. 199 с.
13. Стан навколишнього природного середовища Хмельницької області у 2023 році. Хмельницький, 2024. 233 с.
14. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Тернопільській області у 2023 році. Тернопіль, 2024. 306 с.
15. Сталий розвиток регіонів України. URL: http://nung.edu.ua/files/attachments/stalyy_rozvytok_regioniv_ukrayiny.pdf (дата звернення: 15.05.2025).

REFERENCES:

1. Ohliad stanu zabrudnennia navkolyshnoho pryrodnoho seredovysheha na terytorii Ukrainy u 2024 rotsi. (2025). [Review of the state of environmental pollution in Ukraine in 2024]. Kyiv. Retrieved from: http://www.cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/images/%D0%9E%D0%93%D0%9B%D0%AF%D0%94_2024_%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B2%D0%B0%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BD%D1%82doc_1-%D1%81%D0%B6%D0%B0%D1%82%D1%8B%D0%B9.pdf. [in Ukrainian]

2. Kuzyk, A.D., Dumas, I.Z., & Oliinyk, O.T. (2024). Zabrudnennia atmosferneho povitria avtomobilnym transportom na vyzdakh do m. Lvova [Atmospheric air pollution by vehicle transport at the entrances to Lviv]. *Visnyk LDUBZhD – Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 29, 12–23. doi: 10.32447/20784643.29.2024.02 [in Ukrainian]
3. Chugai, A., Nedostrelov, M., & Lutek, W. (2025). Assessment of technogenic load on the air basin of the Western Ukraine Regions. *Environmental Problem*, 10 (2), 97–103. doi: 10.23939/ep2025.02.104.
4. Stetsko, N. (2019). Transportne tekhnohenne navantazhennia na povitriane seredovyshche v Ternopilskii oblasti [Transport technogenic load on air environment in the Ternopil region]. *Visnyk Ternopilskoho viddilu Ukrainskoho heohrafichnoho tovarystva – Bulletin of the Ternopil Department of the Ukrainian Geographical Society*, 3, 31–40. [in Ukrainian]
5. Chugai, A., Nedostrelov, M., Bratov, K. (2023). Condition and quality of the air of the Chernivtsi region. *Environmental problems*, 8 (3), 133–141. doi: 10.23939/ep2023.03.133.
6. 17 tsilei staloho rozvytku. (2025). [17 sustainable development goals]. Retrieved from: <https://globalcompact.org.ua/tsili-stijkogo-rozvytku/>. [in Ukrainian]
7. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha u Volynskii oblasti za 2023 rik. (2024). [Regional report on the state of the environment in the Volyn region for 2023]. Lutsk. [in Ukrainian]
8. Dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha Zakarpatskoi oblasti za 2023 rik. (2024). [Report on the state of the environment in Zakarpattia region for 2023]. Uzhhorod. [in Ukrainian]
9. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ivano-Frankivskii oblasti za 2023 rik. (2024). [Regional report on the state of the environment in Ivano-Frankivsk region for 2023]. Ivano-Frankivsk. [in Ukrainian]
10. Shchorichna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha u Lvivskii oblasti v 2023 rotsi. (2024). [Annual report on the state of the environment in Lviv region in 2023]. Lviv. [in Ukrainian]
11. Dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Rivnenskkii oblasti u 2023 rotsi. (2024). [Report on the state of the environment in Rivne region in 2023]. Rivne. [in Ukrainian]
12. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha u Chernivetskii oblasti za 2022 rik. (2023). [Regional report on the state of the environment in Chernivtsi region for 2022]. Chernivtsi. [in Ukrainian]
13. Stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha Khmelnytskoi oblasti u 2023 rotsi. (2024). [The state of the environment in Khmelnytskyi region in 2023]. Khmelnytskyi. [in Ukrainian]
14. Rehionalna dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha v Ternopilskii oblasti u 2023 rotsi. (2024). [Regional report on the state of the environment in Ternopil region in 2023]. Ternopil. [in Ukrainian]
15. Stalyi rozvytok rehioniv Ukrainy. (2025). [Sustainable development of Ukraine's regions]. Retrieved from: http://nung.edu.ua/files/attachments/stalyy_rozvytok_rehioniv_ukrayiny.pdf. [in Ukrainian]

Стаття надійшла: 28.06.2025

Прийнято: 15.07.2025

Опубліковано:

ОСВІТНІ, ПЕДАГОГІЧНІ НАУКИ. ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА

УДК 378.004:159.9

DOI

Вікторія САВІЦЬКА*кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри освітології і педагогіки, Західноукраїнський національний університет, бульв. Тараса Шевченка, 9, м. Тернопіль, Україна, 46000***ORCID:** 0000-0002-9438-1734

Бібліографічний опис статті: Савіцька, В. (2025). Теоретико-методичні передумови розвитку універсальних компетентностей (soft skills) майбутніх фахівців соціономічних професій в умовах цифрової трансформації. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 115–121, doi:

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ УНІВЕРСАЛЬНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ (SOFT SKILLS) МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ СОЦІОНОМІЧНИХ ПРОФЕСІЙ В УМОВАХ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

Звернення до універсальних (надпрофесійних) компетентностей майбутніх фахівців соціономічних професій детерміноване стрімкими змінами професійної сфери, виробничих та економічних відносин та соціальними змінами в усьому світі. Професійна реальність XXI століття демонструє необхідність універсальної форми сертифікації майбутніх фахівців соціономічних професій як показника рівня сформованості універсальних компетентностей у процесі вищої освіти. Для майбутніх фахівців соціономічних професій змінюється ставлення до низки важливих загальнопрофесійних навичок (здатність гнучко та адекватно ставитися до соціальної реальності, здатність формувати позитивну модель майбутнього, лідерські якості, вміння працювати в команді, здатність керувати емоційним станом, креативність у вирішенні конкретних професійних та інших завдань, стресостійкість). Важливими міжпрофесійними навичками у соціономічній сфері є вміння вирішувати конфліктні ситуації, ефективно спілкування, медіаграмотність, навички ефективного мислення та загальна комунікативна культура як важлива особистісна характеристика професіонала.

Проблема формування soft skills майбутніх фахівців соціономічних професій є найактуальнішою в умовах цифровізації, коли потрібна перебудова мислення для досягнення цілей та завдань освіти. У статті узагальнено, що універсальні компетентності (soft skills) є комплексом умінь загального характеру, тісно пов'язаних з особистісними якостями. На відміну від hard skills, які охоплюють теоретичні знання та практичний досвід, яким майбутніх фахівців можливо навчити, soft skills – це природні, нетехнічні атрибути, що відбивають підхід до роботи. Їхня основа – сама особистість майбутніх фахівців соціономічних професій, те, як вони взаємодіють з іншими людьми.

Ключові слова: цифровізація, універсальні компетентності, цифрова компетентність, цифрова трансформація, майбутні фахівці соціономічних професій, здобувачі освіти.

Viktorія SAVITSKA*Candidate of Pedagogical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Educology and Pedagogy, West Ukrainian National University, Ukraine, 9 T. Shevchenko blvd., Ternopil, Ukraine, 46009***ORCID:** 0000-0002-9438-1734

To cite this article: Savitska, V. (2025). Teoretyko-metodychni peredumovy rozvytku universalnykh kompetentnostei (soft skills) maibutnykh fakhivtsiv sotsionomichnykh profesii v umovakh tsyfrovoy transformatsii [Theoretical and methodological prerequisites for the development of universal competencies (soft skills) of future socionomic professionals in the context of digital transformation]. *Problems of chemistry and sustainable development*, 3, 115–121, doi:

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF UNIVERSAL COMPETENCIES (SOFT SKILLS) OF FUTURE SOCIONOMIC PROFESSIONALS IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION

The focus on universal (transversal) competencies of future specialists in socionomic professions is determined by rapid changes in the professional sphere, production and economic relations, as well as global social transformations. The professional reality of the 21st century demonstrates the necessity for a universal form of certification for future socionomic professionals, serving as an indicator of the level of their universal competencies developed during higher education. For future socionomic specialists, attitudes toward a range of general professional skills have shifted significantly. These include the ability to flexibly and adequately respond to social reality, the capacity to construct a positive vision of the future, leadership qualities, teamwork skills, emotional self-regulation, creativity in solving professional and other tasks, and resilience. Among the essential cross-professional skills in the socionomic domain are conflict resolution abilities, effective communication, media literacy, critical thinking skills, and overall communicative culture as a vital personal trait of a professional.

The issue of developing soft skills in future socionomic professionals is especially relevant in the context of digitalization, which requires a transformation of thinking to achieve educational goals and objectives. This paper emphasizes that universal competencies (soft skills) are a set of general abilities closely related to personal qualities. Unlike hard skills, which encompass theoretical knowledge and practical experience that can be taught, soft skills are innate, non-technical attributes that reflect an individual's approach to work. Their foundation lies in the personality of the future professional and the way they interact with others.

Key words: digitalization, universal competencies, digital competence, digital transformation, future socionomic professionals, learners.

Актуальність проблеми. Сучасний розвиток суспільства характеризується активною інтеграцією життєдіяльності різних груп соціуму в галузі політики, економіки та ідеології. Процеси в суспільстві стають взаємозалежними в усіх аспектах – політичному, економічному, культурному – і масштаб цих взаємозалежностей стає глобальним (Tomczyk, et al., 2024). Аналізуючи процес глобалізації, Н. Лав (N. Law) та співавтори визначають його як перетворення суспільства у взаємодоповнювальну інформаційно-комунікаційну систему, елементи якої є основою нового виду відтворення спільноти на основі взаємодії процесів глобалізації та цифровізації (Law, Woo, & Wong, 2018). Процес цифровізації характеризується генерацією великих обсягів інформації, високою значущістю інтелектуальної діяльності, вдосконаленням цифрових продуктів. Ключовими завданнями цифровізації суспільства є формування та використання цифрових ресурсів для забезпечення широкого і вільного доступу громадян до них, надання населенню значущої суспільної інформації, а також створення необхідної нормативно-правової бази, яка буде визначати принципи побудови цифрового суспільства в межах розвитку цифрової економіки та цифрової трансформації (Basilotta-Gómez-Pablos, et al., 2018). Цифровізація передбачає впровадження більш продуктивних підходів до організації інформаційних

потоків у всіх сферах діяльності соціуму (Сікора, 2025, с. 159). Таким чином, цифровізація – це не просто впровадження нових технологій, а глобальний трансформаційний процес, в межах якого функції і процедури, що раніше виконувалися без використання цифрових засобів, переміщуються в цифровий простір із застосуванням відповідних інструментів (Савіцька, 2022). Цей процес підкреслює актуальність і важливість впровадження перспективних цифрових інструментів у всі сфери діяльності – від передачі, обробки та зберігання інформації до її подання та використання у прийнятті рішень.

В умовах нового технологічного укладу висуваються інші вимоги до знань і навичок фахівців різного профілю, зокрема й майбутніх фахівців соціономічних професій, які беруть активну участь у цифровій трансформації суспільства. Освіта, як частина державної системи, адаптується до вимог цифрової епохи, активно реагує на процеси, що відбуваються в суспільстві (Bikse, et al., 2021), і вдосконалює освітні технології з метою підвищення якості підготовки майбутніх фахівців соціономічних професій. Змінюється система організації освітнього процесу – вимоги до компетентностей майбутніх бакалаврів регулярно актуалізуються, реагуючи на зміну вектора розвитку світової економіки, промисловості та інших сфер.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

У контексті цифрової трансформації освіти дедалі більше уваги приділяється формуванню цифрової компетентності та розвитку м'яких навичок (soft skills) майбутніх фахівців. Теоретичні аспекти цифрової компетентності як однієї з ключових у структурі фахової компетентності майбутніх фахівців розкрито у працях В. Овдійчук (2025), С. Алексєєвої (2023), де акцентовано на змістових домінантах та тенденціях розвитку цифрових навичок. Широкий міжнародний підхід до оцінювання цифрової грамотності представлений у «Global Framework of Reference on Digital Literacy Skills» (2018), який визначає загальноосвітні індикатори цифрової підготовки. Аспекти підготовки майбутніх фахівців в умовах цифровізації аналізуються у працях Я. Сікори (2025) та В. Савіцької (2022), де обґрунтовано теоретико-методологічні засади проєктування освітнього процесу. Проблематику цифрових компетентностей у вищій школі з позицій системності висвітлено в узагальнюючих оглядах В. Басілотта Гомес Паблос (V. Basilotta Gómez Pablos) (2022)), Л. Томчук (Ł. Tomczyk (2024)), що підкреслює глобальний характер досліджуваної проблеми.

У наукових пошуках окреме місце посідає дослідження soft skills – гнучких навичок, необхідних для адаптації до кризових ситуацій. Зокрема, С. Алдулаймі (S. Aldulaimi (2018)), Д. Лейкер (D. Laker (2011) і J. Powell (Дж. Пауелл (2011)) висвітлюють вплив лідерських і комунікативних навичок на ефективність професійної діяльності в закладах вищої освіти. Натомість П. Франко (P. Franco (2019)) та Д. ДеЛука (D. DeLuca (2019)) демонструють можливості ігрових стратегій як засобу формування інноваційного мислення, а М. Коельо (M. Coelho (2022)) та Х. Мартінс (H. Martins (2022)) аналізують цифрові практики розвитку м'яких навичок у професійній освіті. Загалом, аналіз сучасних досліджень свідчить про необхідність інтеграційного розвитку цифрових та універсальних компетентностей (soft skills) у підготовці майбутніх фахівців соціономічних галузей, особливо з урахуванням викликів глобалізації та цифровізації.

Мета статті полягає в теоретичному обґрунтуванні та методичному визначенні передумов, що впливають на розвиток універсальних

компетентностей (soft skills) майбутніх фахівців соціономічних професій в умовах цифрової трансформації.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах цифрової трансформації суспільства поступово відбувається трансформація і реформування соціономічної сфери, підходу до вирішення професійних завдань, а також до підготовки майбутніх фахівців соціономічних професій абсолютно нового покоління, які володіють цілим набором компетентностей, частина з яких визначається специфікою професійної діяльності і називається «жорсткими навичками» (hard skills) (Laker, & Powell, 2011, с. 115). Однак конкурентоздатні фахівці повинні володіти певними навичками, які є поза мінливими цифровими технологіями, а також вміти застосовувати їх, адаптуючись до нововведень і виконуючи, водночас, власну професійну діяльність. Ці навички досить універсальні, не залежать від технологій і знань і зумовлені самою природою людини і базуються на особистісних якостях. Особистісні трансверсальні компетенції, що характеризують відносини між людьми, також відомі як м'які навички (soft skills) (Cimatti, 2016), мають значний вплив на поведінку людини у спілкуванні з іншими, зокрема на робочому місці. Здається, існує певний консенсус щодо необхідності для закладів вищої освіти (ЗВО) зосередитися на розвитку м'яких навичок, а також дисциплінарних знань, оскільки вони є важливими для кар'єрних перспектив і для особистого розвитку (Coelho, & Martins, 2022, с. 79).

На відміну від «жорстких» (hard skills) чи професійних навичок, «гнучкі навички» (soft skills) мають універсальний характер і важливі для життєвого розвитку та професійного зростання будь-якої людини. Зокрема, необхідна здатність злагоджено діяти всім учасникам команди – це результат «гнучких» взаємин між її членами. Таким чином, наявність «soft skills» у майбутніх фахівців – це результат розвитку відповідних особистісних здібностей (талантів) та навичок: логічне мислення, креативність, емпатія, адаптивність, управління стресом, робота в команді, навички презентації тощо.

Хоча термін «навички» може означати «здатність добре виконувати щось» (Golowko, 2018), термін «soft skills» охоплює здатність людей спілкуватися між собою та добре працювати

разом, соціальні здібності, мовні та комунікативні здібності, товариськість та інші характеристики, типові для міжособистісних відносин (Cimatti, 2016). На противагу цьому, тверді навички сприймаються як технічні навички, що передбачають роботу з обладнанням, даними або навіть програмним забезпеченням (Laker & Powell, 2011). Soft skills розглядаються науковцями як ключові або надпредметні навички, універсальні компетентності (Алексеева, 2023; Овдійчук, 2025; Aldulaimi, 2018; Franco, & DeLuca, 2019). Тому

soft skills – це комплекс загальних навичок для різних видів діяльності. Soft skills охоплюють деякі риси інтелектуальної діяльності, емоційного інтелекту, управління собою, а також продуктивної взаємодії з іншими людьми, дають змогу бути успішним фахівцем і досягати поставлених цілей, незалежно від специфіки напрямку (Aldulaimi, 2018, с. 7).

У вищій освіті розвиток універсальних компетентностей передбачений Стандартами вищої освіти України для різних спеціальностей, в яких затверджено загальний перелік універсальних компетентностей, які застосовуються до всіх рівнів та напрямів освіти, що підкреслює їхній міждисциплінарний та міжпредметний характер. Крім того, сучасні освітні проекти, що відображають тенденції розвитку сучасної вищої освіти, також особливу увагу приділяють розвитку універсальних компетентностей (soft skills). Серед пріоритетних напрямів – формування у студентів системного мислення, навичок саморозвитку, вміння вибудовувати ефективну комунікацію та соціальну взаємодію, а також усвідомлення важливих життєвих цінностей та формування власного світогляду (Law, et al., 2018).

Здійснюючи вимірювання та оцінку сформованості універсальних компетентностей здобувачів освіти під час освоєння освітніх програм бакалаврату та магістратури, С. Алдулаймі (S. Aldulaimi) трактує універсальні компетентності як здатність особистості пов'язувати теоретичні знання з реальним життям, знаходити вірний шлях у навчанні та виробляти алгоритм дій в умовах. Саме ці універсальні компетентності є основою більш спеціалізованих, предметно-зорієнтованих знань і навиків (Aldulaimi, 2018). Автор розглядає ці універсальні компетентності більш загальним чином, відзначаючи

їхню незалежність від конкретної професії чи сфери діяльності, водночас надаючи їм ключового значення у будь-якій професійній, освітній діяльності та в житті загалом. Близької позиції дотримується Б. Ціматті (B. Cimatti) розглядаючи soft skills студентів як надпрофесійні навички особистості для творчої самореалізації, соціальної взаємодії в суспільстві та адаптації до мінливих умов (Cimatti, 2016). У Стандарті вищої освіти України універсальні компетентності розглядаються як результати освоєння освітньої програми певного рівня вищої освіти, що відображають загальні знання, соціальні та особистісні здібності здобувачів освіти та які дають змогу бути успішними незалежно від специфіки та напрямку професійної діяльності.

Натомість Н. Головко (N. Golowko) ототожнює універсальні компетентності та soft skills і характеризує як такі, що мають гнучку, нестатичну структуру навички, тісно пов'язані з особистісними якостями майбутніх фахівців, які дають їм змогу самостійно формувати здатність діяти різнобічно та ефективно в різних галузях та життєвих обставинах. Завдяки розвитку soft skills у майбутніх фахівців формується адаптація до мінливих умов (Golowko, 2018, с. 833). Тому варто узагальнити, що універсальні компетентності мають виражено індивідуальний, персоніфікований характер, тісно взаємопов'язані з особистісними якостями майбутніх фахівців соціономічного профілю та їхньою здатністю до саморозвитку.

У своєму дослідженні Д. Лакер (D. Laker) та Дж. Повелл (J. Powell) пропонують класифікувати soft skills таким чином: навички комунікації, зокрема командна робота; навички управління собою (управління власним часом і саморозвитком); інтелектуальні навички, зокрема й проектне мислення; управлінські навички (управління проектами) (Laker, & Powell, 2011). Тобто всі soft skills можливо розділити на дві групи: особисті навички та навички міжособистісної взаємодії. Залежно від сфери діяльності найзатребуванішою є їхня різна комбінація.

Зарубіжні дослідники давно вивчають питання значущості soft skills у діяльності фахівців соціономічної сфери і пропонують шість основних (базових) груп: основні, комунікативні, концептуальні, особисті, соціальні та громадянські, а також навички, пов'язані

з діловим світом (Aldulaimi, 2018; Cimatti, 2016; Coelho, & Martins, 2022; Golowko, 2018; Laker, & Powell, 2011). У цій класифікації відсутні навички, пов'язані з реалізацією проєктів, які значущі для представників соціономічних професій.

Для розгляду soft skills О. Мельниченко використовує концепцію емоційного інтелекту, який визначається здатністю особистості правильно «зчитувати» умови, вловлювати те, чого потребують інші люди, знати їхні сильні і слабкі сторони, не піддаватися негативу і бути привабливим для інших (Мельниченко, 2022, с. 95). Як принциповий результат, нарівні з фаховими компетентностями, розглядається формування у здобувачів освіти можливостей до комунікації, лідерства, кооперації, дипломатії, вибудовування взаємин; створення командних, громадських, «мистецьких» умінь; умінь піднести власні думки, набути рішення, креативно вирішити виявлені проблеми тощо. Ці зони відповідальності зараховують до так званих soft skills.

На основі здійсненого аналізу наукової літератури узагальнюємо, що у сучасній вищій освіті, зокрема й у підготовці майбутніх фахівців соціономічних професій, універсальні компетентності доцільно розділити на три основні групи. Перша група компетентностей, пов'язана з ефективною професійною поведінкою та мобільністю на ринку праці, охоплює такі компетентності: системне та критичне мислення, розробка та реалізація проєктів, командна робота та лідерство, комунікація, міжкультурна взаємодія. Друга група універсальних компетентностей визначена здатністю до саморегуляції та особистісного зростання майбутніх фахівців соціономічних професій та охоплює компетентність самоорганізації та саморозвитку. Третя група представлена цифровими компетентностями і охоплює цифрову грамотність.

Таким чином, на основі розглянутих визначень, універсальні компетентності доцільно розглядати як сукупність знань, умінь та особистісних якостей, які дають змогу майбутнім фахівцям соціономічних професій успішно діяти у різних професійних ситуаціях, зокрема

нестандартних та непередбачуваних. Вони відображають вимоги, які висувають до випускників суспільство загалом (в контексті загальнокультурного рівня та соціальної відповідальності) та роботодавці (в плані професійної підготовки та особистісних якостей). Підводячи підсумок, констатуємо, що у визначенні поняття «soft skills» дослідники пов'язують цей термін з професійною успішністю і самореалізацією, особистими якостями, спілкуванням і співпрацею, відсутністю зв'язку з конкретною професією. Soft skills незалежні від професійних знань і повільно розвиваються в процесі накопичення життєвого досвіду. Вияв soft skills відбувається в умовах непередбачуваності інтеграції особистості в суспільство і професійної реалізації майбутніх фахівців.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Стрімкий розвиток цифрової трансформації суспільства спричинив формування сучасних вимог в аспекті формування soft skills здобувачів освіти під час навчання у ЗВО. Цей аспект спрямований, передусім, на підготовку успішних та затребуваних фахівців, зокрема й соціономічних професій, які забезпечать конкурентну перевагу в професійній сфері. Водночас вони легко зможуть вирішувати поставлені завдання за допомогою величезного спектру soft skills, які визначаються різними науковцями, експертами, роботодавцями. Варто відзначити, що здобувачі освіти, які володіють низкою soft skills, виконують дії поетапно. Вирішуючи певні завдання, здобувачі освіти навчаються працювати в команді, беруть участь у різних заходах, формують взаємини в колективі, адаптуються до оточуючого середовища, виявляють логіку, аргументують власну позицію, здійснюють рефлексію, приймають рішення, думаючи творчо та керуючи у сформованій ситуації власним емоційним станом. Припускаємо, що рівень володіння soft skills визначить успіх майбутніх фахівців соціономічних професій та їхнє подальше майбутнє. Для ефективного формування soft skills майбутніх фахівців соціономічних професій важлива цілеспрямована робота, заснована на створенні педагогічної моделі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Алексеева С. Цифрова компетентність: змістовні домінанти та тенденції. *Перспективи та інновації науки. (Серія «Педагогіка»)*. 2023. № 9 (27). С. 70–78. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2023-9\(27\)-70-78](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2023-9(27)-70-78)

2. Білик Н. І. Роль емоційного інтелекту в підготовці майбутніх фахівців соціономічних професій. *Молодий вчений*. 2023. № 2 (114). С. 138–142. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-2-114-29>
3. Мельниченко О. А. Роль емоційного інтелекту у формуванні професійних soft skills студентів. *Гуманітарний вісник. Серія: Педагогіка*. 2022. № 8(56). С. 93–98.
4. Овдійчук В. Цифрова компетентність як одна з базових компетентностей майбутніх учителів інформатики. *Освіта. Інноватика. Практика*. 2025. 3 (13), 64–69. DOI: <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i3-010>
5. Савіцька В. В. Теоретико-методологічні основи проєктування освітнього процесу у закладах вищої освіти в умовах цифровізації. Інноваційні технології навчання в умовах модернізації сучасної освіти: колективна монографія / за заг. ред. Л. З. Ребухи. Тернопіль: ЗУНУ, 2022. С. 67–83.
6. Сікора Я. Б. Теоретико-методичні засади системи професійної підготовки майбутніх фахівців з інформаційних технологій в умовах цифровізації: дис. ... д-ра пед. наук: 13.00.04 / Житомирський держ. ун-т ім. Івана Франка. Житомир, 2025. 709 с.
7. Aldulaimi S. H. Leadership soft skills in higher education institutions. *Social Science Learning Education Journal*. 2018. Vol. 3, No. 7. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.15520/sslej.v3i7.2219>.
8. Basilotta Gómez Pablos V., García-Valcárcel A., Vázquez-Martínez A. Teachers' digital competencies in higher education: a systematic review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*. 2022. Vol. 19. Article 8. DOI: <https://doi.org/10.1186/s41239-022-00314-7>.
9. Bikse V., Lusena-Ezera I., Rivza P., Rivza B. The development of digital transformation and relevant competencies for employees in the context of the impact of the COVID-19 pandemic in Latvia. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, No. 16. Article 9233. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13169233>.
10. Cimatti B. Definition, development, assessment of soft skills and their role for the quality of organizations and enterprises. *International Journal for Quality Research*. 2016. Vol. 10, No. 1. P. 97–130. DOI: <https://doi.org/10.18421/IJQR10.01-05>.
11. Coelho M. J., Martins H. The future of soft skills development: a systematic review of the literature of the digital training practices for soft skills. *Journal of e-Learning and Knowledge Society*. 2022. Vol. 18, No. 2. P. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.20368/1971-8829/1135576>.
12. Franco P. F., DeLuca D. A. Learning through action: creating and implementing a strategy game to foster innovative thinking in higher education. *Simulation & Gaming*. 2019. Vol. 50, No. 1. P. 23–43. DOI: <https://doi.org/10.1177/1046878118820892>.
13. Golowko N. The need for digital and soft skills in the Romanian business service industry. *Management and Marketing*. 2018. Vol. 13, No. 1. P. 831–847. DOI: <https://doi.org/10.2478/mmcks-2018-0008>.
14. Laker D., Powell J. The differences between hard and soft skills and their relative impact on training transfer. *Human Resource Development Quarterly*. 2011. Vol. 22, No. 1. P. 111–122. DOI: <https://doi.org/10.1002/hrdq.20063111>.
15. Law N., Woo D., Wong G. A global framework of reference on digital literacy skills for indicator 4.4.2 : monograph. Montreal: UNESCO Institute for Statistics, 2018. URL: <http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/ip51-global-framework-reference-digital-literacy-skills-2018-en.pdf>.
16. Tomczyk Ł., Potyrała K., Wójcik M., et al. Digital competence among pre-service teachers: a global perspective. *Evaluation and Program Planning*. 2024. Vol. 105. Article 102449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2024.102449>.

REFERENCES:

1. Aleksieieva, S. (2023). Tsyfrova kompetentnist: zmistovni dominanty ta tendentsii [Digital competence: content dominants and trends]. *Perspektyvy ta innovatsii nauky. Seriiia «Pedahohika» – Perspectives and Innovations of Science. Pedagogy Series*, (9)27, 70–78. <https://doi.org/10.52058/2786-4952> [in Ukrainian].
2. Melnychenko, O. A. (2022). Rol' emotsiinoho intelektu u formuvanni profesiinykh soft skills studentiv [The role of emotional intelligence in the development of students' professional soft skills]. *Humanitarnyi visnyk. Seriiia: Pedahohika – Humanitarian Bulletin. Series: Pedagogy*, 8(56), 93–98. [in Ukrainian].
3. Bilyk, N. I. (2023). Rol' emotsiinoho intelektu v pidhotovtsi maibutnikh fakhivtsiv sotsionomichnykh profesii [The role of emotional intelligence in the training of future specialists in socionomic professions]. *Molodyi vchenyi – Young Scientist*, 2(114), 138–142. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-2-114-29> [in Ukrainian].
4. Ovdiiichuk, V. (2025). Tsyfrova kompetentnist yak odna z bazovykh kompetentnostei maibutnikh uchyteliv informatyky [Digital competence as one of the basic competencies of future computer science teachers]. *Osvita. Innovatyka. Praktyka – Education. Innovatics. Practice*, 3(13), 64–69. <https://doi.org/10.31110/2616-650X-vol13i3-010> [in Ukrainian].
5. Savitska, V. V. (2022). Teoretyko-metodolohichni osnovy proiektuvannia osvitnoho protsesu u zakladakh vyshchoi osvity v umovakh tsyfrovizatsii [Theoretical and methodological foundations of designing the educational process in

higher education institutions under digitalization]. In L. Z. Rebukha (Ed.), *Innovatsiini tekhnolohii navchannia v umovakh modernizatsii suchasnoi osvity: Kolektyvna monohrafiia* (pp. 67–83). Ternopil: ZUNU. [in Ukrainian].

6. Sikora, Ya. B. (2025). *Teoretyko-metodychni zasady systemy profesiinoi pidhotovky maibutnikh fakhivtsiv z informatsiinykh tekhnolohii v umovakh tsyfrovizatsii* [Theoretical and methodological principles of the professional training system for future IT specialists under digitalization] (Doctoral dissertation, Zhytomyr State University named after Ivan Franko). Zhytomyr. [in Ukrainian].

7. Aldulaimi, S. H. (2018). Leadership soft skills in higher education institutions. *Social Science Learning Education Journal*, 3(7), 1–8. <https://doi.org/10.15520/sslej.v3i7.2219>

8. Basilotta Gómez Pablos, V., García-Valcárcel, A., & Vázquez-Martínez, A. (2022). Teachers' digital competencies in higher education: A systematic review. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 19, Article 8. <https://doi.org/10.1186/s41239-022-00314-7>

9. Bikse, V., Lusena-Ezera, I., Rivza, P., & Rivza, B. (2021). The development of digital transformation and relevant competencies for employees in the context of the impact of the COVID-19 pandemic in Latvia. *Sustainability*, 13(16), Article 9233. <https://doi.org/10.3390/su13169233>

10. Cimatti, B. (2016). Definition, development, assessment of soft skills and their role for the quality of organizations and enterprises. *International Journal for Quality Research*, 10(1), 97–130. <https://doi.org/10.18421/IJQR10.01-05>

11. Coelho, M. J., & Martins, H. (2022). The future of soft skills development: A systematic review of the literature of the digital training practices for soft skills. *Journal of e-Learning and Knowledge Society*, 18(2), 78–85. <https://doi.org/10.20368/1971-8829/1135576>

12. Franco, P. F., & DeLuca, D. A. (2019). Learning through action: Creating and implementing a strategy game to foster innovative thinking in higher education. *Simulation & Gaming*, 50(1), 23–43. <https://doi.org/10.1177/1046878118820892>

13. Golowko, N. (2018). The need for digital and soft skills in the Romanian business service industry. *Management and Marketing*, 13(1), 831–847. <https://doi.org/10.2478/mmcks-2018-0008>

14. Laker, D. R., & Powell, J. L. (2011). The differences between hard and soft skills and their relative impact on training transfer. *Human Resource Development Quarterly*, 22(1), 111–122. <https://doi.org/10.1002/hrdq.20063111>

15. Law, N., Woo, D., & Wong, G. (2018). A global framework of reference on digital literacy skills for indicator 4.4.2. UNESCO Institute for Statistics. <http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/ip51-global-framework-reference-digital-literacy-skills-2018-en.pdf>

16. Tomczyk, Ł., Potyrała, K., Wójcik, M., et al. (2024). Digital competence among pre-service teachers: A global perspective. *Evaluation and Program Planning*, 105, Article 102449. <https://doi.org/10.1016/j.evalprogplan.2024.102449>

Стаття надійшла: 06.08.2025

Прийнято: 18.08.2025

Опубліковано:

УДК 330.34: 378.14: 378.4: 504.03

DOI

Ганна ЯКИМЕНКО

кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058; експерт з охорони довкілля, Національна енергетична компанія «Укренерго», вул. Симона Петлюри, 25, м. Київ, Україна, 01032

ORCID: 0000-0002-2137-1025

Scopus Author ID: 56806881400

Тетяна СЕМИГІНІВСЬКА

кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри англійської мови технічного спрямування № 1, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пр. Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056; доцент кафедри англійської філології і перекладу, Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

ORCID: 0000-0002-6791-0397

Бібліографічний опис статті: Якименко, Г., Семигінівська, Т. (2025). Щодо вдосконалення системи підготовки екологів та фахівців зі сталого розвитку. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 3, 122–129 doi:

ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПІДГОТОВКИ ЕКОЛОГІВ ТА ФАХІВЦІВ ЗІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Мета дослідження: виявити розбіжності між компетенціями, якими володіють випускники-екологи, та потребами стейкхолдерів. За результатами GAP-аналізу сформувані рекомендації з покращення системи підготовки здобувачів екологічних спеціальностей.

Методологія. У процесі дослідження використані аналітичні методи (структуризація, дедукція, GAP-аналіз), загальні та прогнозні методи.

Наукова новизна. Проведено GAP-аналіз прогалин між компетенціями випускників-екологів, та вимогами, що висуваються до них на ринку праці. Виявлено розбіжності між потребами роботодавців та компетенціями випускників, серед яких ключовими є: несвоєчасне оновлення освітніх компонентів; відсутність знань про екологічні тренди як у здобувачів, так і у викладачів; недостатнє володіння міжнародною фаховою термінологією; недостатнє володіння знаннями з екологічного управління; вузький для сьогодення спектр компетенцій в сфері сталого розвитку та ESG. Сформовано 8 рекомендацій з покращення системи підготовки здобувачів вищої освіти екологічних спеціальностей за трьома напрямками: вдосконалення системи управління вищої освіти, розвиток компетенцій викладачів, розвиток компетенцій здобувачів.

Висновки. Впровадження наданих рекомендацій з покращення системи підготовки здобувачів вищої освіти екологічних спеціальностей дозволить підвищити рівень конкурентноздатності випускників на ринку праці та зменшить адаптивний період на першому місці роботи «за фахом». Використання інструментів неформальної освіти допоможе подолати існуючий розрив між компетенціями здобувачів та актуальними потребами бізнесу у найкоротші терміни.

Ключові слова: сталий розвиток, ESG (екологічна, соціальна відповідальність та корпоративне управління), екологічна освіта.

Ganna IAKYMENKO

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Environmental Sciences, State University «Kyiv Aviation Institute», 1 Liubomyra Huzara ave., Kyiv, Ukraine, 03058; Expert on Environmental Protection, National Power Company «Ukrenergo», 25 Symona Petliury str., Kyiv, Ukraine, 01032

ORCID: 0000-0002-2137-1025

Scopus Author ID: 56806881400

Tetiana SEMYHINIVSKA

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Faculty of Linguistics at the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», 37 Beresteiskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056;

Associate Professor at the Faculty of Psychology, Communications and Translation, State University «Kyiv Aviation Institute», 1 Liubomyra Huzara ave., Kyiv, Ukraine, 03058

ORCID: 0000-0002-6791-0397

To cite this article: Iakymenko, G., Semyhinivska, T. (2025). Shchodo vdoskonalennia systemy pidhotovky ekologiv ta fakhivtsiv zi staloho rozvytku [To the issue of the improvement of the training system of ecologists and sustainable development professionals]. *Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 3, 121–129, doi:

TO THE ISSUE OF THE IMPROVEMENT OF THE TRAINING SYSTEM OF ECOLOGISTS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT PROFESSIONALS

Research Aim: to identify discrepancies between the competencies possessed by environmental science graduates and the needs of stakeholders. Based on the results of the GAP analysis, develop recommendations for improving the training system for students in environmental science specialties.

Methodology. The study employed analytical methods (structuring, deduction, GAP analysis), as well as general and predictive methods.

Scientific Novelty. The GAP analysis was conducted to identify gaps between the competencies of environmental science graduates and the requirements of the labor market. Discrepancies were revealed between employer needs and graduate competencies, with key issues identified as: untimely updating of educational components; lack of knowledge about environmental trends among both students and educators; insufficient mastery of international professional terminology; inadequate knowledge of environmental management; and a narrow range of competencies related to sustainable development and ESG (Environmental, Social, and Governance) that is insufficient for current demands. Eight recommendations were developed to improve the training system for higher education students in environmental science specialties across three directions: improving higher education management systems, developing educators' competencies, and enhancing students' competencies.

Conclusions. Implementing the provided recommendations to improve the training system for higher education students in environmental specialties will increase graduates' competitiveness in the labor market and reduce the adaptation period at their first job «in the profession». The use of informal education tools will help bridge the existing gap between student competencies and the current needs of businesses in the shortest possible time.

Key words: sustainable development, ESG (Environmental, Social, and Governance), environmental education.

Актуальність проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх п'яти років сфера охорони довкілля, збереження екосистемних послуг та відновлення природних систем, сталого розвитку зазнала гострої кадрової кризи, масштаби якої були істотно посилені війною та відсутністю дієвої взаємодії між науковою спільнотою, освітніми інституціями та бізнес-сектором (Капінос, 2023; РАЕВ, 2024).

За свідченнями науковців (Саєнко, 2020; Усик, 20218), Україна є унікальним майданчиком для впровадження кращих практик сталого розвитку. За останні 100 років територія країни зазнала різноманітних антропогенних трансформацій, що призвели до незворотних змін екосистем та ландшафтів. Найбільшими чинниками, що призвели до деградації та знищення екосистем є: індустріалізація, спорудження каскадів річкових водосховищ, аварії та об'єктах

енергетики та хімічних підприємствах, стрімке та хаотичне утворення стихійних сміттєзвалищ, використання стійких органічних забруднювачів та озоноруйнуючих речовин, нераціональне землекористування, інвазії та військові дії тощо. Усі ці чинники зумовили суттєві трансформації екосистем і ландшафтів, а також невідворотні втрати біорізноманіття.

Поряд із національними викликами, перед природоохоронцями постає необхідність вирішення глобальних проблем, зокрема адаптації до змін клімату, збереження водних ресурсів та джерел прісної води тощо (Rogoff, 2016; Лакас, 2024; Liuta, 2024; Omelianenko, 2022). При цьому рівень підготовки українських фахівців не відповідає потребам сьогодення: як зазначає професор Тетяна Саєнко (Саєнко, 2020), в університетах Великої Британії та ЄС обсяг навчальних дисциплін екологічного спрямування становить близько 1500 годин, тоді як у вітчизняних закладах вищої освіти цей показник є меншим за 700. До того ж освітні програми, за якими проводиться підготовка здобувачів, вже втратили актуальність, а екологічна галузь в Україні нині переживає кадрову кризу, частково зумовлену браком релевантних знань у випускників. Такі висновки підтверджуються дослідженням, проведеним Професійною спілкою «Асоціація професіоналів довкілля» (РАЕВ) за підтримки ПРООН та уряду Швеції у 2024 році. У дослідженні взяли участь понад 500 студентів спеціальностей 101 «Екологія» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища» з понад 70 випускових кафедр університетів і 10 коледжів. За його результатами, лише 5–7% випускників закладів вищої освіти за екологічними спеціальностями володіють інструментарієм застосування й реалізації теоретичних знань, здобутих в університетах (РАЕВ, 2024). Це дає змогу зробити висновок, що національна система підготовки екологів потребує якнайшвидшої адаптації до потреб кадрового ринку та розвитку компетенцій випускників до рівня, що відповідає завданням Національного курсу «зеленого відновлення» України.

Мета дослідження – виявити розбіжності між компетенціями, якими володіють випускники-екологи, та потребами стейкхолдерів, та розробити рекомендації з покращення системи підготовки здобувачів екологічних спеціальностей.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Детальний аналіз досліджень та публікацій дозволив авторам виявити розбіжності між компетенціями, які відображені у резюме випускників-екологів, та вимогами, що висувуються до екологів, фахівців з ESG або сталого розвитку на ринку праці. За результатами GAP-аналізу автори визначили такі ключові прогалини між компетенціями випускників та потребами роботодавців:

- незнання «трендів» сталого розвитку викладачами університетів, відповідно, фахові прогалини у наповненні дисциплін;
- нестача знань у студентів і випускників у питаннях екологічного звітування, екологічного податкового обліку та рентної плати за користування природними ресурсами, інвентаризації джерел викидів, енергоефективності, процедур отримання екологічних дозволів і ліцензій, а також проведення оцінки впливу на довкілля та стратегічної екологічної оцінки;
- невміння застосовувати теоретичні знання у практичній діяльності: виробнича практика здобувачів часто є формальністю;
- випускники не володіють сучасною фаховою міжнародною термінологією;
- кадровий ринок потребує ширшого спектру компетенцій випускників: не лише екологічні, а й соціальні та управлінські – тобто, потрібні фахівці зі сталого розвитку або ESG.

На відміну від українських університетів, провідні заклади освіти ЄС, США та Канади вже інтегрували нові навчальні дисципліни у свої освітні магістерські програми, фокусуючись не лише на екологічних знаннях, а й на соціальних. Тож сучасна система підготовки фахівців в Україні має включати навчальні дисципліни, спрямовані на розв'язання проблем, окреслених у 17 Цілях сталого розвитку ООН та законопроекті «зеленого відновлення України».

На підставі результатів GAP-аналізу, практичного досвіду забезпечення функціонування системи екологічного управління однієї з найбільших державних компаній (НЕК «Укренерго»), впровадження соціально-екологічних вимог міжнародних інвесторів та директив зі сталого розвитку, автори пропонують провести наступні вдосконалення системи підготовки здобувачів екологічних спеціальностей (Рис. 1):

I. Постійний аналіз потреб кадрового ринку у нових компетенціях фахівців. GAP-аналіз базових сучасних запитів роботодавців до фахових навичок та компетенцій спеціалістів з екологічного або корпоративного управління, соціальних питань, промислової безпеки, супроводу інвестиційних проєктів має проводитися не лише громадськими організаціями (РАEW, 2024), а й державними установами, в т.ч. закладами освіти. До того ж дослідження повинні бути системними. Наприклад, наразі молоді фахівці практично не володіють знаннями в сфері ESG, не знають соціально-екологічні стандарти міжнародних та національних інвесторів/кредиторів, в т.ч. найбільшого інвестора у відновлення країни від російської навали, Міжнародної фінансової корпорації IFC. Нефінансова інформація (з екологічної та соціальної відповідальності бізнесу) нині є обов'язковою складовою звітності про використання грантових та кредитних коштів, а знання принципів сталого розвитку та ESG стають «must have» для кожного працівника, залученого до виконання соціально-екологічного пакету кредитних зобов'язань.

II. Інтенсивне залучення стейкхолдерів (бізнесу, міжнародних установ, кредиторів, державних природоохоронних та контролюючих установ, професійних і громадських спілок) до

підготовки кадрів. Останні 5 років прослідковується тренд залучення експертів та досвідчених фахівців до освітнього процесу, проте не визначена мінімальна квота викладачів саме з сучасним практичним досвідом в галузі. При цьому проходження виробничих практик і стажувань здобувачами часто є формальним і не призводить до закріплення теоретичних знань.

III. Відкриття спеціальності або програми підготовки «Сталий розвиток». Жоден український університет, на відміну від європейських та північноамериканських, не «випускає» спеціалістів зі сталого розвитку. Здобувачів не навчають комплексному підходу до одночасного вирішення екологічних, економічних та соціальних проблем. У сучасному світі соціальні проблеми часто призводять до екологічних, і навпаки. Наприклад, руйнування агробіоценозів України спричиняє голод в африканських країнах та підвищує рівень бідності серед населення України. Розгляд подібних кейсів з досвідченими практиками, пошук шляхів розв'язання глобальних проблем мають стати базою для підготовки фахівців саме в сфері сталого розвитку.

IV. Ширший вибір новітніх дисциплін (освітніх компонентів) формальної вищої екологічної освіти. Наразі більшість бакалаврських та магістерських програм підготовки екологів не враховують глобальні тенденції та директиви,



Рис 1. Схема вдосконалення системи підготовки екологів

такі як Європейська зелена угода, Директива ЄС про корпоративну звітність про сталий розвиток (CSRD), Європейські стандарти звітності про сталий розвиток (ESRS), визначення річного вуглецевого сліду компанії (Scope), перехід до екологічного, соціального та корпоративного управління (ESG) тощо. Освітні програми та навчальні плани залишаються майже незмінними протягом десятиліть і не адаптовані до запитів роботодавців.

Згідно результатів досліджень (PAEW, 2024), понад 80% опитаних здобувачів освіти за спеціальностями 101 (E2) та 183 (G2) не знають про зазначені вище екологічні тенденції. Як наслідок, прогалини між запитом роботодавців та фактичними компетенціями випускників, призводять до того, що підприємства витрачають додаткові 1,5–2 роки на додаткове навчання молодих спеціалістів. Це створює перешкоду для працевлаштування випускників і призводить до втрати людського капіталу.

V. Вільне володіння фаховою міжнародною термінологією. Сталий розвиток передбачає спільну роботу міжнародної фахової спільноти над розв'язанням глобальних екологічних та соціальних проблем, що вимагає впевненого користування міжнародно прийнятими термінами, знання кращих світових практик. Більшість українських фахівців не мають необхідних знань, досвіду та навичок для професійного спілкування на міжнародному рівні. Як наслідок, ймовірність залучення українців у міжнародні проєкти суттєво знижується. Тому викладання окремих дисциплін або лекцій, семінарів іноземними мовами підвищує конкурентоспроможність молодих фахівців на ринку праці.

VI. Навчання здобувачів grant writing. Гранти та кредити міжнародних інвесторів є одним з основних джерел залучення інвестицій для вирішення існуючих національних та глобальних проблем. Наприклад, у 2022 році Україна отримала доступ до 14 грантових програм ЄС у сфері сталого розвитку (European Commission, 2024). Проте нестача кваліфікованого персоналу з написання грантових заявок призводять до втрати можливостей доступу до цих та інших світових грантових програм.

VII. Проходження викладачами виробничої практики. Більшість викладачів вищої освіти не володіє практичними навичками впровадження надаваних здобувачам знань. При цьому вони

не відслідковують зміни законодавчої бази та євроінтеграційні зміни, що призводить до нерозуміння потреб галузі. Тому підвищення кваліфікації викладачів у закладах та компаніях, що є основними стейкхолдерами освітніх програм, має стати, на думку авторів, обов'язковим компонентом покращення системи вищої освіти.

VIII. Інтеграція елементів неформальної освіти у формальний освітній процес. Нині національна система неформальної екологічної освіти надає набагато ширший спектр сучасних знань порівняно з формальною вищою освітою. Громадські екологічні організації проводять семінари з раціонального використання ресурсів, сортування відходів та запобігання змінам клімату; науковці з природних парків розробляють освітні екостежки на заповідних територіях та проводять навчальні екскурсії ними; професійні екологічні асоціації організовують освітні заходи з циркулярної економіки, енергоефективності, переходу на принципи ESG та вчать як складати звітність відповідно до стандартів CSRD та ESRS; Міністерство економіки, довіділля та сільського господарства України безкоштовно навчає користуватися цифровою платформою Екосистема та подавати в ній звітність тощо.

Неформальну освіту, включно з курсами підвищення кваліфікації та фаховими семінарами, зазвичай отримують практики, які мають досвід, а не здобувачі освіти чи випускники. Як наслідок, розрив у знаннях між молодими та досвідченими фахівцями продовжує зростати. Тому включення елементів неформальної освіти до формальної для програм бакалаврату та магістратури має стати обов'язковим.

Окрім поширених елементів неформальної освіти, зазначених вище, пропонуємо використовувати менш розповсюджені інструменти, наприклад, симуляційні ігри. Ділимося авторськими напрацюваннями в даній сфері: у 2024 році науковою командою Укренерго розроблено симуляційну гру «Молодь приймає рішення». Мета гри: якомога швидше та ефективніше вирішити соціально-екологічну проблему ігрової країни, налагодити співпрацю з іншими державами та досягти сталого розвитку. Такий підхід допомагає виявити прогалини у фахових компетенціях та комунікативних навичках учасників, закріплює теоретичні знання та розвиває логічне мислення у здобувачів (Рис. 2–4). Протягом 2024–2025 рр. проведено симуляційні ігри у 6

8. Liuta Oksana, Tymchuk Ivan, Malovanyy Myroslav, Turkadze Tsitsino. Education in the field of climate change adaptation as an integral part of achieving sustainable development goals. *Environmental Problems*. 2024. Vol. 9. № 1. P. 21–27. <https://doi.org/10.23939/ep2024.01.021>.
9. Territory of Innovations: Best Practices for Sustainable Development at the Local Level. Part 1 : digest of analytical stage of international scientific and educational project [Text] : collective monograph / sc. ed.: V. Omelianenko, O. Prokopenko, T. Tirto. Tallinn : Teadmus, 2022. 227 p.
10. University of Gothenburg. Education for Sustainable Development, Master's Programme. URL: <https://www.gu.se/en/study-göteborg/education-for-sustainable-development-masters-programme-s2esd> (дата звернення 20.08.2025).
11. University of Reading. Education for Sustainable Development. URL: <https://sites.reading.ac.uk/sustainability/get-involved/esd/> (дата звернення 19.08.2025).
12. University of Leicester. Education for sustainable development. URL: <https://le.ac.uk/sustainability/education-for-sustainable-development> (дата звернення 19.08.2025).
13. L-Università ta' Malta. Master in Education for Sustainable Development. URL: <https://www.um.edu.mt/courses/overview/pmesdpet2-2024-5-o/> (дата звернення 19.08.2025).
14. Bogoliubov V.M., Nagorniuk O.M., Sobczyk W. Providing environmental training in the context of Ukraine's transition to sustainable development. *Annals of Agrarian Science*. 2016. Vol 14. № 4. P. 292–294. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.09.003>.
15. European Commission Report 2024: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions. 2024. Brussels. 105 p.

REFERENCES:

1. Kapinos, H., & Larionova, K. (2023). Problema upravlinnia stalym rozvytkom v umovakh viiny [The problem of sustainable development management in wartime]. *Modeling the Development of the Economic Systems*, (1), 93–103. <https://doi.org/10.31891/mdes/2023-7-13> [in Ukrainian].
2. Professional Association of Environmentalists of the World (PAEW). (2024). *Doslidzhennya: rezultaty «Neobkhdni zminy osvithnoho interfeysu mizh akademichnym seredovyshchem i realnym sektorom ekonomiky v Ukraini»* [Research: Results «Necessary changes of the educational interface between the academic environment and the real economic sector in Ukraine»]. Retrieved August 22, 2025 from <https://ukraine-oss.com/doslidzhennya-rezultaty-neobkhdni-zminy-osvithnogo-interfeysu-mizh-akademichnym-seredovyshchem-i-realnym-sektorom-ekonomiky-v-ukrayini/>
3. Professional Association of Environmentalists of the World (PAEW). (2024). *Zvit proektu «PAEW: Zeleni upravlintsi: kadry dlia zelenoi vidbudovy Ukrainy»* [Project report «PAEW: Green managers: personnel for the green reconstruction of Ukraine»]. Retrieved August 22, 2025, from <https://ukraine-oss.com/wp-content/uploads/2024/06/doslidzhennya-kadry-full-1.pdf>
4. Saienko, T. (2020). Ekolohichna osvita – osnova ekobezpeky ta staloho rozvytku [Environmental education – the basis of ecological safety and sustainable development]. *Novitnia Nauka ta Vyscha Osvita*, (2), 30–36. [https://doi.org/10.31392/NPU-VOV.2020.2\(77\).06](https://doi.org/10.31392/NPU-VOV.2020.2(77).06) [in Ukrainian].
5. Usyk, V. I., & Melehanich, H. I. (Eds.). (2018). *Osvitnia merezha spriannia stalomu mistsevomu rozvytku: unikalnyi dosvid dievoho merezhevoho partnerstva VNZ Ukrainy* [Educational network promoting sustainable local development: unique experience of effective network partnership of Ukrainian higher education institutions]. Kamianets-Podilskyi: Aksioma [in Ukrainian].
6. Rogoff, B., Callanan, M., Gutiérrez, K. D., & Erickson, F. (2016). The organization of informal learning. *Review of Research in Education*, 40(1), 356–401. <https://doi.org/10.3102/0091732X16680994>
7. Lakas, V. V. (2024). Stalyi rozvytok v suchasnykh umovakh: sutnisno-zmistovna kharakterystyka ta teoretyko-metodolohichni zasady [Sustainable development in modern conditions: essential-content characteristics and theoretical-methodological foundations]. *Ahrosvit*, (16), 184–190. <https://doi.org/10.32702/2306-6792.2024.16.184> [in Ukrainian].
8. Liuta, O., Tymchuk, I., Malovanyy, M., & Turkadze, T. (2024). Education in the field of climate change adaptation as an integral part of achieving sustainable development goals. *Environmental Problems*, 9(1), 21–27. <https://doi.org/10.23939/ep2024.01.021>
9. Omelianenko, V., Prokopenko, O., & Tirto, T. (Eds.). (2022). *Territory of innovations: Best practices for sustainable development at the local level. Part 1: Digest of analytical stage of international scientific and educational project* [Collective monograph]. Tallinn: Teadmus. 227.
10. University of Gothenburg. (n.d.). Education for Sustainable Development, Master's Programme. Retrieved August 20, 2025, from <https://www.gu.se/en/study-göteborg/education-for-sustainable-development-masters-programme-s2esd>
11. University of Reading. (n.d.). Education for Sustainable Development. Retrieved August 19, 2025, from <https://sites.reading.ac.uk/sustainability/get-involved/esd/>

12. University of Leicester. (n.d.). Education for Sustainable Development. Retrieved August 19, 2025, from <https://le.ac.uk/sustainability/education-for-sustainable-development>
13. L-Università ta' Malta. (n.d.). Master in Education for Sustainable Development. Retrieved August 19, 2025, from <https://www.um.edu.mt/courses/overview/pmesdpet2-2024-5-o/>
14. Bogoliubov, V. M., Nagorniuk, O. M., & Sobczyk, W. (2016). Providing environmental training in the context of Ukraine's transition to sustainable development. *Annals of Agrarian Science*, 14(4), 292–294. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.09.003>
15. European Commission Report 2024: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of Regions. (2024). Brussels. 105.

Стаття надійшла: 23.08.2025

Прийнято: 03.09.2025

Опубліковано:

ЗМІСТ

ХІМІЯ

Олена ЄВДОЧЕНКО, Олександр КАМІНСЬКИЙ, Сніжана КУЧЕРУК, Роман ДЕНИСЮК, Микола ЧАЙКА, Юлія ЧАЙКА, Ольга АВДЄЄВА

ФОТОДЕСТРУКЦІЯ ХАРЧОВИХ БАРВНИКІВ З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ
ПІД ДІЄЮ УФ-ВИПРОМІНЮВАННЯ.....3

Hanna TKACHUK, Andrii TKACHUK, Oksana HERTSYK, Myroslava TASHAK, Oleh MARCHUK
РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОЛОЇДНИХ СИСТЕМ ПОЛІВІНІЛАЦЕТАЛІВ.....10

ЕКОЛОГІЯ

Karina BELOKON, Genadij KOZHEMYAKIN, Vladyslav BENDIUH, Bohdana KOMARYSTA, Mykyta ZHAVORONKOV, Ihor KARIYAKA
STUDY OF THE THERMAL TREATMENT METHOD FOR HIGHLY MINERALIZED WASTEWATER
FROM INDUSTRIAL PRODUCTION.....17

Наталія ГНАТЮК
ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ПІДЗЕМНИХ ВОД КРИВООЗЕРСЬКОГО РАЙОНУ
МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ ЗА ВПЛИВУ ТОКСИКАНТІВ.....29

Владислав ПАРАХНЕНКО, Віталій ГОНЧАРУК
МЕХАНІЗМИ ДЕРЖАВНОГО ПРИРОДООХОРОННОГО ІНСПЕКТУВАННЯ
ДЛЯ ЗАХИСТУ ПРИРОДНИХ ЛАНДШАФТІВ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ.....36

Ольга КАРАЇМ, Лариса ЧЕРЧИК, Володимир КАРАЇМ
РОЛЬ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗЕРНОСУШИЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ
У ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ АГРОСФЕРИ41

Володимир КУЧЕРЕНКО, Юлія ТАМАРКІНА, Анастасія РЕДЬКО, Іріна ФРОЛОВА
АКТИВОВАНЕ ЛУГОМ ДОВГОПОЛУМЕНЕВЕ ВУГІЛЛЯ.
НАНОПОРІСТА СТРУКТУРА ТА ЗДАТНІСТЬ АДСОРБУВАТИ ВАЖКІ МЕТАЛИ.....51

Марина ЛАДИКА, У Жофань
ЯКІСТЬ ВОДИ В Р. ІРПІНЬ В ПОСТМІЛІТАРНИЙ ПЕРІОД.....69

Вікторія МЕЛЬНИК-ШАМРАЙ, Володимир ШАМРАЙ, Ірина ПАЦЕВА
ПІСЛЯПРОЄКТНИЙ МОНІТОРИНГ ЯК ОСНОВА ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ ЩОДО ЗБЕРЕЖЕННЯ
БІОЛОГІЧНОГО РІЗНОМАНІТТЯ В ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ.....81

Богдан ФЕНЬ, Олена ДЖАМ
ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТАНУ ЛІСОВОГО ФОНДУ КІВЕРЦІВСЬКОГО НАДЛІСНИЦТВА.....90

Ілля ЦИГАНЕНКО-ДЗЮБЕНКО, Вікторія МЕЛЬНИК-ШАМРАЙ
ТОКСИКОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ЛІСОВІДНОВЛЕННЯ
НА ТЕРИТОРІЯХ З БОЄПРИПАСНИМ ЗАБРУДНЕННЯМ.....96

Ангеліна ЧУГАЙ, Оксана ЧЕРНЯКОВА, Андрій МОЗГОВИЙ, Марія СКАЛОЗУБ
ОЦІНКА СТАНУ ПОВІТРЯНОГО БАСЕЙНУ РЕГІОНІВ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ
ЗА ПОКАЗНИКАМИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ.....106

ОСВІТНІ, ПЕДАГОГІЧНІ НАУКИ. ПРОФЕСІЙНА ОСВІТА

Вікторія САВІЦЬКА

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ УНІВЕРСАЛЬНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ
(SOFT SKILLS) МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ СОЦІОНОМІЧНИХ ПРОФЕСІЙ В УМОВАХ
ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ115

Ганна ЯКИМЕНКО, Тетяна СЕМИГІНІВСЬКА

ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ПІДГОТОВКИ ЕКОЛОГІВ
ТА ФАХІВЦІВ ЗІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ.....122

CONTENTS

CHEMISTRY

Olena YEVDCHENKO, Oleksandr KAMINSKYI, Snizhana KUCHERUK, Roman DENYSIUK, Mykola CHAIKA, Yuliia CHAIKA, Olha AVDIEIEVA

PHOTODESTRUCTION OF FOOD DYES FROM AQUEOUS SOLUTIONS
UNDER THE INFLUENCE OF UV RADIATION..... 3

Hanna TKACHUK, Andrii TKACHUK, Oksana HERTSYK, Myroslava TASHAK, Oleh MARCHUK

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF POLYVINYLCETAL COLLOIDAL SYSTEMS.....10

ECOLOGY

Karina BELOKON, Genadij KOZHEMYAKIN, Vladyslav BENDIUH, Bohdana KOMARYSTA, Mykyta ZHAVORONKOV, Ihor KARIYAKA

STUDY OF THE THERMAL TREATMENT METHOD FOR HIGHLY MINERALIZED WASTEWATER
FROM INDUSTRIAL PRODUCTION.....17

Nataliia HNATIUK

ECOLOGICAL ASSESSMENT OF GROUNDWATER IN THE KRIVOOZERSKY DISTRICT
OF THE MYKOLAIV REGION FOR THE IMPACT OF TOXICANTS..... 29

Vladislav PARAKHNENKO, Vitaliy GONCHARUK

MECHANISMS OF STATE ENVIRONMENTAL INSPECTION FOR THE PROTECTION
OF NATURAL LANDSCAPES AND ECOLOGICAL SAFETY.....36

Olha KARAIM, Larysa CHERCHYK, Volodymyr KARAIM

THE ROLE OF GRAIN DRYER MODERNIZATION
IN THE DECARBONIZATION OF THE AGRICULTURAL DOMAIN..... 41

Volodymyr KUCHERENKO, Yuliia TAMARKINA, Anastasia REDKO, Iryna FROLOVA

ALKALI-ACTIVATED LONG-FLAME COAL.
NANOPOROUS STRUCTURE AND ABILITY TO ADSORB HEAVY METALS.....51

Maryna LADYKA, Wu RUOFAN

WATER QUALITY IN THE IRPIN RIVER IN THE POST-MILITARY PERIOD.....69

Viktoriia MELNYK-SHAMRAI, Volodymyr SHAMRAI, Iryna PATSEVA

POST-PROJECT MONITORING AS A BASIS FOR ENVIRONMENTAL ASSESSMENT
FOR BIODIVERSITY CONSERVATION IN FOREST ECOSYSTEMS..... 81

Bogdan FEN Olena DZHAM

ECOLOGICAL ASPECTS OF THE STATE OF THE FOREST FUND
OF THE KIVERTSIV FOREST DISTRICT.....90

Illia TSYHANENKO-DZIUBENKO, Viktoriia MELNYK-SHAMRAI

TOXICOLOGICAL RISKS OF FOREST RESTORATION ON TERRITORIES
WITH AMMUNITION CONTAMINATION.....96

Angelina CHUGAI, Oksana CHERNYAKOVA, Andriy MOZGOVYY, Mariia SKALOZUB

ASSESSMENT OF THE AIR BASIN STATE OF THE WESTERN UKRAINE REGIONS
IN CONDITIONS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT.....106

EDUCATIONAL, PEDAGOGICAL SCIENCES. VOCATIONAL EDUCATION

Viktoria SAVITSKA

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT
OF UNIVERSAL COMPETENCIES (SOFT SKILLS) OF FUTURE SOCIONOMIC PROFESSIONALS
IN THE CONTEXT OF DIGITAL TRANSFORMATION.....115

Ganna IAKYMENKO, Tetiana SEMYHINIVSKA

TO THE ISSUE OF THE IMPROVEMENT OF THE TRAINING SYSTEM
OF ECOLOGISTS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT PROFESSIONALS.....122

ПРОБЛЕМИ ХІМІЇ ТА СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Випуск 3

Коректура • Ірина Миколаївна Чудеснова

Комп'ютерна верстка • Марина Сергіївна Михальченко

Підписано до друку: 27.06.2025.

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсет. Цифровий друк. Ум. друк. арк. 15,57. Замов. № 1025/782. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.