

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені І. І. МЕЧНИКОВА  
ФАКУЛЬТЕТ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЇ І ЕКОЛОГІЇ



**Регіональні проблеми охорони довкілля та  
збалансованого природокористування  
Матеріали Міжнародної наукової конференції**

Одеса, Україна, 16–17 квітня 2026 року

ОДЕСА  
ОНУ імені І. І. Мечникова  
2026

MINISTRY OF SCIENCE AND EDUCATION OF UKRAINE  
ODESA I. I. MECHNIKOV NATIONAL UNIVERSITY  
FACULTY OF HYDROMETEOROLOGY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE



**Regional problems of environmental protection and  
sustainable use of natural resources**

Proceedings of International scientific conference

Odesa, Ukraine, 16–17 April 2026

ODESA  
Odesa I. I. Mechnikov National University  
2026

**УДК 502.1-027.541(06)  
Р326**

**Редактори:**

**ЧУГАЙ А. В.**, завідувачка кафедри екології та охорони довкілля, професор, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова;

**САФРАНОВ Т. А.**, професор кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова;

**ІЛІНА А. О.**, PhD з наук про Землю, старший викладач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І. І. Мечникова.

*Рекомендовано до видання вченою радою факультету  
гідрометеорології і екології ОНУ імені І. І. Мечникова.*

*Протокол № 14 від 18.06.2026 р.*

**Р326** **Регіональні** проблеми охорони довкілля та збалансованого природокористування [Електронний ресурс] : матеріали Міжнар. наук. конф. (Одеса, Україна, 16–17 квіт. 2026 р.). Електронні текстові дані (1 файл : 4,1 МБ). Одеса : ОНУ імені І. І. Мечникова, 2026. 154 с.

ISBN 978-617-8945-09-1

У збірнику представлені матеріали Міжнародної наукової конференції, які висвітлюють регіональні екологічні проблеми охорони довкілля та збалансованого природокористування, а також науково-методичні та прикладні аспекти їх вирішення.

**УДК 502.1-027.541(06)**

ISBN 978-617-8945-09-1

© Автори статей, 2026

© Одеський національний університет  
імені І. І. Мечникова, 2026

## ЗМІСТ (CONTENT)

|   |                                                                                                                                                                                                      |    |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | ЕНЕРГЕТИЧНА НЕЗАЛЕЖНІСТЬ УКРАЇНИ ТА ЄВРОСОЮЗУ: ОНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ КОНФЛІКТІВ<br><i>Т.А. Баранова, А.Р. Ляшко</i>                                                           | 7  |
| 2 | ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В УРБОСИСТЕМАХ<br><i>Д.В. Бушуєв</i>                                                                                                       | 9  |
| 3 | ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ АНТРОПОГЕННОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА ПРИКЛАДІ ТЕХНОЛОГІЙ ЗНЕВОДНЕННЯ ОСАДІВ ТА ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ<br><i>О.В. Василенко, В.Ф. Моїсєєв</i>                                        | 14 |
| 4 | МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ДАТАСЕТУ INDOOR/OUTDOOR МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ<br><i>А.Р. Васильєв, К.О. Вадурін, В.С. Бахарєв</i> | 18 |
| 5 | ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ СПЕЦІАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ НА ЛАНДШАФТНІ КОМПЛЕКСИ ХАРКІВЩИНИ<br><i>Н.В. Внукова, С.А. Трунов</i>                                                           | 22 |
| 6 | МІНІМІЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ: ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ПІДХІД ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ<br><i>В.С. Волошин, В.А. Бурко, Ю.С. Калюжна</i>                                             | 26 |
| 7 | РИЗИКИ НЕСПРИЯТЛИВИХ БІОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ В ОКРЕМИХ РЕГІОНАХ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ<br><i>Н.В. Грабко, М.Є. Романчук</i>                                                                                    | 30 |
| 8 | ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ШТУЧНИХ РИФІВ ЯК ЗАХОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЛИМАННИХ ЕКОСИСТЕМ<br><i>М.В. Грубий, Г.Г. Трохименко</i>                                        | 34 |
| 9 | ПРОБЛЕМА ВИЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЇ, ВИКОРИСТАННЯ ТА МОНЕТИЗАЦІЇ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ (НА ПРИКЛАДІ ПРИРОДНИХ СИСТЕМ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я)<br><i>М.Ю. Дьяченко, Т.А. Сафранов</i>            | 36 |

|    |                                                                                                                                                                                                     |    |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 10 | ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ГЕЛІОСИСТЕМ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОНОСІВ ІЗ КЕРОВАНИМ ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ<br><i>Е.О. Євтушенко, Б.А. Кутний</i>                                    | 42 |
| 11 | «ОСОБЛИВО СЕРЬОЗНИЙ ЗЛОЧИН» АБО ЗВИЧАЙНИЙ ЕКОЦИД?<br><i>О.О. Єрємін</i>                                                                                                                             | 47 |
| 12 | ВІДНОВЛЕННЯ ВОДНОГО ТА ЗЕМЕЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС<br><i>Ю.В. Зеленько, О.О. Єрємін, О.В. Гупало</i>                                                                      | 51 |
| 13 | ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ БІШОФІТУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ<br><i>О.Е. Ілляш, Г.В. Ганошенко</i>                                                          | 54 |
| 14 | ПЕСТИЦИДНЕ НАВАНТАЖЕННЯ НА ҐРУНТИ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ<br><i>А.О. Ільїна</i>                                                                                                                         | 55 |
| 15 | ЕКОЛОГО-АГРОХІМІЧНА ОЦІНКА ҐРУНТІВ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ<br><i>В.Г. Ільїна, А.Р. Барська</i>                                                                                                           | 60 |
| 16 | THE CURRENT STATE AN FUTURE DEVELOPMENT OF INTERNATIONAL EDUCATIONAL NETWORKS AS A TOOL FOR ENVIRMENTAL EDUCATION UNDER CRISIS CONDITIONAL<br><i>V. Khrutba, Y. Nikitchenko, I. Balykin</i>         | 63 |
| 17 | ОЦІНКА ВПЛИВУ ВОДОКОРИСТУВАЧІВ-ЗАБРУДНЮВАЧІВ НА СТАН ПОВЕРХНЕВИХ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ В МЕЖАХ ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ<br><i>А.В. Колісник</i>                                                              | 68 |
| 18 | КОНВЕКТИВНО-ДИFUЗІЙНІ МОДЕЛІ МІГРАЦІЇ ЗАБРУДНЕНЬ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА<br><i>В.В. Курятников</i>                                                                    | 74 |
| 19 | МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНТЕГРАЦІЇ ТА КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ РІЗНОРІДНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ДАНИХ У СИСТЕМІ МУНІЦИПАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ<br><i>О.С. Лелека, К.О. Вадурін, В.С. Бахарєв</i> | 78 |
| 20 | ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ГЕНЕРАЦІЇ З ПОЗИЦІЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ<br><i>А.В. Лініх, В.М. Шмандій, Т.Є. Ригас, А.Є. Мельник</i>                                    | 82 |

|    |                                                                                                                                                                                                         |     |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 21 | АНТРОПОГЕННЕ НАВАНТАЖЕННЯ У МЕЖАХ НПП «СИНЕВИР»<br><i>I.I. Lygozh, O.Yu. Suxareva, S.M. Suxarev</i>                                                                                                     | 85  |
| 22 | ОЦІНКА ВПЛИВУ МЕТОДІВ ЗНЕВОДНЕННЯ ОСАДУ СТИЧНИХ ВОД НА СТАН ТА ЯКІСТЬ ДОВКІЛЛЯ<br><i>М.А. Лук'яненко, В.Ф. Моїсєєв</i>                                                                                  | 88  |
| 23 | МЕТОДИЧНІ ПРОБЛЕМИ ОЦІНКИ РЕКРЕАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ КЛЮЧОВИХ ЛОКАЦІЙ ЗАКАРПАТТЯ<br><i>Н.В. Максименко, Є.С. Коротецька, Т. Zaninović</i>                                                                     | 90  |
| 24 | SUSTAINABLE DEVELOPMENT POLICY OF THE PUBLIC TRANSPORT COMPANY<br><i>V. Mateichyk, W. Piziorski</i>                                                                                                     | 94  |
| 25 | ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ БУДІВЕЛЬ ТА СИСТЕМИ «РОЗУМНИЙ ДІМ» ЯК ФАКТОР ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАЛОСТІ<br><i>В.О. Моздолевський</i>                                                                                       | 97  |
| 26 | АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОЇ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ<br><i>М.Ю. Монченко, асп., С.М. Юрасов</i>                                                                      | 99  |
| 27 | АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОМИСЛОВОЇ БЕЗПЕКИ ТЕРМІЧНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ВУГЛЕВОДНЕВМІСНИХ ВІДХОДІВ<br><i>М.М. Москаль., Є.В. Манойло</i>                                                  | 102 |
| 28 | ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРЯМІВ І МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ІНВАЗІЙНИХ ЗАНОСНИХ ВИДІВ НА ТЕРИТОРІЯХ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ УКРАЇНИ<br><i>Д.О. Мудрак, Є.Д. Ткач, В.І. Стародуб, О.В. Мудрак</i>          | 106 |
| 29 | ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РЕКРЕАЦІЙНІ РЕСУРСИ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ<br><i>С.П. Нагаєва</i>                                                                                                    | 110 |
| 30 | РОЗРОБКА ГІДРОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ БАСЕЙНУ РІЧКИ СИНЮХА ДЛЯ ОЦІНКИ ВОДНИХ РЕСУРСІВ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ТА ВОЄННИХ ВИКЛИКІВ<br><i>Ю.О. Наконечна</i>                                                    | 115 |
| 31 | USING MACHINE LEARNING APPROACHES TO INVESTIGATE AND PREDICT THE FINE PARTICULATE MATTER (PM <sub>2.5</sub> ) IN MONCTON CITY, NEW BRUNSWICK, CANADA<br><i>Nhi Nguyen Hoang Tuyet, Tri Nguyen-Quang</i> | 118 |
| 32 | ОСОБЛИВОСТІ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ ПЛАСТИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ В ОДЕСЬКІЙ ОБЛАСТІ<br><i>Т.І. Полушкін, Т.А. Сафранов</i>                                                                                     | 123 |

|    |                                                                                                                                                                                         |     |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 33 | ГІДРОЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ БУРШТИНСЬКОЇ ТЕС<br><i>Т.Л. Ричак</i>                                                                                                | 126 |
| 34 | ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА РАХУНОК ПЕРЕМІШУВАННЯ РАДІАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ РЕЧОВИН<br><i>Я.В. Романько, А.Г. Мєшкова</i>                                                         | 129 |
| 35 | БАР'ЄРИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУВ УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ В УКРАЇНІ<br><i>А.Є. Рябоконь</i>                                                                           | 132 |
| 36 | РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ СУМІШЕЙ В ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВКАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ<br><i>Т.М. Серга</i>                                                                 | 136 |
| 37 | ПРОСТОРОВО-ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТУРИСТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЕРИТОРІАЛЬНІ ГРОМАДИ ТУРИЗМ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ (НА ПРИКЛАДІ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)<br><i>І.Є. Смик, Л.М. Архипова</i> | 139 |
| 38 | ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М. ЧЕРКАСИ ТА АНАЛІЗ НЕКАНЦЕРОГЕННИХ РИЗИКІВ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ<br><i>О.М. Хоменко, М.В. Перцьовий</i>                           | 143 |
| 39 | ОЦІНКА ЗАБРУДНЕНOSTІ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ҐРУНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ СТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ<br><i>Д.В. Шелінговський, Т.А. Сафранов</i>                                             | 146 |
| 40 | АРХІТЕКТУРА ПОТОКІВ ДАНИХ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРИ<br><i>Д.В. Шиманський</i>                                                                                    | 150 |

# **ЕНЕРГЕТИЧНА НЕЗАЛЕЖНІСТЬ УКРАЇНИ ТА ЄВРОСОЮЗУ: ОНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ ГЛОБАЛЬНИХ КОНФЛІКТІВ**

***Т.А. Баранова, ст. викл., А.Р. Ляшко, студ.***

*Дніпровський металургійний інститут Українського державного  
університету науки і технологій, м. Дніпро, Україна  
sisoeva79@gmail.com*

Енергетичний сектор у сучасних умовах відіграє ключову роль у забезпеченні економічної стабільності держав, конкурентоспроможності промисловості та національної безпеки. Події після 2022 року переконливо довели, що енергетика перестала бути виключно економічною сферою та перетворилася на один із центральних елементів геополітичного протистояння. Російська федерація системно використовувала енергетичні ресурси як інструмент політичного тиску, що особливо яскраво проявилось у відносинах з країнами Європейського Союзу та Україною.

До початку повномасштабної війни енергетична співпраця між ЄС і РФ характеризувалася високим рівнем взаємозалежності. У 2021 році частка російського газу в імпорті Європейського Союзу перевищувала 40 %, а в окремих країнах Центральної та Східної Європи сягала понад 60 % [1]. Така структура імпорту формувала значні довгострокові ризики, пов'язані з монопольним становищем постачальника, політичною вразливістю та відсутністю ефективних альтернатив.

Для України війна стала безпрецедентним викликом для всієї енергетичної системи. Масштабні руйнування об'єктів генерації, мереж передачі та розподілу електроенергії призвели не лише до тимчасових відключень, а й до структурного переосмислення ролі енергетики у післявоєнному відновленні країни [2].

Енергетична трансформація у сучасній науковій літературі розглядається як багатовимірний процес, що охоплює технологічні, економічні, екологічні та інституційні зміни. Відповідно до підходів Міжнародного енергетичного агентства, цей процес включає поступову відмову від викопних джерел енергії, масштабний розвиток відновлюваної генерації (сонячної та вітрової), цифровізацію енергетичних мереж та впровадження систем накопичення енергії [3].

Особливістю енергетичної трансформації в умовах війни є поєднання довгострокових цілей декарбонізації з короткостроковими завданнями забезпечення безперебійного енергопостачання. У цьому контексті енергетична безпека трансформується і включає здатність енергосистеми функціонувати в умовах фізичних пошкоджень, кібератак, дефіциту палива та порушення логістичних ланцюгів [4].



Традиційна модель енергетики з домінуванням великих централізованих електростанцій виявилася вразливою до цілеспрямованих атак. Децентралізація передбачає розвиток локальної генерації, мікромереж та автономних енергетичних комплексів. У воєнних умовах такий підхід дозволяє значно підвищити живучість енергосистеми та зменшити ризики каскадних відключень.

Для промисловості децентралізовані енергетичні рішення мають особливе значення, оскільки забезпечують безперервність технологічних процесів та знижують залежність від зовнішніх мереж [5]. Це вимагає впровадження систем накопичення енергії (BESS), які забезпечують балансування навантаження, резервне живлення та згладжування піків споживання.

Також «зелений» водень розглядається як один із ключових елементів майбутньої енергетичної системи Європи. Він дозволяє акумулювати надлишкову електроенергію з відновлюваної генерації (сонячної та вітрової) та використовувати її у важкій промисловості, де пряме електрифікування є технічно складним – наприклад, у металургії чи хімічній галузі [6]. Україна має потенціал стати стратегічним партнером ЄС у цій сфері завдяки наявності значних площ для відновлюваної генерації та інтегрованій газотранспортній інфраструктурі.

Ще одним відновлюваним паливом є біометан, який може повністю замінювати природний газ без зміни існуючого промислового обладнання. За оцінками експертів, потенціал виробництва біометану в Європі є значним, а для України це створює унікальну синергію з аграрним сектором, дозволяючи перетворювати відходи сільського господарства на енергетичний ресурс [7].

Сучасна трансформація неможлива без інтелектуальних систем управління мережами. Технології розумної енергосистеми (від англ. Smart Grid) дозволяють [8]:

1. Автоматично перерозподіляти потоки енергії у разі аварійних пошкоджень ліній.
2. Інтегрувати тисячі дрібних виробників відновлюваної генерації (сонячної та вітрової) у єдину систему.
3. Оптимізувати енергоспоживання великих підприємств, що знижує собівартість продукції та підвищує її конкурентоспроможність.

Таким чином, сучасна трансформація енергетичного сектора Європи та України в умовах збройного конфлікту є складним системним процесом, що інтегрує питання декарбонізації, енергонезалежності та фізичної стійкості інфраструктури. Фундаментом цього процесу є відмова від російських енергоносіїв згідно зі стратегією REPowerEU [9]. Впровадження децентралізованих моделей управління, розвиток водневих технологій та систем накопичення енергії формують основу сталого післявоєнного

розвитку. Для України це не лише питання виживання, а й шлях до повної інтеграції в європейський енергетичний простір та економіку майбутнього.

### **Перелік посилань**

1. Security of gas supply / European Commission. Brussels, 2021. URL: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/security-gas-supply\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-security/security-gas-supply_en) (дата звернення: 19.03.2026).
2. Ukraine Energy Damage Assessment / Energy Community Secretariat. Vienna, 2023. URL: <https://www.energy-community.org/Ukraine/overview.html> (дата звернення: 19.03.2026).
3. World Energy Outlook 2024 / International Energy Agency. Paris, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> (дата звернення: 19.03.2026).
4. Ukraine's Energy Security and the Coming Winter / International Energy Agency. Paris, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter> (дата звернення: 19.03.2026).
5. Energy Storage Solutions for Power Delivery / Black & Veatch. URL: <https://www.bv.com/what-we-do/power-delivery/energy-storage> (дата звернення: 19.03.2026).
6. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe / European Commission. Brussels : EUR-Lex, 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301> (дата звернення: 19.03.2026).
7. EBA Statistical Report 2024: European Biomethane Landscape / European Biogas Association. 2024. URL: <https://www.europeanbiogas.eu/publication/eba-statistical-report-2024/> (дата звернення: 19.03.2026).
8. Smart Grids: Tracking Clean Energy Progress / International Energy Agency. Paris, 2024. URL: <https://www.iea.org/energy-system/electricity/smart-grids> (дата звернення: 19.03.2026).
9. REPowerEU Plan: Affordable, Secure and Sustainable Energy for Europe / European Commission. Brussels, 2022. URL: [https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu\\_en](https://commission.europa.eu/topics/energy/repowereu_en) (дата звернення: 19.03.2026).

## **ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СИТУАЦІЇ ПРОЦЕСІВ СТАЛОГО РОЗВИТКУ В УРБОСИСТЕМАХ**

***Д.В. Бушуєв, асп.***

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,*

*м. Одеса, Україна*

*danilbgm20@gmail.com*

Одним із головних завдань сучасного суспільства є управління екологічними аспектами урбанізації і забезпечення стійкого та збалансованого соціально-економічного розвитку урбанізованих територій. Сучасний розвиток людства часто зводиться до економічного розвитку і не враховує екологічної складової, проте саме вона визначає умови життєдіяльності людини і, зрештою, соціально-економічний розвиток громад і територій.

Динаміка розвитку екологічної політики зумовлена зростанням обізнаності населення в галузі екологічних проблем, їхніх міжнародних аспектів та взаємозв'язків з економічними і соціальними проблемами. Пріоритети екологічної політики змінювалися з роками, а саме перейшли з попиту на екологічну інформацію, пов'язану з формуванням та реалізацією екологічної політики і її впливом на стан навколишнього середовища (НС), до попиту на надійну, узгоджену та легко зрозумілу інформацію з боку екологічної спільноти, бізнес-сектора, широкої громадськості, державних та приватних організацій з питань екології та інших зацікавлених сторін. Враховуються також процеси розвитку міжнародної діяльності та співпраці в галузі охорони НС [5].

Взаємодія економічного та соціального процесів виявляються в тому, що економічні досягнення сприяють досягненню пріоритетних цілей соціальних аспектів сталого розвитку урбосистеми, таких як підвищення рівня життя населення і забезпечення якісного довкілля, створення ширшого доступу до послуг охорони здоров'я, створення нових робочих місць і покращення умов праці, отримання належного рівня освіти в усіх формах (формальної, неформальної та інформальної) [1].

Моделювання екологічної ситуації є потужним інструментом, який надає змогу оцінити виклики та врахувати ефекти зворотного зв'язку, які об'єднують екологічні, економічні та соціальні системи в єдину взаємодіючу систему [4].

Екологічні проблеми є досить складними динамічними процесами, тож розуміння причинно-наслідкових зв'язків за допомогою системних моделей для впровадження належної політики забезпечення сталого розвитку урбосистеми є важливою науково-практичною задачею [4]. Методи моделювання екологічних систем надають можливість отримати прогнози конкретних змін, на основі яких розробляються заходи зменшення, запобігання або усунення шкідливих наслідків впливу на НС [2].

PSR-модель (англ. *Pressure-State-Response* – *Вплив-Стан-Реакція*) була розроблена OECD (англ. *Organisation for Economic Co-operation and Development* – *Організація економічного співробітництва та розвитку*), в першу чергу, для систематизації її роботи в галузі екологічної політики та звітності, і враховує те, що: людська діяльність має значний вплив на НС та на його якість та кількість природних ресурсів, тобто на його стан; реакція суспільства на такі зміни відбувається через зміни в усвідомленні та поведінці, і через екологічну, загальну економічну та галузеву політику [3].

Усі наведені вище основні чинники екологічної ситуації в урбосистемі при процесах сталого розвитку можна сформулювати у вигляді такої PSR-моделі (рис. 1):

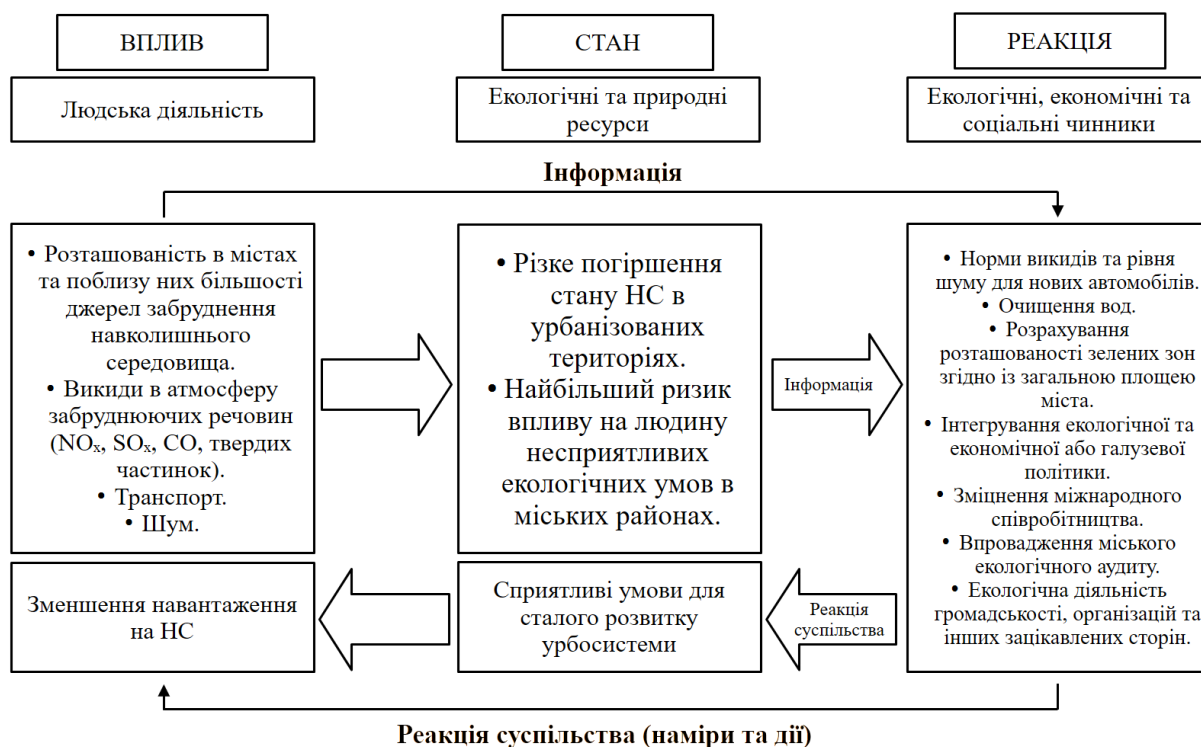


Рисунок 1 – PSR-модель формування екологічної ситуації сталого розвитку в урбосистемі (розроблено автором на основі [5])

Людська діяльність має негативний вплив на НС, зокрема на природні ресурси і здоров'я населення. Умови НС взаємопов'язані з її якістю та кількістю природних ресурсів. Реакція суспільства вказує на ступінь реакції у відповідь на екологічні проблеми, що має позитивні наслідки, у вигляді зменшення навантаження на НС.

Кожен аспект функціонування міста і його взаємодію з НС можна охарактеризувати за допомогою індикаторів.

Індикатори формуються на основі даних і визначаються як величина, що надає інформацію про певне явище, тобто надає можливість виміряти його поточний стан та динаміку розвитку, які дозволяють узагальнити характеристики системи та висвітлити те, що в ній відбувається. Певний індикатор може застосовуватися до багатьох екологічних проблем [3].

За критеріями вибору індикаторів за корисністю та актуальністю для користувачів з соціальної точки зору екологічний індикатор повинен:

- 1) надавати репрезентативну картину екологічних умов, навантажень на НС або реакцію суспільства;
- 2) має реагувати на зміни у НС та бути пов'язаним з людською діяльністю [3].

Індикатори *впливу*, *стану* і *реакції* у загальній PSR-моделі мають загальні визначення та складові компоненти.

Індикатори *впливу* на НС описують антропогенну діяльність, враховуючи якість та кількість природних ресурсів. Вони поділяються на такі два пункти:

- 1) індикатори безпосереднього впливу, які виражають вплив на НС у вимірах викидів або споживання природних ресурсів;
- 2) індикатори непрямого впливу, які виражають фонові показники людської діяльності, яка призводить до безпосереднього впливу на НС [3].

Індикатори *стану* стосуються як якості НС, так і якості та кількості природних ресурсів, тобто вони розробляються так, щоб у результаті отримати загальну картину екологічної ситуації / стану НС і його розвитку з часової точки зору, а не впливу на нього. Враховуючи те, що на практиці розмежування між індикаторами стану НС та впливом може бути нечітким, а оцінка екологічного стану може бути складною або дороговартісною, то оцінка впливу на НС часто використовується як заміна оцінки умов НС [3].

До індикаторів *реакції суспільства* входять індивідуальні та колективні дії, які спрямовані на:

- 1) запобігання, зменшення і адаптацію до негативних екологічних наслідків, спричинених людською діяльністю;
- 2) зупинення чи усунення вже завданої шкоди НС;
- 3) збереження та охорону довкілля та природних ресурсів [3].

В рамках програми ОЕСД основною метою діяльності з оцінки екологічних індикаторів, спрямованих на сприяння сталого розвитку, є поліпшення індивідуальних та колективних показників у сфері контролю стану довкілля задля досягнення: меншого загального рівня забруднення та раціонального природокористування за принципами сталого розвитку; інтегрованої екологічної та економічної або галузевої політики; зміцнення міжнародного співробітництва [3].

При використанні індикаторів реакції суспільства задля уникнення неправильного тлумачення треба враховувати те, що деякі з них досі перебувають у розробці як у концептуальному плані, так і в плані доступності даних. Окрім цього, виникають такі важливі моменти:

- 1) коли індикатори відображають ефект зворотного зв'язку реакції суспільства на техногенне навантаження, то різниця між індикаторами реакції суспільства та техногенного навантаження може стати нечіткою;
- 2) індикатори реакції суспільства обмежуються реакціями, які можна виміряти в кількісному вираженні [3];
- 3) оцінювання ефективності індикаторів відбувається з урахуванням екологічних, економічних, соціальних, географічних та структурних особливостей певної країни [3].

У просторовому вимірі полягає головна відмінність між індикаторами оцінки сталого розвитку урбосистем, тобто при оцінюванні ефективності індикаторів сталого розвитку урбосистем, важливо враховувати географічні особливості країни, оскільки вони можуть впливати на результати.

Показники реакції суспільства на міські екологічні проблеми охоплюють весь спектр заходів, тому не існує єдиного основного індикатора. Як показує аналіз, ключовими сферами для індикаторів є транспорт, тобто норми викидів та рівень шуму для нових автомобілів, та зелені насадження, які розраховуються згідно змін у порівнянні із загальною площею міста. Враховуються також витрати на боротьбу із шумом та на очищення води [3].

За даними OECD, в міських районах або поблизу них розташовано більшість джерел забруднення, що призводить до різкого погіршення стану НС в урбанізованих територіях – ці два фактори разом вказують на найбільший ризик впливу на людину несприятливих екологічних умов саме в міських районах. В міському масштабі, за вибором показників варто зосередитися на основних техногенних навантаженнях, таких як: викиди в атмосферу забруднюючих речовин ( $NO_x$ ,  $SO_x$ ,  $CO$ , твердих частинок) та шум.

За даними Європейської комісії для забезпечення оцінки стану окремих міст, надання доступу до даних з метою порівняння і сприяння процесу обміну інформацією між містами треба використовувати *міський екологічний аудит*.

Індикатори міського екологічного аудиту охоплюють такі сфери: соціально-економічні аспекти, участь у громадському житті, освіта та професійна підготовка, НС, культура та дозволи. Оцінити досягнення та конкретні проблеми міст дозволить порівняння результатів за цими індикаторами.

Індикатори надають змогу сформувати ключові чинники взаємодії суспільства з НС, а розподіл їхньої ролі у сталому розвитку урбосистеми надає можливість змодельовати ці процеси, враховуючи екологічну ситуацію в місті.

Діяльність суспільства в межах урбосистеми має негативний техногенний вплив на НС, який погіршує його стан і здоров'я людей, проте діяльність суспільства також має здатність управляти екологічною ситуацією, обмежувати техногенний вплив та запроваджувати інструменти поліпшення екологічного стану. Реакція суспільства є головним чинником формування екологічної ситуації процесів сталого розвитку урбосистеми, бо від неї залежать інші показники екологічної ситуації. Як свідчить аналіз, створенню сприятливих умов для сталого розвитку урбосистеми та зменшенню навантаження на НС сприяють: обмеження емісії забруднюючих речовин, що надходять у довкілля з викидами, скидами і стічними водами, розвиток системи озеленення населених місць і рекреаційних територій, інтегрування екологічної складової в соціально-економічний розвиток, розвиток широкої взаємодії громадськості та органів управління, екологічна освіта та інновації, інвестування в зелені технології, науку та дослідження тощо.

### Перелік посилань

1. Тарасенко Д.Л. Моделювання еколого-економічних процесів для забезпечення ефективної соціальної політики у сталому регіональному зростанні. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія Економіка і управління*. 2018. Т. 29 (68). № 5. С. 129 – 133.
2. Янковська Л., Яворівський Р., Сверстюк С. Наукові підходи до моделювання екологічних систем і процесів. *Цифрова економіка як фактор інновацій та сталого розвитку суспільства*. Вид. ТНТУ ім. Івана Пулюя. С. 198 – 200.
3. Environment monographs № 83: OECD core set of indicators for environmental performance reviews. Paris: OECD, 1993. 38 p.
4. Madear G., Madear C. Environmental modelling – a modern tool towards sustainability. *MATEC Web of Conferences 342, Universitaria Simpro*. 2021. 8 p.
5. Towards an urban atlas: assessment of spatial data on 25 European cities and urban areas / C. Lavalle, L. Demicheli, M. Kasanko and oth. Copenhagen: EEA, 2002. 131 p.

### ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ЕКОЛОГІЗАЦІЇ АНТРОПОГЕННОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА ПРИКЛАДІ ТЕХНОЛОГІЙ ЗНЕВОДНЕННЯ ОСАДІВ ТА ПЕРЕРОБКИ ВІДХОДІВ

**О.В. Василенко, асп., В.Ф. Мойсєєв, к.т.н., проф.**

*Національний технічний університет*

*«Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна,*

*anton.vasylenko@mit.khpi.edu.ua*

Сучасний розвиток суспільства супроводжується значним зростанням антропогенного навантаження на довкілля, що проявляється у збільшенні обсягів утворення відходів, забрудненні водних ресурсів, ґрунтів та атмосферного повітря. Щороку у світі утворюються мільярди тонн промислових, побутових та біологічних відходів, значна частина яких не піддається ефективній переробці та накопичується на полігонах.

Особливу небезпеку становлять органічні відходи та осади стічних вод, які характеризуються високим вмістом органічних речовин, поживних елементів і забруднюючих компонентів. У процесі їх розкладу утворюються фільтрати, що містять амонійний азот, фосфати, калій, а також абразивні домішки, які ускладнюють їх подальшу обробку.

У зв'язку з цим актуальним є впровадження сучасних підходів до екологізації антропогенної діяльності, що передбачають зменшення негативного впливу на довкілля шляхом використання енергоефективних і ресурсозберігаючих технологій.

Метою роботи є визначення основних напрямків екологізації антропогенної діяльності та обґрунтування ефективності їх реалізації на прикладі сучасних технологій зневоднення осадів і переробки відходів.

Екологізація антропогенної діяльності передбачає впровадження комплексу заходів, спрямованих на зменшення негативного впливу

виробничих і побутових процесів на довкілля. До основних напрямків можна віднести:

#### *1. Зменшення утворення відходів*

Одним із ключових принципів є мінімізація утворення відходів на етапі виробництва та споживання. Це досягається шляхом оптимізації технологічних процесів, впровадження маловідходних технологій та повторного використання ресурсів.

#### *2. Переробка та утилізація відходів*

Сучасні підходи передбачають активне використання методів переробки органічної фракції відходів, зокрема компостування та анаеробного зброджування. Анаеробне зброджування дозволяє не лише зменшити обсяг відходів, але й отримати біогаз як відновлюване джерело енергії.

#### *3. Впровадження енергоефективних технологій*

Важливим напрямком є використання технологій, що забезпечують високу ефективність при мінімальних енергетичних витратах. У сфері обробки осадів такими рішеннями є сучасні механічні системи зневоднення, які поєднують процеси згущення, флокуляції та пресування.

#### *4. Реалізація принципів циркулярної економіки*

Циркулярна економіка передбачає повторне використання матеріалів і ресурсів. У контексті поводження з відходами це означає використання продуктів переробки (осаду, фільтрату) як вторинної сировини, наприклад, для виробництва добрив або технічної води.

Одним із найбільш проблемних етапів у системах очищення стічних вод та переробки відходів є зневоднення осадів. Осади, що утворюються після біологічної або фізико-хімічної обробки, мають високу вологість, значний вміст дрібнодисперсних частинок та абразивних домішок, що ускладнює їх обробку традиційними методами.

Традиційні технології, такі як центрифуги та стрічкові преси, характеризуються високими енергетичними витратами, швидким зношуванням обладнання та нестабільною роботою в умовах підвищеної абразивності середовища.

Ефективність сучасних технологій зневоднення осадів значною мірою визначається конструктивними особливостями обладнання. Одним із перспективних рішень у цій сфері є роликові дегідратори типу XJD, які поєднують у собі процеси згущення, флокуляції та механічного зневоднення в одному технологічному модулі.

Конструктивно роликовий дегідратор складається з двох основних функціональних блоків: блоку підготовки осаду та блоку механічного зневоднення. Блок підготовки включає резервуар, розділений на дві камери, у яких здійснюється дозування та флокуляція осаду. У першій камері відбувається рівномірна подача осаду, тоді як у другій – інтенсивне



перемішування з флокулянтном за допомогою мішалки, що забезпечує утворення стійких агрегованих флокул.

Після стадії підготовки осад подається у зону зневоднення, де реалізується основний технологічний процес. Фільтрувальний модуль роликового дегідратора являє собою систему валиків складеної конструкції, що складаються з чергування тонких металевих і товстих полімерних дисків. Між дисками утворюються вузькі щілини, через які проходить рідка фаза, тоді як тверді частинки затримуються на поверхні фільтрувального елемента.

Особливістю конструкції є постійний обертальний рух сусідніх дисків, який створює ефект самоочищення фільтрувальної поверхні. Це дозволяє уникнути забруднення та закупорювання щілин навіть при роботі з осадами, що містять значну кількість абразивних домішок, таких як пісок або склобій.

Фільтрувальні валики розташовані у два яруси, причому відстань між ними поступово зменшується у напрямку руху осаду. Така конфігурація забезпечує поетапне ущільнення матеріалу: спочатку відбувається гравітаційне згущення, після чого реалізується механічне стискання з наростаючим тиском. У фінальній зоні ролики обертаються з меншою швидкістю, що дозволяє підвищити ступінь зневоднення за рахунок додаткового пресування.

На виході з установки зневоднений осад надходить до приймального жолоба, обладнаного регульованою перегородкою. Цей елемент створює зворотний гідравлічний тиск, що дає змогу регулювати ступінь ущільнення осаду залежно від його фізико-хімічних характеристик.

Важливою перевагою роликових дегідраторів є відсутність фільтрувальних тканин або мембран, які традиційно використовуються у стрічкових пресах. Це значно знижує ризик забруднення та витрати на технічне обслуговування. Крім того, робота обладнання здійснюється при низьких швидкостях обертання, що забезпечує зменшення енергоспоживання та підвищення довговічності конструктивних елементів.

Завдяки поєднанню конструктивної простоти, енергоефективності та високої стійкості до абразивного зносу роликові дегідратори демонструють стабільну роботу в умовах змінного складу осаду. Це робить їх універсальним рішенням для використання у муніципальних і промислових системах очищення стічних вод, а також у біогазових комплексах.

Таким чином, конструкція роликових пресів забезпечує не лише ефективне зневоднення осадів, але й підвищення загальної екологічної ефективності технологічних процесів за рахунок зниження енергетичних витрат, скорочення обсягів відходів та можливості подальшого використання продуктів переробки.

Використання сучасних технологій зневоднення осадів і переробки відходів забезпечує комплексний екологічний ефект, який проявляється у:

1. зменшенні обсягів відходів, що підлягають захороненню;

2. зниженні навантаження на полігони та навколишнє середовище;
3. скороченні енергоспоживання та викидів парникових газів;
4. підвищенні ефективності використання ресурсів;
5. формуванні замкнених циклів поводження з відходами.

Таким чином, впровадження інноваційних технологій у сфері поводження з відходами є важливим інструментом реалізації принципів сталого розвитку.

У роботі визначено основні напрямки екологізації антропогенної діяльності, серед яких ключове значення мають мінімізація утворення відходів, їх переробка, впровадження енергоефективних технологій та розвиток циркулярної економіки.

Показано, що сучасні технології зневоднення осадів, зокрема роликові дегідратори, є ефективним інструментом зниження негативного впливу на довкілля. Їх застосування дозволяє підвищити ефективність обробки відходів, зменшити енергетичні витрати та створити умови для повторного використання ресурсів.

Отримані результати підтверджують доцільність впровадження інноваційних технологічних рішень у сфері поводження з відходами як одного з ключових напрямків екологізації антропогенної діяльності.

### Перелік посилань

1. Бузіна І.М., Рябченко В.С. Переробка органічної складової твердих побутових відходів шляхом компостування. *Сучасний стан науки в сільському господарстві та природокористуванні: теорія і практика: зб. матеріалів конф.* Тернопіль, 2020. С. 29 – 30.
2. Горобець О.В., Галіцький В.А. Перспективні напрями утилізації органічних відходів. *Наука. Молодь. Екологія – 2016: зб. матеріалів конф.* Житомир, 2016. С. 97 – 102.
3. Шумило К.П., Белянська О.Р., Красніков К.С., Мірошніченко Н.В. Дослідження енергоекологічного методу переробки промислово-побутових відходів. *Актуальні наукові дослідження у сучасному світі.* 2019. № 8 (52). С. 75 – 80.
4. Утилізація та переробка відходів. Технології, способи, методи переробки відходів. URL: <http://business-idea.com.ua/>
5. Perrot J.-F., Subiantoro A. Municipal Waste Management Strategy Review and Waste-to-Energy Potentials in New Zealand. *Sustainability.* 2018. Vol. 10.
6. Fu Y., Luo T., Mei Z., Li J., Qiu K., Ge Y. Dry Anaerobic Digestion Technologies for Agricultural Straw and Acceptability in China. *Sustainability.* 2018. Vol. 10.
7. Białecka B. Waste management in the agri-food industry in the Silesian Voivodeship. *Problems of Ecology.* 2008. Vol. 12(1). P. 28 – 32.
8. Novak J.T., Oleszkiewicz J.A. Dewatering of Wastewater Sludge: A Critical Review. *Water Environment Research.* 2007. Vol. 79 (2). P. 123 – 132.
9. Gutierrez J., Smith A., Li H. Wear Resistance in Industrial Dewatering Technologies. *Journal of Environmental Engineering.* 2020. Vol. 146 (2).
10. Wang T., Zhang L., Liu M. Centrifuge Performance in Wastewater Sludge Dewatering. *Water Research.* 2022. Vol. 215.
11. Wakeman R. Separation technologies for sludge dewatering. *Journal of Hazardous Materials.* 2007. Vol. 144 (3). P. 614 – 619.

12. Mahmoud A., Hoadley A., Citeau M. et al. Electro-dewatering process performance for wastewater sludge. *Water Research*. 2018. Vol. 129. P. 66 – 82.

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ДАТАСЕТУ INDOOR/OUTDOOR МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ПЕРСОНАЛІЗОВАНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

*А.Р. Васильєв, К.О. Вадурін, В.С. Бахарєв*  
*Кременчуцький національний університет*  
*імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна*  
kir3337@gmail.com

**Актуальність дослідження.** Традиційні системи муніципального моніторингу якості атмосферного повітря базуються на стаціонарних постах, які забезпечують високу точність вимірювань, проте мають низьку просторову роздільну здатність. Це створює фундаментальну проблему екологічної епідеміології – «інформаційний розрив» (експозиційну невизначеність). Більшість міського населення проводить 80 – 90 % часу в закритих приміщеннях, де концентрації поллютантів ( $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ ,  $VOCs$ ) суттєво відрізняються від зовнішніх фонових значень через специфічні внутрішні джерела емісії та особливості інфільтрації.

Згідно з дослідженнями [1], оцінки експозиції, що базуються виключно на даних найближчої стаціонарної станції, систематично недооцінюють ризики для мобільних груп населення. Динаміка переміщення містом створює пікові навантаження, особливо у транспортних «гарячих точках». Патолофізіологічна значущість цього розриву доведена у роботах [2]: короткострокові пікові експозиції, які не фіксуються муніципальними станціями, є критичними предикторами ексацерації респіраторних захворювань (наприклад, ХОЗЛ).

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика парадигм моніторингу якості  
повітря

| Параметр порівняння            | Муніципальний моніторинг | Персоналізований моніторинг              |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| Об'єкт спостереження           | Територіальна одиниця    | Конкретний індивід (агент)               |
| Просторова роздільна здатність | Низька (кілометри)       | Висока (метри, мікросередовища)          |
| Часова роздільна здатність     | Середня (години, доби)   | Висока (хвилини, секунди)                |
| Цільовий показник              | ГДК                      | Інтегральна доза та індивідуальний ризик |

Впровадження портативних сенсорів дозволяє ідентифікувати патерни поведінки, що ведуть до надмірної експозиції [3]. Проте для коректного розрахунку дози необхідно визначати контекст перебування людини, який безпосередньо впливає на об'єм легеневої вентиляції [4]. Формула індивідуальної експозиції  $E$  за час  $T$  має вигляд:

$$E(T) = \int_0^T C(t, L(t)) \cdot \alpha(P(t)) dt,$$

де  $C$  – концентрація полютанта,  $L(t)$  – локація,  $\alpha$  – коефіцієнт інтенсивності дихання, залежний від фізіологічного стану  $P(t)$ . Традиційні станції ігнорують змінні  $L$  та  $P$ , що зумовлює актуальність переходу до багаторівневих систем збору даних.

**Мета роботи та завдання формування емпіричної бази даних.** Метою етапу є розробка методології формування гетерогенного датасету як доказової бази для оцінки персоналізованих ризиків. Досягнення мети передбачає вирішення таких підзавдань:

1. Синхронізація даних муніципальних постів (як референтних) та портативних пристроїв для алгоритмів динамічного калібрування.

2. Фіксація метаданих мікроклімату та активності, оскільки вони значно підвищують точність оцінки дози [5]. База повинна містити часові ряди концентрацій, метеопараметри, біометричні дані та геопросторові треки.

3. Охоплення різноманітних сценаріїв життєдіяльності для розробки моделей «вплив-реакція», що дозволить прогнозувати ризик загострення хвороб [6].

Наукова новизна формування бази полягає в архітектурі злиття даних, де високочастотні персональні показники збагачуються високоточними муніципальними значеннями. Цей масив стане фундаментом для короткострокового прогнозування ризиків методами машинного навчання [7]. У прикладному аспекті це дозволить створити PRAISE-НК-подібні системи для керування власними ризиками здоров'я у реальному часі [8].

**Обґрунтування апаратного забезпечення вимірювального комплексу.** Основними критеріями вибору сенсорного обладнання визначено мобільність, селективність, енергоефективність та фокус на ключових маркерах ризику. Сконструйований вимірювальний комплекс складається зі стаціонарних *indoor*-станцій та портативних експозиметрів. Характеристики модулів наведено у табл. 2.

Апаратна архітектура базується на мікроконтролері ESP32-S3 (Wi-Fi/BLE), що забезпечує автономність до 16 год. Оскільки на показники оптичних датчиків пилу впливає гігроскопічний ріст частинок, передбачено апаратний збір даних про відносну вологість ( $RH$ ) для математичної компенсації сигналу:

$$C_{corr} = \frac{C_{raw}}{1 + \kappa \cdot \frac{RH}{100 - RH}},$$

де  $C_{raw}$  – сире значення,  $\kappa$  – коефіцієнт гігроскопічності.

Таблиця 2 – Технічні характеристики сенсорних модулів комплексу.

| Параметр               | Сенсорний модуль | Технологія                | Діапазон                        | Похибка                        |
|------------------------|------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| $PM_{2.5}$ / $PM_{10}$ | Sensirion SPS30  | Лазерне розсіювання       | 0–1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\pm 10\%$                     |
| $CO_2$                 | Sensirion SCD4x  | Фотоакустична             | 400–5000 ppm                    | $\pm(30 \text{ ppm} + 3\%)$    |
| VOCs / IAQ             | Bosch BME680     | Металооксидна             | 0–500 (індекс)                  | $\pm 15\%$                     |
| T / RH                 | BME680 / SCD4x   | Напівпровідникова/Ємнісна | -40 – +85 °C / 0–100%           | $\pm 0,5 \text{ °C} / \pm 3\%$ |

**Розробка методології збору даних та синхронізації.** Методологія регламентує проведення натурних вимірювань у трьох вимірах: часовому, просторовому та контекстуальному. Портативний сенсор фіксується у «дихальній зоні» (на рівні грудей). Частота дискретизації встановлена на рівні 1/60 Гц (1 вимірювання/хв) для адекватної фіксації різких градієнтів концентрації при зміні середовищ.

Процес синхронізації включає:

- Часову прив'язку через сервери NTP.
- Просторову фіксацію через GNSS-модуль смартфона.
- Indoor/outdoor синхронізацію на основі аналізу SSID Wi-Fi та сили GPS-сигналу.

- Калібрувальну ко-локацію портативних пристроїв із муніципальними станціями (60 хв.) для визначення регресійних коефіцієнтів зміщення.

Повнота даних (*Data Completeness Score, DCS*) вимагається на рівні  $> 95 \%$ . Отриманий запис має тензорну структуру:

$$D_i = \{\tau_i, \phi_i, \lambda_i, C_{PM}, C_{CO_2}, C_{VOC}, T, RH, Env_{Tag}, Act_{Label}\},$$

що є оптимальною базою для подальшого навчання RNN-мереж (LSTM/GRU).

**Дизайн попередніх експериментів та сценарії життєдіяльності.** Дизайн експериментів імітує типову добову активність міського жителя, розподілену на чотири ключові мікросередовища з різними режимами повітрообміну (табл. 3).

Таблиця 3 – Параметри експериментальних сценаріїв.

| Мікросередовище | Пріоритетні показники           | Час          | Ключові фактори впливу             |
|-----------------|---------------------------------|--------------|------------------------------------|
| Квартира        | $PM_{2.5}$ , VOCs, RH           | 10 – 12 год. | Провітрювання, побутова діяльність |
| Офіс            | $CO_2$ , T, VOCs                | 6 – 8 год.   | Щільність персоналу, вентиляція    |
| Транспорт       | $PM_{10}$ , $NO_2$ , $PM_{2.5}$ | 1 – 2 год.   | Трафік, тип авто, рециркуляція     |
| Вулиця/Парк     | $PM_{2.5}$ , $PM_{10}$          | 1 – 3 год.   | Метеоумови, віддаленість від доріг |

Сценарії повторюються у різні дні тижня та за різних метеоумов. Особлива увага приділяється фіксації «перехідних зон» (вхід/вихід з приміщень), де параметри змінюються стрибкоподібно.

**Процедура формування датасету та очищення даних.** Формування цілісного масиву базується на принципах ETL. Етап злиття об'єднує потоки з персональних пристроїв та API муніципальних мереж з ресемплінгом до 1-хвилинного кроку. Просторово-часова прив'язка здійснюється алгоритмами time-based join.

Первинне очищення від апаратних аномалій включає: видалення періодів «прогріву» сенсорів (до 300 с), фільтрацію нефізичних викидів, усунення імпульсних перешкод ковзним медіанним фільтром та компенсацію температурного дрейфу газових датчиків.

Фінальним етапом є розрахунок «інформаційного розриву»  $G$  між персональною експозицією  $C_{pers}$  та муніципальним фоном  $C_{muni}$ :

$$G(t) = C_{pers}(t) - C_{muni}(t).$$

Датасет зберігається у форматі Parquet для забезпечення високої швидкості доступу при статистичному моделюванні.

**Висновки та перспективи.** Сформовано унікальний гетерогенний датасет (> 500 год. синхронних вимірювань), що вирізняється високою дискретизацією, точним контекстним маркуванням та відсутністю апаратних артефактів. Доведено наявність значного «інформаційного розриву» між загальноміськими даними та персональною експозицією.

Створена база є фундаментом для розробки математичної моделі розрахунку інтегрального індексу персонального ризику  $I_{risk}$ , що базується на обчисленні накопиченої дози, зваженої на фізіологічний статус.

Подальші дослідження будуть спрямовані на навчання рекурентних нейромереж для прогнозування трендів накопичення ризику та розробку алгоритмів «зеленої маршрутизації».

### Перелік посилань

1. Bashan N.F., Zhang Y., Bell M.L., Wang Q.R. Mobility-driven estimate reveals elevated air pollution exposure and socioeconomic disparities beyond residence-based approaches in Boston. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1038/s41370-025-00820-z>.
2. Atzeni M., Cappon G., Quint J.K. et al. A machine learning framework for short-term prediction of chronic obstructive pulmonary disease exacerbations using personal air quality monitors and lifestyle data. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, no. 1. Art. 2385. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-85089-2>.
3. Bernasconi S., Angelucci A., Rossi A., Aliverti A. A New Wearable System for Personal Air Pollution Exposure Estimation: Pilot Observational Study. *JMIR Mhealth Uhealth*. 2025. Vol. 13. Art. e60426. URL: <https://doi.org/10.2196/60426>.
4. Chatzidiakou L., Krause A., Kellaway M. et al. Automated classification of time-activity-location patterns for improved estimation of personal exposure to air pollution. *Environmental Health*. 2022. Vol. 21, no. 1. Art. 125. URL: <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00939-8>.
5. Chatzidiakou L., Krause A., Han Y. et al. Using low-cost sensor technologies and advanced computational methods to improve dose estimations in health panel studies: results of the AIRLESS project. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*. 2020. Vol. 30, no. 6. P. 981–989. URL: <https://doi.org/10.1038/s41370-020-0259-6>.
6. Balakrishnan K., Steenland K., Clasen T. et al. Exposure–response relationships for personal exposure to fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>), carbon monoxide, and black carbon and birthweight: an observational analysis of the multicountry Household Air Pollution Intervention Network (HAPIN) trial. *The Lancet Planetary Health*. 2023. Vol. 7, no. 5. P. e387–e396. URL: [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00052-9).
7. Bhowmik R.T., Most S.P. A Personalized Respiratory Disease Exacerbation Prediction Technique Based on a Novel Spatio-Temporal Machine Learning Architecture and Local Environmental Sensor Networks. *Electronics*. 2022. Vol. 11, no. 16. Art. 2562. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics11162562>.
8. Che W., Frey H. C., Fung J. C.H. et al. PRAISE-HK: A personalized real-time air quality informatics system for citizen participation in exposure and health risk management. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 54. Art. 101986. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101986>.

### ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ СПЕЦІАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ НА ЛАНДШАФТНІ КОМПЛЕКСИ ХАРКІВЩИНИ

**Н.В. Внукова, д.т.н., проф.**

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків,  
Україна*

*vnukovanv@ukr.net*

**С.А. Трунов, заступник директора з інвестицій ТОВ «ХАЕР-ХОЛДІНГ»,  
м. Харків, Україна**

Експлуатація спеціальної техніки (наземних дронів, вантажівок та гусеничних машин) у Харківській області в сучасних умовах створює

специфічне техногенне навантаження. Регіон має унікальні чорноземи та розгалужену мережу річкових долин, які є надзвичайно вразливими до механічного та хімічного впливу. Нижче наведено опис стану та основних ризиків для ландшафтів області (рис. 1).



Рисунок 1 – Модель впливу спеціальної техніки на компоненти ландшафтів та екосистем Харківської області

Для системного аналізу взаємодії спецтехніки (наземних робототехнічних комплексів, далі – НРК, вантажівок, гусеничних машин) із ландшафтами регіону (Харківська область) розглянемо чотири ключові підсистеми. Дослідження базується на комплексному поєднанні методів ландшафтно-індикаційного аналізу та імітаційного моделювання техногенних потоків у геосистемах. Результати узагальнено у табл. 1.

На основі проведеного системного аналізу було сформовано матрицю ризиків, що відображає динаміку змін компонентів довкілля Харківської області під впливом експлуатації спеціальної техніки та НРК. Ключові положення аналізу:

1) деградація ґрунтового покриву та рельєфу (високий рівень ризику). Найбільш критичним наслідком є фізичне руйнування структури еталонних чорноземів. Прогнозується, що протягом 5 років механічне ущільнення призведе до зміни гідрологічного режиму ґрунтів, що запустить незворотні процеси глибинної ерозії та дефляції. Це підтверджується високим показником критичності для рельєфу, де утворення колій стає каталізатором



**Таблиця 1 – Системний прогноз трансформації компонентів геосистем  
Харківської області під впливом техногенного навантаження від  
спеціальної техніки**

| Назва підсистеми                                               | Прогноз на 5 років                                                           | Динаміка                                                                                                                                                                                                                                              | Результат                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Підсистема «Грунтово-рельєфне середовище» (Геофізична)         | Глибока трансформація структури чорноземів у зонах інтенсивного маневрування | Механічне ущільнення (компресія) призведе до зниження інфільтрації води на 30–40%. Це спровокує прискорення площинного змиву та утворення нових яружно-балкових систем, особливо на правобережжі Сіверського Дінця.                                   | Перехід значної частини орних земель до категорії «деградовані» з втратою гумусового горизонту.                                                 |
| Підсистема Гідросфера та хімічне забруднення                   | Акумуляція специфічних токсичних забруднювачів.                              | Накопичення у ґрунті важких металів (внаслідок зносу техніки) та нафтопродуктів досягне критичних позначок у місцях дислокації та постійних маршрутів колон. Через 3–5 років ці речовини почнуть масово мігрувати у верховодку та малі річки області. | Локальне погіршення якості питної води в сільських колодязях через фільтрацію техногенних стоків.                                               |
| 3. Підсистема «Біоценози та рослинний покрив»                  | Фрагментація ареалів та зміна видового складу (рудералізація).               | Постійний техногенний тиск (шум, вібрація, знищення підстилки гусеницями) призведе до витіснення чутливих видів флори та фауни. На місці проїздів та стоянок сформуються стійкі угруповання рудеральних рослин (бур'янів).                            | Зниження індексу біорізноманіття; виникнення «ефекту бар'єра» — тварини припинять використовувати звичні шляхи міграції через техногенні смуги. |
| 4. Підсистема «Техногенне навантаження» (Інтенсивність впливу) | Зростання щільності використання автономних систем (наземних дронів).        | Перехід від одиничного використання до мережецентричного застосування груп роботів (роїв). Це створить «сітку» мікропошкоджень ландшафту, яка за сумарним впливом може перевищити разовий прохід важкої техніки.                                      | Формування стійкого техногенного ландшафту, де природні процеси самовідновлення будуть пригнічені постійною присутністю технічних засобів.      |

оврагоутворення.

2) Забруднення гідросфери (середній рівень ризику). Хімічне навантаження (витоки ПММ, накопичення продуктів зносу металів) на початковому етапі має локальний характер. Проте в п'ятирічній перспективі очікується кумулятивний ефект: за рахунок інфільтрації токсичні сполуки

досягнуть водоносних горизонтів, що змінить статус ризику з локального на регіональний.

3) Трансформація біотичних компонентів (середній рівень ризику). Рослинний світ та фауна демонструють адаптивні реакції на техногенний стрес, проте постійна експлуатація техніки поза дорожньою мережею призведе до фрагментації екосистем. Основним ризиком є рудералізація ландшафтів – заміщення автохтонних (місцевих) видів стійкими до антропогенного впливу бур'янами.

Таблиця 2 – Матриця ризиків (узагальнення)

| Компонент   | Поточний стан          | Через 5 років (Прогноз)                | Критичність ризиків |
|-------------|------------------------|----------------------------------------|---------------------|
| Ґрунт       | Механічні пошкодження  | Глибинна ерозія, втрата структури      | Висока              |
| Вода        | Поверхнєве забруднення | Хімічне отруєння водоносних горизонтів | Середня             |
| Флора/Фауна | Стрес, міграція видів  | Стійка деградація екосистем            | Середня             |
| Рельєф      | Утворення колій        | Активізація зсувів та дефляції         | Висока              |

**Висновки за матрицею:** найбільш вразливим сегментом екосистеми Харківщини є геоморфологічна цілісність ландшафту. Висока критичність ризиків для ґрунту та рельєфу вимагає розробки невідкладних заходів із рекультивації та впровадження жорстких регламентів пересування спеціальної техніки для запобігання перетворенню родючих земель на техногенні пустирі. Основним ризиком є незворотна втрата структури еталонних чорноземів та активізація зсувних процесів на правобережжі річок. Для мінімізації наслідків необхідна подальша рекультивація земель, розпушення ущільнених ділянок та моніторинг вмісту нафтопродуктів у поєднанні з відновленням рослинного покриву. Без впровадження програм рекультивації та обмеження руху поза дорогами загального користування, через 5 років у Харківській області виникнуть зони «техногенної напівпустелі» – ділянки з повністю руйнованим верхнім шаром ґрунту, відновлення яких триватиме десятиліттями.

# МІНІМІЗАЦІЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ: ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ ПІДХІД ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

**В.С. Волошин, д.т.н., проф., В.А. Бурко, к.т.н., доц.**

*Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна*

*burko\_v\_a@pstu.edu*

**Ю.С. Калюжна, к.т.н., доц.**

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет*

*uskalmikova@gmail.com*

**Постановка проблеми.** Проблема мінімізації промислових відходів у технологічних процесах залишається однією з найбільш актуальних у сфері охорони довкілля та збалансованого природокористування. Класичний підхід до управління відходами передбачає їх збирання, сортування та подальшу переробку. Однак принципово інший підхід полягає у мінімізації утворення відходів безпосередньо у межах самого технологічного процесу за рахунок зміни термодинамічних умов переробки сировини. Саме цей напрям і є предметом дослідження.

**Мета роботи** – обґрунтування термодинамічного механізму утворення відходів у виробничих системах та побудова математичної моделі їх мінімізації шляхом введення додаткової енергії визначеної якості та кількості.

**Теоретичні основи.** Концепція термодинамічного дуалізму, вперше опосередковано застосована І. Пригожиным [1] для опису стану складних термодинамічно нерівноважних систем, описує можливість співіснування в одній системі кількох станів з різним ступенем відхилення від термодинамічної рівноваги. На основі цієї концепції сформульовано принцип термодинамічної двоєдності, що у додатку до технологічних процесів описує співіснування двох підсистем:

– сильно нерівноважна підсистема ( $p$ ) – із неї формується товарна продукція за рахунок інтенсивної взаємодії з базовою ( $E_{base}$ ) та внутрішньою енергіями;

– слабо нерівноважна або рівноважна підсистема ( $w$ ) – із неї за звичайних умов утворюються відходи з мінімальною ентропійною дисипацією. Під дією додаткової енергії ( $E_{add}$ ) вона може переходити у термодинамічно нерівноважний стан.

Механізм мінімізації відходів полягає у забезпеченні умов для порушення термодинамічної рівноваги у тій частині сировини, з якої за звичайних умов утворюється відхід. Досягається це шляхом введення додаткової енергії, що переводить відходоутворювальну частину сировини

зі стану слабкої нерівноваги у термодинамічно нерівноважний стан, придатний для переробки у товарний продукт.

**Математична модель.** Базова математична модель ґрунтується на теоремі Пригожина та рівнянні для внутрішньої ентропії відкритої системи. Для системи з двома зазначеними підсистемами базове рівняння Пригожина для внутрішньої ентропії записується як:

$$dS_{int}/dt = dS_p/dt + dS_w/dt, \quad (1)$$

де зміна ентропії для підсистеми (p) з базовою енергією  $E_{base}$  описується як:

$$dS_p/dt = \Sigma(J_{pi} \cdot X_{pi} / T_p), \quad (2)$$

а для підсистеми (w) зі слабкою нерівновагою:

$$\Delta S_w = \Sigma J_{wa} \cdot X_{wa} \cdot \lambda(1 - \lambda) \approx 0, \quad (3)$$

де  $\lambda = E_{base} / (E_{base} + E_{add})$  — погоджений феноменологічний коефіцієнт, що визначає ступінь узгодження матеріальних потоків  $J_{pi}$  і  $J_{wi}$  з термодинамічними силами  $X_{pi}$  і  $X_{wi}$ .

Узагальнена математична модель принципу термодинамічної двоєдності та його подолання за допомогою додаткової енергії має вигляд:

$$dS_{tot}/dt = \alpha_p \Sigma(J_{pi}X_{pi}/T_p) + \alpha_w \Sigma(J_{wi}X_{wi}\lambda(1-\lambda)/T_w) - \Sigma(q_k/T_k) + \Sigma(S_m J_{m,ext}), \quad (4)$$

де  $\alpha_p$  і  $\alpha_w$  — коефіцієнти розподілу енергії ( $\alpha_p + \alpha_w = 1$ ), що визначають частки  $E_{base}$  та  $E_{add}$ , спрямованих на кожен підсистему;  $q_k$  — теплові потоки;  $S_m$  — питома ентропія;  $J_{m,ext}$  — масові потоки.

Перший член рівняння (4) описує внесок у виробництво ентропії, пов'язаний з процесами отримання готової продукції — він характеризує незворотність процесів, пов'язаних зі створенням продукту. Другий член описує внесок від процесів утворення та обробки відходів з урахуванням уточненого феноменологічного коефіцієнта та відображає узгодження матеріальних потоків з термодинамічними силами при введенні додаткової енергії. Третій та четвертий члени враховують теплові втрати та зовнішні матеріальні потоки відповідно.

**Результати розрахункового дослідження.** Для оцінки запропонованої моделі виконано чисельне дослідження з варіюванням вхідних параметрів у п'яти характерних областях (табл. 1).

Результати розрахункового дослідження засвідчують існування двох чітко виражених параметричних областей, розмежованих значенням  $E_{add}/E_{base} \approx 0,34$ . При значеннях нижче цієї межі спостерігається стійке зростання ентропії — область I на рис. 1. Вище зазначеної межі при

варіюванні вхідними параметрами виявляються бінарні варіації з характером кусково-ламаних залежностей у кількох чітко розмежованих областях (II–V).

Таблиця 1 – Результати розрахункового дослідження моделі мінімізації відходів у технологічних процесах

| №   | Область залежностей                                                    | $E_{add} / E_{base}$ | $J_p$ , кг/с | $J_w$ , кг/с | $X_p$ , К <sup>-1</sup> | $X_w$ , К <sup>-1</sup> | $\Delta S / E_{base} \cdot 10^{-1} \text{ К}^{-1}$ |
|-----|------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| I   | $\Delta S = f(E_w/E_0)$ при $E_{add}/E_{base} < k$                     | 0,20–0,38            | 0,2–180      | 0,1–120      | 0,25–0,7                | 0,25–0,5                | 0,2–0,91                                           |
| II  | $\Delta S = f(E_w/E_0)$ при $X_p \rightarrow var$                      | 0,34–0,78            | 0,2–180      | 50,0         | 0,25–0,7                | 0,25                    | 0,23–2,8                                           |
| III | $\Delta S = f(E_w/E_0)$ при $J_p \rightarrow var$                      | 0,36–0,80            | 0,2–180      | 50,0         | 0,25–0,7                | 0,25                    | 0,05–2,8                                           |
| IV  | $\Delta S = f(E_w/E_0)$ при $X_w \rightarrow var$                      | 0,39–0,68            | 100          | 0,1–120      | 0,50                    | 0,15–0,5                | 0,62–1,6                                           |
| V   | $\Delta S = f(E_w/E_0)$ при $J_w \rightarrow var, X_w \rightarrow var$ | 0,64–0,81            | 100          | 0,1–120      | 0,50                    | 0,15–0,5                | 1,68–2,5                                           |

Область IV прагне продовжити динаміку стійкої лінійної залежності зміни ентропії від показника  $E_{add}$ . Однак паралельні області II і III демонструють кусково-лінійні залежності хаотичного характеру. Область V, що межує зі значеннями  $0,65 < E_{add}/E_{base} < 0,8$ , виявляє можливі біфуркаційні невизначеності, що свідчать про те, що термодинамічна система з високим ступенем нерівноваги за всіма компонентами сировини може бути стійкою лише у вузькому діапазоні параметричного коефіцієнта  $k$ .

Аналіз складових рівняння (4) дозволяє сформулювати такі **висновки**:

а) при введенні  $E_{add}$  зростає частка потоку  $J_{pi}$ , що призводить до збільшення виробництва ентропії у підсистемі ( $p$ ), але означає переведення частини сировини, яка раніше утворювала відхід, до корисного виходу;

б) матеріальний потік відходів  $J_{wi}$  зменшується, оскільки частина цього потоку отримує цільову переробку; параметр  $\lambda$  посилює цю дію через узгодження коефіцієнтів  $L_{wi}$ ;

в) додаткова енергія збільшує тепловий потік  $q_k$ , що робить відповідний член рівняння більш від'ємним, компенсуючи зростання ентропії від внутрішніх процесів.

**Умови застосування.** Введення додаткової енергії в технологічний процес не може не змінити повну швидкість зміни ентропії  $dStot/dt$ . Тому дві основні умови ефективної мінімізації відходів у межах самого технологічного процесу полягають у такому: по-перше, додаткова енергія  $E_{add}$  повинна мати визначену якість і лімітовану кількість; по-друге, вона

вводиться у систему таким чином, щоб не порушити термодинаміку процесу отримання основної продукції. В іншому разі втрачається сенс усієї виробничої системи.

**Практичне значення та перспективи.** Запропонована модель дозволяє аналізувати та оптимізувати будь-які технологічні процеси, пов'язані з тепло- і масоперенесенням, де відходи можуть бути переведені у товарний продукт без порушення основного технологічного режиму. Принцип «втрати одного процесу можуть стати ресурсом іншого» отримує кількісне термодинамічне обґрунтування.

Модель може бути застосована у металургійній, хімічній, нафтопереробній, харчовій та будівельній промисловості – у будь-яких виробничих системах, де сировина при певних термодинамічних умовах частково утворює відходи.

**Висновки.** 1. Принцип термодинамічної двоєдності є об'єктивним механізмом виникнення відходів у виробничих системах, який підпорядковується загальним законам термодинаміки.

2. Розроблена математична модель (4), що розширює рівняння Пригожина з урахуванням двох підсистем та коефіцієнтів розподілу енергії  $\alpha$ , описує умови мінімізації відходів шляхом введення додаткової енергії визначеної якості.

3. Розрахункове дослідження виявило граничне значення  $E_{add}/E_{base} \approx 0,34$ , нижче якого система демонструє стійкі та передбачувані залежності. Перевищення цієї межі призводить до біфуркаційної нестійкості та є технологічно небажаним.

4. Запропонований підхід є перспективним інструментом екологізації антропогенної діяльності та подолання екологічних ризиків, що відповідає тематиці конференції щодо регіональних проблем охорони довкілля та збалансованого природокористування.

### Перелік посилань

1. Prigogine I. Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. Charles C. Thomas Publisher, Springfield, Illinois, 1955. 147 p.
2. Волошин В.С., Бурко В.А. Відповідність принципу термодинамічної двоєдності як причини відходоутворювання. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 49.
3. Волошин В.С., Бурко В.А. Мінімізація промислових відходів у технологічних процесах, термодинамічний підхід. *Екологічні науки*. 2024. № 6(57).
4. Волошин В.С., Бурко В.А. Про одну особливість, що лежить в основі принципу створення промислових відходів. *Зб. наук. праць IX Міжнар. з'їзду екологів*. Вінниця: ВНТУ, 2024. 384 с.
5. Волошин В.С., Єлістратова Н.Ю., Бурко В.А. Особливості мінімізації відходів у технологічному процесі виробництва хліба. *Зб. наук. статей XXI Міжнар. науково-практ. конф. «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»*. Харків: УКРНДІЕП, 2025. 429 с.

## РИЗИКИ НЕСПРИЯТЛИВИХ БІОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ В ОКРЕМИХ РЕГІОНАХ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ

*Н.В. Грабко, ст. викл., М.Є. Романчук, к.геогр.н., доц.*

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса,  
Україна*

*grabkonatalyavikt@gmail.com,  
marinaroman4uk@gmail.com*

Територія Західної України здавна характеризувалася мальовничими краєвидами, багатим природно-рекреаційним потенціалом і різноманітною культурно-історичною спадщиною, що робить цей регіон особливо привабливим для відпочинку населення. А кліматичні й біокліматичні умови є важливою складовою у формуванні рекреаційного потенціалу території.

Існує велика кількість показників (індексів), що застосовуються для характеристики біокліматичних умов. Одним з таких показників є ваговий вміст кисню в атмосферному повітрі (або парціальна щільність кисню).

Цей показник запропонований В.Ф. Овчаровою. А для його визначення застосовується формула Клапейрона [1,2]:

$$\rho_o = 0,232_m \frac{(P-e)}{KT}, \quad (1)$$

де  $\rho_o$  – ваговий вміст кисню в атмосферному повітрі, г/м<sup>3</sup>;  $P$  – атмосферний тиск, Па;  $e$  – парціальний тиск водяної пари в атмосферному повітрі, Па;  $m$  – молярна маса повітря ( $m = 28,98$  г/моль – середня молярна маса сухого повітря);  $T$  – абсолютна температура повітря, К;  $T = 273,15 + t^\circ$ ;  $K$  – молярна газова стала,  $K = 8,31$  Дж/(моль · К); 0,232 – масова доля кисню в сухому повітрі.

Ваговий вміст кисню в атмосферному повітрі – це маса кисню в 1 м<sup>3</sup> атмосферного повітря. Основним фактором падіння загального тиску атмосферного повітря є підйом на висоту – фізіологічна зона атмосфери закінчується на висоті 5 км. Певне зменшення вагового вмісту кисню в повітрі відбувається через мінливість погодних умов (прихід циклону).

Л.К. Смекалова та Ц.А. Швер вказали, що комфортним для людини є вміст кисню в атмосферному повітрі в діапазоні 280 – 300 г/м<sup>3</sup>, за іншими джерелами це 275 – 300 г/м<sup>3</sup>. Неприятливі наслідки для організму людини пов'язують з порушенням як верхньої, так і нижньої межі цих комфортних умов. Більш відомі (через свою більшу поширеність) наслідки низького вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі. З такими умовами пов'язують ризик прискорення серцебиття, сплутаності свідомості, запаморочення, кисневого голодування мозку, втрати свідомості. На тлі

високих температур (влітку) це супроводжується швидким зневодненням і посиленням навантаження на серцево-судинну систему, що може призвести до теплового удару й більш важких наслідків.

У даному дослідженні проаналізовано ситуацію щодо вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі на трьох метеостанціях, розташованих в обласних центрах Західної України. Були обрані міста Львів, Ужгород і Чернівці, розташування яких відрізняється різною висотою над рівнем моря.

Ваговий вміст кисню визначався розрахунковим методом з використанням таких метеорологічних показників як загальний атмосферний тиск, температура і відносна вологість атмосферного повітря за період 2020 – 2024 років у строки спостережень 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 і 21 год. Перерахунок парціального тиску водяної пари здійснювався за допомогою формул, запропонованих Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation Всесвітньої метеорологічної організації.

За досліджуваний період (5 років) було розраховано 13901 значення  $\rho_o$  на метеостанції Львів, 12578 значень на метеостанції Ужгород і 13871 значення на метеостанції Чернівці. За результатами проведених розрахунків було встановлено, що на метеостанції Львів ваговий міст кисню в повітрі знаходиться в діапазоні 250,6 – 318,3 г/м<sup>3</sup>, на метеостанції Ужгород – в діапазоні 254,3 – 318,4 г/м<sup>3</sup>, а на метеостанції Чернівці – 251,3 – 316,9 г/м<sup>3</sup>.

Були проведені розрахунки середньомісячних значень вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі для кожної з трьох метеостанцій, включених в дослідження. Результати розрахунків представлені у графічному вигляді на рис.1 для кожного з п'яти досліджуваних років. На кожній метеостанції можна побачити виражений річний хід показника, обумовлений річними коливаннями температури. Також можна побачити, що порушення верхньої межі комфортних умов (300 г/м<sup>3</sup>) не спостерігається на жодній з досліджених метеостанцій, а ось порушення нижньої межі (у дослідженні було обрано більш жорстке значення 275 г/м<sup>3</sup>, показане на графіках у вигляді червоної пунктирної лінії) спостерігається протягом теплого періоду року на кожній з них. Найбільш вираженими такі порушення виглядають у Львові, найменш – в Ужгороді. Така різниця дуже добре пояснюється висотою розташування метеостанцій над рівнем моря (329 м – Львів, 124 м – Ужгород, 246 м – Чернівці). Проте незначна різниця між показниками на метеостанціях Львів і Чернівці вказує, що роль цього фактору не є абсолютною, а велике значення відіграють і місцеві умови.

Аналіз графіків, представлених на рис. 1, показав, що повторюваність несприятливих умов, пов'язаних із порушенням нижньої межі зони комфорту, вимагає додаткової оцінки. Була проведена оцінка повторюваності випадків  $\rho_o$ , нижчих за 275 г/м<sup>3</sup> – за кожен місяць загального періоду 2020 – 2024 років, а також за кожен рік. Результати такої оцінки представлені на рис. 2 і 3.



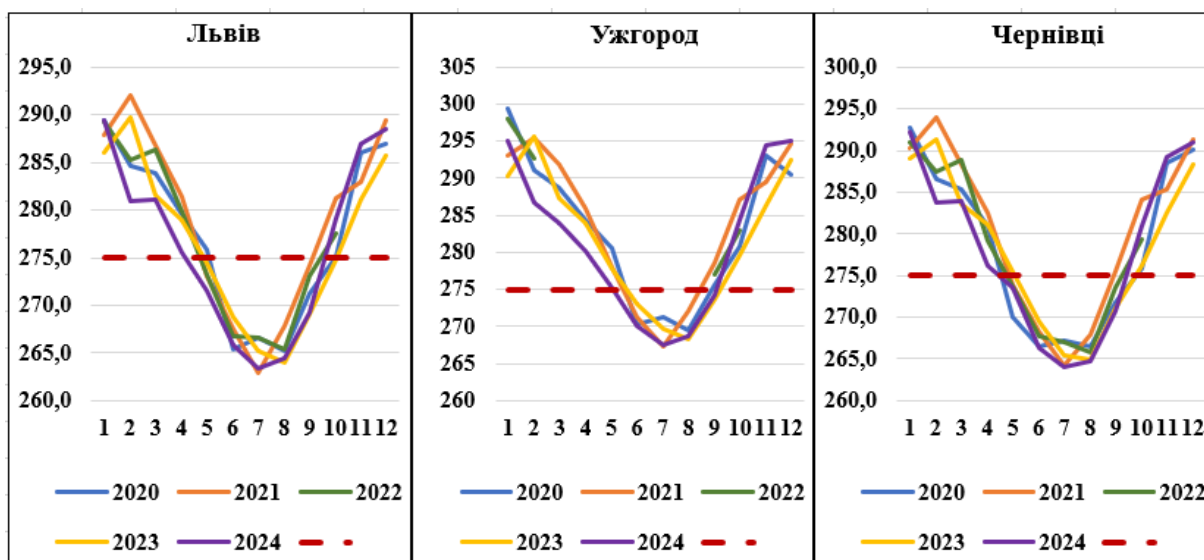


Рисунок 1 – Річний хід середньомісячних значень  $\rho_0$  в окремих регіонах Західної України, г/м<sup>3</sup>

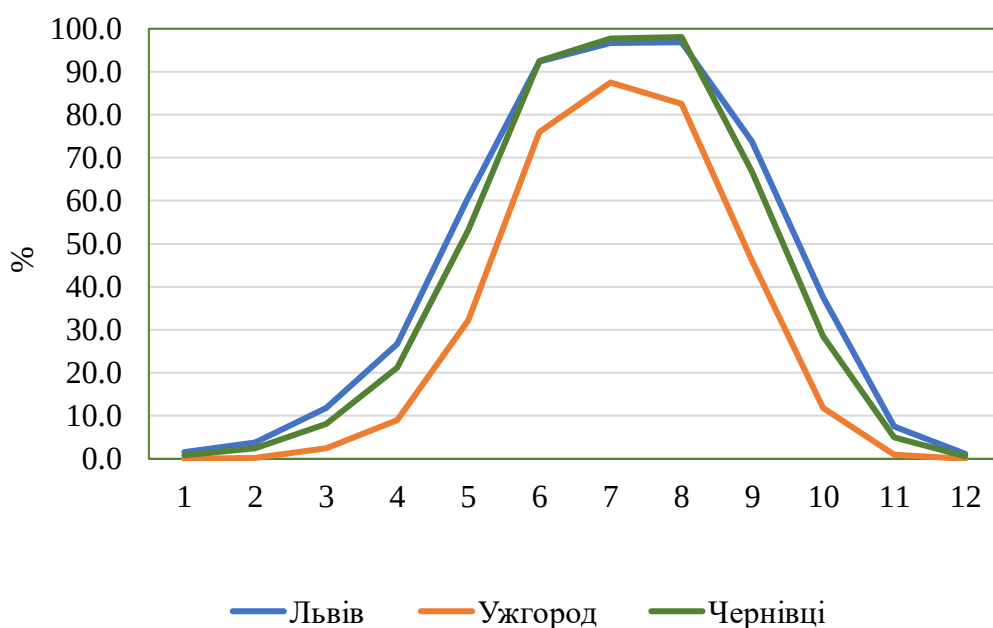


Рисунок 2 – Повторюваність за місяцями випадків  $\rho_0$ , нижчих за нижчу межу зони комфортних умов

На рис. 2 можна побачити, що виражений річний хід мають не тільки середньомісячні значення  $\rho_0$ , а й повторюваність фактичних значень, яка у зимові місяці на усіх метеостанціях, включених в дослідження, складає декілька відсотків, а влітку наближається до 100 % (на станціях Львів і Чернівці – це 96 – 98 %, а на метеостанції Ужгород – 87 %).

На рис. 3 вилучені результати оцінки повторюваності порушень нижньої межі зони комфорту на метеостанції Ужгород у 2022 році, оскільки численні пропуски у даних вплинули на остаточний результат розрахунків.

Так, на метеостанціях Львів і Чернівці повторюваність несприятливих біокліматичних умов, пов'язаних із можливістю впливу на організм людини, складає 35 – 50 %, а на метеостанції Ужгород – 25 – 35 %.

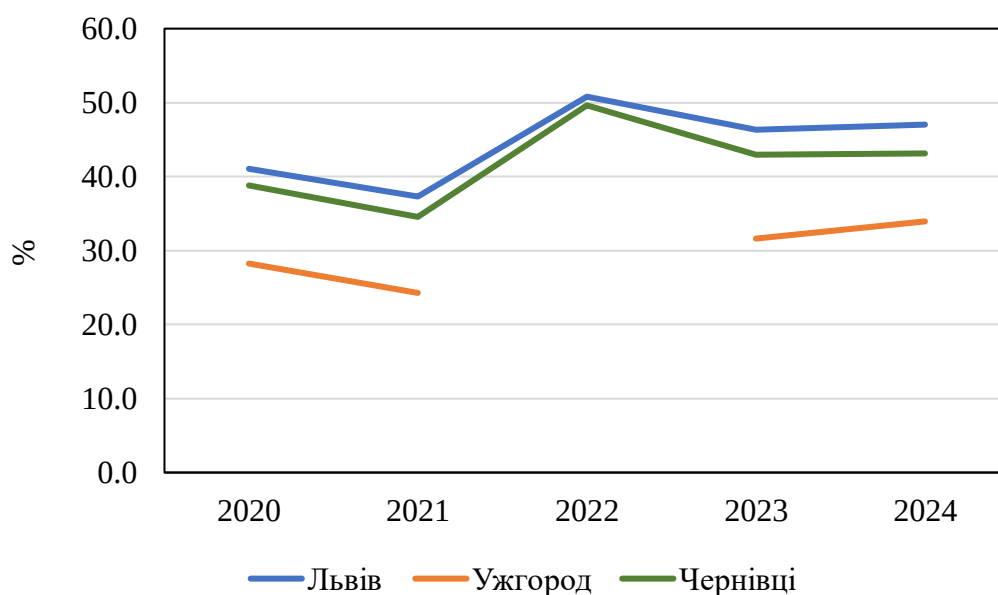


Рисунок 3 – Повторюваність за роками випадків  $\rho_0$ , нижчих за нижчу межу зони комфортних умов

Поняття «повторюваність» (несприятливої події) близьке до терміну «ризик», який, серед іншого, розглядають як синонім термінів «вірогідність» і «частота». Такий підхід присутній як у публікаціях безпосередньо екологічної спрямованості [3, 4], так і у споріднених з ними за тематикою [5]. Отже, представлені оцінки частоти (ймовірності) виникнення несприятливих біокліматичних умов можна вважати екологічним ризиком. В цьому випадку мова йде саме про ризик несприятливих біокліматичних умов, обумовлених низьким вмістом кисню у повітрі, а не про ризик шкоди здоров'ю людини через ці умови. Згідно із Методичними рекомендаціями для здійснення оцінки ризиків [6] «ризик часто представляють як ймовірність або вірогідність виникнення небезпечних подій або тенденцій, помножену на вплив, якщо ці події або тенденції відбудуться» (подібний підхід поширений як серед вітчизняних, так й серед зарубіжних авторів [7]). Через це для оцінки ризиків здоров'ю людини внаслідок низьких рівнів  $\rho_0$  в атмосферному повітрі потрібні кількісні характеристики впливу цього показника, які у цьому дослідженні не застосовувалися.

Отже запропонована тематика є досить актуальною, але в даному дослідженні була приділена увага лише одному параметру ризику – частоті виникнення несприятливих біокліматичних умов. Для визначення другого параметру ризику (характеристиці впливу) необхідні додаткові масштабні дослідження.

### Перелік посилань

1. Грабко Н.В. Демографічний аспект екологічної ситуації в регіонах Західної України. *Євроінтеграція екологічної політики України: Матеріали Сьомої Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Одеса: ОДЕКУ, 2025. С. 185 – 189.
2. Грабко Н.В. Вплив несприятливих біокліматичних умов на здоров'я людини (на прикладі м. Львів). *Матеріали до 80-ої звітної наукової конференції професорсько викладацького складу і наукових працівників ОНУ імені І. І. Мечникова. Секція «Гідрометеорологія і екологія»*. Одеса: ОНУ імені І. І. Мечникова, 2025. С. 141 – 145.
3. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В., Мідик С.В., Гришук І.А., Ушкалов В.О. Екологічні ризики: природа і критерії. *Екологічні науки*. 2020. № 4 (31). С. 131 – 135.
4. Добровольський В.В. Екологічний ризик: причинно-наслідкові зв'язки в екосистемі. *Екологія. Наукові праці*. 2010. Т. 132. Вип. 119. С. 6 – 9.
5. Фаюра О.П., Максимук А.О., Абрагамович О.О., Абрагамович М.О., Циганик Л.В., Толопко С.Я., Ферко М.Р. Чинники ризику: методика визначення й оцінювання, прогнозування в медицині (огляд літератури; приклади використання у власній клінічній практиці) – повідомлення перше. *Lviv Clinical Bulletin*. 2021. № 1 (33) – 2 (34). С. 59 – 64.
6. Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату. 2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0386926-23#Text> (дата звернення: 01.04.2026).
7. Бредун В.І. Екологічна безпека та управління ризиками. Навчальний посібник. Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2021. 189 с.

### ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ ШТУЧНИХ РИФІВ ЯК ЗАХОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЛИМАННИХ ЕКОСИСТЕМ

**М.В. Грубий<sup>1</sup>, Г.Г. Трохименко<sup>2</sup>, д.т.н., проф.**

<sup>1</sup>Регіональний ландшафтний парк «Тилігульський», Україна

<sup>2</sup>Національний університет кораблебудування імені адмірала  
Макарова, Миколаїв, Україна

<sup>1</sup>grubyy@ukr.net

Деградація морських та лиманних екосистем України внаслідок антропогенного тиску призводить до щорічних втрат у розмірі близько 2 млрд. грн. Традиційні методи управління, що базуються виключно на системі ГДК, не забезпечують достатньої точності для відновлення біорізноманіття. Це зумовлює необхідність активної біомеліорації через створення штучних нерестилищ та біофільтрів.

Комплексна оцінка ефективності проекту базувалася на поєднанні системного аналізу екологічного стану акваторії та методів сучасного фінансового менеджменту [1].

Екологічний складник дослідження охоплював натурні гідробіологічні та гідрохімічні вимірювання, проведені в акваторії Тилігульського лиману

протягом 2023 – 2024 рр. Для оцінки трансформації екосистеми використовувалися методи дистанційного зондування (БПЛА) та ГІС-моделювання, що дозволило визначити зони пріоритетної ревіталізації. Стан евтрофікації та рівень біогенного навантаження аналізувалися за стандартними методиками визначення вмісту розчиненого азоту та фосфору [2].

Економіко-математичний складник базувався на динамічних методах оцінки інвестицій, що враховують часову вартість грошових потоків. Основним критерієм доцільності впровадження штучних рифів обрано показник чистої приведеної вартості (NPV), який розраховувався за формулою [3]:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+i)^t} - IB,$$

де  $CF_t$  – чисті грошові потоки (різниця між дисконтованими вигодами від експлуатації та поточними витратами);  $i$  – ставка дисконту, що відображає альтернативну вартість капіталу та ризики проєкту;  $IB$  – початкові інвестиційні витрати на придбання форм та встановлення модулів;  $n$  – тривалість розрахункового періоду (циклу життєдіяльності рифу).

Додатково застосовувалися методи розрахунку внутрішньої норми рентабельності (IRR) та індексу прибутковості (PI), що дозволило верифікувати стійкість проєкту до коливань ринкової кон'юнктури та змін гідрологічних параметрів середовища. Сукупне застосування цих методів забезпечило об'єктивність висновків щодо доцільності активної біомеліорації лиману.

Штучні рифи виступають «екологічними буферами», що компенсують втрату природних місць нересту та стимулюють самоочищення води. Для умов Тилігульського лиману обрано модулі типу *Reef Ball* (модель Junior). На основі експериментальних даних 2023 – 2024 рр. розроблено фінансову модель проєкту з обсягом інвестицій 250 тис. грн.

Результати розрахунків за період 2023 – 2026 рр. продемонстрували високу рентабельність заходу:

1. Чиста приведена вартість (NPV): становить 301,38 тис. грн, що підтверджує фінансову вигідність проєкту.
2. Внутрішня норма рентабельності (IRR): досягає 95 %. Це свідчить про високу стійкість проєкту до можливих змін ставки дисконтування або здорожчання ресурсів.
3. Коефіцієнт вигід/витрат (BCR): дорівнює 6,14. Отже, кожна інвестована гривня принесе понад 6 грн. чистого доходу у вигляді екосистемних та економічних вигід.
4. Індекс прибутковості (PI): становить 2,2, що значно перевищує одиницю і є індикатором високої ефективності капіталовкладень.

Економічний ефект зумовлений відновленням рибопродуктивності та зростанням рекреаційного потенціалу Тилігульського лиману, що є критично важливим в умовах обмеження доступу до традиційних морських зон відпочинку.

**Висновки.** Впровадження штучних рифових конструкцій є науково обґрунтованим методом підвищення рівня екологічної безпеки лиманних екосистем. Отримані результати підтверджують, що природоохоронні заходи за умови правильного технологічного вибору (модулі *Reef Ball*) є інвестиційно привабливими та відповідають стратегічним цілям Водної рамкової директиви ЄС.

#### **Перелік посилань**

1. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive). *Official Journal of the European Union*. 2008. L 164. P. 19 – 40.
2. Reef Ball Foundation. Reef Ball sizes and descriptions: Junior ball mold specifications. 2023. URL: <https://www.reefball.org>.
3. Gubanov V.V., Sadunenko I.V. Ecological and economic assessment of the restoration of biological resources in the Black Sea region. *Economics and Management*. 2019. No 3. P. 112 – 118.

### **ПРОБЛЕМА ВИЗНАЧЕННЯ, КЛАСИФІКАЦІЇ, ВИКОРИСТАННЯ ТА МОНЕТИЗАЦІЇ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ (НА ПРИКЛАДІ ПРИРОДНИХ СИСТЕМ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я)**

**М.Ю. Дьяченко, асп., Т.А. Сафранов, д.г.-м.н., проф.**

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса,  
Україна*

[maksymdiachenko@yahoo.com](mailto:maksymdiachenko@yahoo.com)

Термін «екосистемні послуги» (*ecosystem services*) став активно використовуватися з 1981 року після опублікування роботи П. Ерліх і А. Ерліх [1]. Екосистемні послуги (ЕСП) – це всі корисні ресурси та вигоди, які сучасне людство може отримати від природи (як матеріальні, так і нематеріальні вигоди від абіогенних і біогенних складових різноманітних природних екосистем).

Термін «екосистемні послуги» має різні трактування в науковій літературі, що ускладнює його однозначне визначення. Усі екосистемні послуги безкоштовні, оскільки люди не оплачують їх використання або споживання. Однак, не варто обмежуватися лише «задоволенням потребами і перевагами», оскільки, наприклад, естетична насолода видами природи також виконує це завдання. В економічній оцінці екосистемних послуг

застосовується саме цей підхід, хоча окремі аспекти внутрішньо-властивої вартості враховуються у категорії культурних послуг [2].

У деяких роботах замість терміну «екосистемні послуги» пропонується термін «ландшафтні послуги». Дійсно, це взаємопов'язані поняття, але нетотожні. Ландшафтні послуги стосуються створення та підтримки естетично привабливих та функціональних ландшафтів, у той час як екосистемні послуги охоплюють ширший спектр вигоди для людства від природних екосистем. Крім того, за походженням ландшафти можуть бути природними та антропогенними.

Огляд публікацій українських дослідників показує, що існує дуже широкий підхід як до самого поняття «екосистемні послуги», так і до його використання стосовно не тільки природних екосистем. При цьому не завжди враховується зв'язок цих послуг виключно з природними екосистемами та їх безкоштовністю, а тому варто зазначити, що саме деякі активи природного капіталу, які надають людям безкоштовні товари та послуги, називають екосистемними послугами. Варто також підкреслити, що природні екосистеми існують, а не надають послуги, а природні ресурси і умови існують незалежно від людства. В економічній теорії під «послугами» розуміють цілеспрямовану діяльність саме людини, результат якого має корисний ефект, задовольняючий будь-які потреби людини. «Послугою» вважається результат діяльності, матеріальний чи нематеріальний продукт, який виробник надає споживачу відповідно до встановлених вимог і до властивостей цього продукту або результату. Поняття «послуги» може трактуватися і як специфічна форма праці, і як результат праці (наприклад, екологічні, освітні, інформаційні, консультаційні, юридичні, медичні послуги тощо). З цих позицій термін «послуги» некоректно використовувати відносно до природних екосистем.

У природокористуванні основним об'єктом досліджень є природна система, яка часто розглядається як синонім терміну «природна екосистема». Володіючи великою кількістю схожих елементів і зв'язків, «природна система» і «природна екосистема» розрізняються спрямованістю внутрішньо-системних зв'язків. Для моделі «природна екосистема» характерна спрямованість зв'язків з боку факторів «середовища» (об'єкт), насамперед, на головний об'єкт – «господаря» (суб'єкт), яким є біота. Для моделі «природна система» типове визнання рівнозначності усіх зв'язків. При оптимізації природокористування доцільно говорити не про використання природних ресурсів, а про використання їх певної частини, тобто «природно-ресурсного потенціалу», під яким в регіональному аспекті розуміється здатність природних систем без шкоди для себе (а, отже, і для людей) віддавати необхідну для людства продукцію або виконувати корисну роботу в рамках господарства даного історичного типу. Як бачимо, це визначення «природно-ресурсного потенціалу» є досить близьким до поняття «екосистемні послуги», а тому замість терміну «екосистемні

послуги» пропонується використовувати термін «корисні властивості природних систем» (*useful properties of natural systems*). Але з урахуванням широкого використання терміну «екосистемні послуги» в науковій літературі доцільно залишити його використання, незважаючи на вищенаведене зауваження.

Існує низка підходів до трактування сутності екосистемних послуг та принципів їх класифікації.

У Програмі ООН «Оцінка екосистем на порозі тисячоліття» [2], а також в ЄС сформовано спільну міжнародну класифікацію ЕСП, які поділяються на чотири групи: 1) *забезпечувальні послуги*, які описують матеріальний чи енергетичний результат функціонування природних екосистем (продукти харчування, деревина й волокно, паливо, прісна вода, медикаменти тощо); 2) *регулюючі послуги* – це послуги з регулювання екосистемних процесів (регулювання якості повітря, очищення води, регулювання стоку води, запобігання ерозії, регулювання клімату, запилення, біологічний контроль); 3) *підтримуючі послуги* – це послуги, необхідні для підтримки всіх інших екосистемних послуг (грунтоутворення, кругообіг поживних речовин, фотосинтез, біологічне різноманіття); 4) *культурні послуги* – це нематеріальні вигоди, які люди отримують під час контакту з природними екосистемами (значення для культури, мистецтва, рекреація й туризм, естетичне значення, знання й значення для освіти, духовне та релігійне значення).

У багатьох країнах використовується класифікація екосистемних послуг, яка була запропонована авторами роботи «*Ecosystem services*» [3].

У «Концептуальних засадах державної політики і законодавства про екосистемні послуги» [4] надана така класифікація екосистемних послуг: 1) регулювання (якість повітря, клімат, водний стік, ерозія, стихійні лиха); 2) підтримування (кругообіг біогенних речовин, водообмін, грунтоутворення, фотосинтез, запилення тощо); 3) постачання (продукція, вода, корми, деревина, паливо, інша сировина); 4) культурні (туризм, оздоровлення, відпочинок, культурний, історичний, освітній зв'язок).

О. Василюк, Л. Ільмінська [5] виділяють такі типи екосистемних послуг: 1) постачання; 2) регулювання; 3) підтримання; 4) культурно-соціальні.

Є.В. Мішенін, Н.В. Дегтярь [6] пропонують детальну класифікацію екосистемних послуг за такими ознаками: функціональним призначенням; ступенем відчутності; рівнем законності використання; за можливістю економічної оцінки; за способом оплати та формою власності; типами бенефіціарів ЕСП; рівнем споживчої корисності; видами потреб людини; внеском у добробут населення та діяльність економічних суб'єктів; рівнем винятковості та конкурентності.

М.А. Федоренко [7] пропонує класифікацію екосистемних послуг природоохоронних територій (на прикладі Дунайського біосферного заповідника та водно-болотних угідь міжнародного значення).

Відсутність єдиної загальноприйнятої класифікації екосистемних послуг ускладнює порівняння результатів досліджень, їх оцінку та інтеграцію в управлінські рішення. Крім того, існуючі класифікації екосистемних послуг стикаються з труднощами у відокремленні екосистемних функцій від послуг, а тому існує потреба в розробці моделей, які враховують просторово-часові аспекти та взаємодію між природними та соціально-економічними системами для точнішого прогнозування надання екосистемних послуг.

Як приклад, можна розглянути екосистемні послуги Північно-Західного Причорномор'я, використовуючи класифікацію згідно «Концептуальних засад державної політики і законодавства про екосистемні послуги» [3]:

1. *Екосистемні послуги регулювання* – формують середовище існування біологічних видів, зокрема людини; це регуляція клімату, погодних умов, якість повітря, якість і кількість прісної води, формування ґрунтів, запилення рослин та велика кількість процесів тощо; ці послуги оберігають наше життя від стихійних лих і змін у довкіллі, які могли б зробити його непридатним для нашого життя. На можливості використання цих послуг прямий і непрямий вплив здійснюють різні форми техногенного навантаження, а також військові і бойові дії з лютого 2022 року;

2. *Екосистемні послуги підтримування* – регулювання взаємодії різних трофічних рівнів, що допомагає підтримувати відносно стійку екологічну піраміду; атмосферний вплив виявляється у тому, що з повітряними масами до морського басейну потрапляють забруднюючі речовини, а також біогенні елементи, які провокують розвиток процесів евтрофікації. Крім того, вплив теплового морського басейну регулює кліматичні умови прибережної зони ПЗП. Водно-болотні угіддя (ВБУ) узбережжя, виступають як регулятор акумулювання та зберігання прісної води, фільтрації вод, поглинання з атмосфери та накопичення вуглецю, повернення в атмосферу кисню, регулювання поверхневого стоку, стабілізації рівня ґрунтових вод, запобігання та стримування ерозійних процесів, підтримання збереження біологічної різноманітності, пом'якшують повені, захищають берегову лінію та підвищують опір населення до стихійних лих, а також відіграють важливу регулюючу роль у стабілізації регіональних кліматичних умов. Крім того, вони відіграють важливу роль у виробництві первинної продукції та фотосинтезі, а також є джерелом продовольства, сировини, генетичних ресурсів. Як зазначено вище, на стан ВБУ прямий і непрямий вплив здійснюють антропогенні фактори, а також військові і бойові дії.

3. *Екосистемні послуги постачання* – це забезпечення функціонування морегосподарських комплексів, судноплавства, отримання сировини, продовольства, прісної води та інших матеріальних благ; ці послуги безпосередньо споживаються людьми і, передусім, вигідні місцевим



жителям. На послуги постачання негативний вплив здійснюють різноманітні види антропогенної діяльності у межах прибережної зони, а також військові та бойові дії. ВБУ узбережжя і лимани мають унікальні біологічні ресурси, а також лікувальні грязі, водні та енергетичні ресурси. Процеси їх забруднення та деградації пов'язані з сільськогосподарською та рекреаційно-туристичною діяльністю і впливом місцевого населення.

Важливою складовою ЕСП постачання є ресурси вуглеводневої сировини. Вважається, що північно-західний шельф Чорного моря містить біля 2,3 трлн. м<sup>3</sup> природного газу. В умовах війни експлуатація покладів вуглеводневої сировини поки що не представляється можливим, але у післявоєнний період видобуток вуглеводневої сировини на ПЗШЧМ стане одним із ключових складових післявоєнного відновлення держави. Останніми роками відзначається слабо виражена тенденція до відновлення філофорного поля Зернова, однак вплив зони активних бойових дій, а також негативні наслідки підриву дамби Каховської ГЕС негативно відбилися на екологічному стані філофорного поля Зернова.

4. *Культурні екосистемні послуги.* Різноманітні природні системи прибережної зони мають наукову значущість і освітню цінність, оскільки є природними науково-освітніми лабораторіями, де можна здійснювати наукову та освітню діяльність. До узбережжя Північно-Західного Причорномор'я приурочені водно-болотні угіддя міжнародного значення, які є складовою екологічних коридорів та є незамінними у формуванні екологічної мережі. Істотну шкоду військові і бойові дії нанесли територіям і об'єктам природно-заповідного фонду. Комфортні біокліматичні умови, значна протяжність пляжної зони, естетична привабливість та інші фактори зумовлюють перспективність прибережної зони для різних форм рекреаційно-туристичної діяльності, але військові і бойові дії не дають можливість їх ефективного використання.

Використання екосистемних послуг природних систем Північно-Західного Причорномор'я обмежує різні форми антропогенної діяльності, а з 24.02.2022 року додатковим фактором, що обмежують їх використання, є бойові дії.

Низка вчених проти присвоєння так званого «цінника» багатствам природи, вважаючи, що цінність природних ЕС нескінченна і не може мати грошового висловлювання, а оцінювати їх окремі елементи просто абсурдно.

На думку М.Ф. Реймерса (1994), оцінювати природу за вартістю її матеріальних багатств – це все одно, що оцінювати картини великих художників за їх метражем або витратами на полотно і фарбу. Проте, такий підхід є домінуючим тому, що їх монетизація, тобто їх оцінка у грошовому еквіваленті, допомагає зрозуміти людям те, наскільки важливим у їхньому житті є збереження біогенної та абіогенної природних систем.

Інші, навпаки, вважають, що це необхідно. В даний час економічна оцінка ЕСП важлива для раціонального природокористування і може бути базисом для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Вважається, що основною причиною деградації природних систем є недооцінка їхньої реальної економічної цінності, вартості їх ресурсів та послуг загалом. У тих випадках, коли фінансові ресурси, необхідні для вирішення серйозних економічних проблем, обмежені, плата за екосистемні послуги може забезпечити додаткові ресурси для впровадження екологічно дружніх технологій, створити стимули для інвестицій та посилити залучення бізнесу в охорону довкілля. Монетизація екосистемних послуг необхідна для розуміння того, наскільки важливим для нормального життя суспільства є збереження ландшафтного та біологічного різноманіття природних систем й підтримання їх у стані гомеостазу. Окрім того, монетизація екосистемних послуг є важливим кроком у напрямку визначення їх внеску в різні галузі економіки, а також дозволяє окреслити їх потенційні можливості задля надання цих послуг у конкретному контексті та для конкретних отримувачів матеріальних вимог; при цьому визначається, наскільки надання екосистемних послуг є стійким, а також задля можливості ідентифікувати пороги і переломні моменти.

У «Концептуальних засадах державної політики і законодавства про екосистемні послуги» [4] зазначено, що у плануванні (економічному, державному) ігноруються екологічні функції, які фактично виконує довкілля для людей. У розрахунку шкоди довкіллю, компенсацій за втрати нехтують втратами природних об'єктів (наприклад, малих річок тощо), витратами на їх відновлення, їх значимістю для добробуту

Як зазначено вище, важливою складовою екосистемних послуг Північно-Західного Причорномор'я є ресурси вуглеводневої сировини. З урахуванням ринкової ціни можна оцінити вартість цієї сировини.

Також можна надати економічну оцінку рибних ресурсів, аквакультур, філофори (сировини для отримання агар-агар), а також рекреаційних та деяких лікувальних ресурсів (пелоїдів, ропи, мінеральних лікувальних ресурсів).

Отже, більшість екосистемних послуг не мають ринкової ціни за винятком деяких з них, які отримані безпосередньо з природних систем (продукти харчування, деревина, очерет, вода тощо), а також деякі інші послуги (рекреаційно-туристична діяльність), які мають ринкову ціну.

### **Перелік посилань**

1. Ehrlich P.R., Ehrlich A.H. *Extinction: The Causes and Consequences of the Disappearance of Species*. New York: Random House, 1981. P. 72 – 98.
2. *Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems i Human Well-being Framewook для Assessment*. Washington Island Press, 2003. 245 p.
3. Villagómez-Corté J.A., del-Ángel-Pérez A.L., Res J. Ecosystem services. *Environ. and Earth Sci.* 2013. Vol. 5 (5). P. 278 – 286.

4. Концептуальні засади державної політики і законодавства про екосистемні послуги». URL: [https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Ecosystemni-poslugy\\_Kruglyj-stil-11lyutogo\\_Prezentatsiya-proektu-kontseptsii.pdf](https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/10/Ecosystemni-poslugy_Kruglyj-stil-11lyutogo_Prezentatsiya-proektu-kontseptsii.pdf) (дата звернення: 21.03.2026).
5. Василюк О., Ільмінська Л. Екосистемні послуги: огляд. URL: [https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2020/09/EcoPoslugy\\_web\\_new.pdf](https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2020/09/EcoPoslugy_web_new.pdf) (дата звернення: 21.03.2026).
6. Мішенін Є.В., Дегтярь Н.В. Економіка екосистемних послуг: теоретико-методологічні основи. *Маркетинг і менеджмент інновацій*. 2015. № 2. С. 243 – 257.
7. Федоренко М.А. Класифікація екосистемних послуг природоохоронних територій. *Збалансоване природокористування*. 2017. № 1. С. 78 – 82.

## **ЕКОЛОГІЗАЦІЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ГЕЛІОСИСТЕМ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОНОСІВ ІЗ КЕРОВАНИМ ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ**

***Е.О. Євтушенко, асп., Б.А. Кутний, д.т.н., проф.***

*Національний університет «Полтавська політехніка імені  
Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна,  
ed.yevtushenko@gmail.com*

Екологізація енергетичних систем є одним із ключових напрямів зменшення антропогенного навантаження на довкілля та підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів. У сонячній теплоенергетиці важливе значення при цьому має не лише тип колектора чи схема підключення, а й вибір теплоносія, оскільки саме він значною мірою визначає енергоефективність, надійність, довговічність та екологічну безпеку геліосистем [1 – 3].

Традиційні теплоносії, насамперед водно-гліколеві суміші, поряд із прийнятними теплофізичними характеристиками мають низку суттєвих обмежень і потребують застосування складних систем захисту від перегріву [1, 3, 5]. За умов високих температур і стагнації вони схильні до термічної деградації, зміни властивостей, утворення продуктів розкладу, підвищення корозійної активності та зростання екологічних ризиків, пов'язаних із втратою стабільності, скороченням ресурсу та можливим витоком деградованого теплоносія [1, 2, 5]. Це погіршує роботу системи, підвищує вимоги до трубопроводів, ущільнювальних елементів, арматури й розширювального контуру та зумовлює використання дорожчих матеріалів, зокрема мідних труб і високотемпературних ущільнень. У результаті зростають вартість, матеріалоемність, ресурсні витрати та обсяги експлуатаційних відходів, що знижує загальний екологічний ефект [1, 2].

Одним із перспективних шляхів подолання цих обмежень є використання теплоносіїв із керованим фазовим переходом. У такому підході кипіння розглядається не лише як небажаний аварійний режим, а як механізм саморегуляції геліосистеми. Якщо температура кипіння

теплоносія є нижчою за критичні для традиційних контурів значення, то при досягненні граничної температури частина рідини переходить у парову фазу, тиск у системі зростає, а рідка фаза витісняється із зони перегріву до розширювального бака. Це призводить до тимчасового припинення циркуляції без застосування складної автоматики та забезпечує саморегульований режим обмеження пікових температур у контурі [1, 2]. Такий підхід створює передумови для спрощення конструктивних рішень, зниження вимог до термостійкості окремих елементів, скорочення використання матеріалів із високою собівартістю та енергоємністю виробництва, а отже – і до зменшення сумарного ресурсного навантаження на систему [1, 2].

Метою роботи є обґрунтування можливості екологізації геліосистем та підвищення їх енергоефективності шляхом застосування теплоносіїв із керованим фазовим переходом та регульованою температурою кипіння.

Завдання дослідження полягають в аналізі екологічних та експлуатаційних обмежень традиційних теплоносіїв геліосистем в умовах стагнації, обґрунтуванні доцільності застосування теплоносіїв із керованим фазовим переходом та формуванні вимог до альтернативного теплоносія для вибору його оптимального складу з урахуванням екологічної безпеки, температури кипіння, теплофізичних властивостей і експлуатаційної стабільності.

Ключовим питанням у межах запропонованого підходу є не лише заміна однієї робочої рідини іншою, а зміна самої логіки функціонування геліосистеми в умовах перегріву. За такого трактування теплоносіїв перестася бути лише середовищем для перенесення теплоти і стає активним функціональним елементом системи. Відповідно, критерії його вибору змінюються. Для традиційних геліосистем пріоритетом є максимальна термічна стійкість рідини, тоді як для систем із керованим фазовим переходом важливішими стають здатність реалізувати кипіння в заданому діапазоні температур і тисків, відтворюваність фазової поведінки, прийнятні теплофізичні характеристики, сумісність із матеріалами та екологічна безпека [2, 3]. Отже, йдеться вже не про пошук універсального теплоносія, а про формування складу з наперед заданими властивостями.

Попередні дослідження авторів [3 – 5] показали, що саме альтернативні органічні теплоносії є перспективним напрямом такого пошуку. У роботі [3] встановлено, що спиртові розчини є одним із найбільш технологічно гнучких і економічно доступних варіантів для застосування в геліосистемах. У подальших експериментальних дослідженнях було показано, що шляхом зміни концентрації спирту та введення присадок можна цілеспрямовано змінювати температуру кипіння розчину і наближати її до значень, необхідних для реалізації режиму саморегуляції [4]. Водночас у роботі щодо корозійного впливу теплоносіїв [5] підтверджено, що поведінка рідини в

режимах перегріву і стагнації безпосередньо пов'язана з довговічністю контуру та експлуатаційною надійністю системи в цілому.

Вибір спиртових розчинів як бази для формування низькокиплячих теплоносіїв зумовлений сукупністю їх фізико-хімічних та теплофізичних властивостей. Спирти мають нижчі температури кипіння, ніж вода, а їх водні розчини дозволяють регулювати фазову поведінку в широких межах. Для етанолу нормальна температура кипіння становить 78,5 °С [6], що робить його придатною базовою речовиною для формування низькокиплячих теплоносіїв. Водночас наявність води в розчині дозволяє зберегти вищу теплоємність, а зміна співвідношення компонентів — керувати температурою кипіння, температурою кристалізації, густиною та іншими характеристиками. Саме ця можливість гнучкого налаштування властивостей є принциповою перевагою водно-спиртових систем над традиційними водно-гліколевими сумішами, для яких стагнація зазвичай означає виключно небажаний і руйнівний режим [2, 3, 6].

Попередні експериментальні результати показали, що навіть без присадок зміна концентрації спирту істотно впливає на температуру кипіння розчину. Зокрема, у проведених дослідженнях для водно-спиртових розчинів було встановлено, що при зростанні концентрації спирту температура кипіння закономірно знижується, а перспективними для досягнення цільового інтервалу виявилися насамперед розчини з концентрацією близько 40 % [4]. Це свідчить про можливість цілеспрямованого регулювання фазового переходу шляхом підбору складу теплоносія, однак одночасно вказує і на потребу пошуку додаткових засобів коригування його властивостей, особливо у випадках, коли небажаним є подальше підвищення вмісту спирту.

Важливим аспектом при виборі складу альтернативного теплоносія є узгодження вимог до температури кипіння та теплотехнічної ефективності. За результатами попереднього аналізу [3], 20 %-й розчин етанолу при 20 °С має теплоємність близько 3,65 кДж/(кг·К), теплопровідність 0,54 Вт/(м·К) і динамічну в'язкість 1,9 мПа·с, тоді як для 40 %-го розчину ці показники становлять відповідно 3,15 кДж/(кг·К), 0,46 Вт/(м·К) і 2,6 мПа·с. Отже, зі зростанням концентрації спирту досягається зниження температури кипіння, але одночасно зменшуються теплоємність і теплопровідність та зростає в'язкість, що погіршує умови теплопереносу і підвищує гідравлічні втрати. Саме тому практичний інтерес становить не просто підвищення концентрації спирту, а пошук такого складу теплоносія, за якого цільовий температурний інтервал досягається при збереженні прийнятних теплофізичних характеристик. У зв'язку з цим поряд із варіюванням концентрації спирту доцільно розглядати і введення низькокиплячих органічних компонентів для тонкого коригування фазового переходу.

Якщо базовий спиртовий розчин не забезпечує потрібних параметрів кипіння, його властивості можуть бути змінені шляхом введення

функціональних присадок. Із цієї точки зору показовим є етилацетат, нормальна температура кипіння якого становить 77,06 °С [7]. Доцільність його використання пов'язана з можливістю коригування температури початку кипіння водно-спиртового розчину, для якого наявність водної складової зумовлює зміщення фазового переходу в бік вищих температур [6, 7]. Для трикомпонентних систем за участю етилацетату, етанолу та води встановлено наявність складної міжкомпонентної взаємодії та неідеальної фазової рівноваги [8], унаслідок чого навіть невелика частка етилацетату може істотно впливати на умови початку кипіння. У попередніх експериментальних дослідженнях авторів [4] додавання лише 4 % етилацетату до 20 %-го водно-спиртового розчину забезпечувало зниження температури кипіння на 5 – 11 % і дозволяло отримати значення в межах 80 – 91 °С за тисків 0,1 – 0,5 кг/см<sup>2</sup>, тобто перевести систему в інтервал температур, більш придатний для реалізації керованого фазового переходу та режиму саморегуляції в умовах роботи геліосистеми. Це дозволяє розглядати низькокиплячі органічні присадки як перспективний інструмент подальшого коригування властивостей теплоносія без істотного підвищення вмісту спирту в базовому розчині. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оцінку впливу типу та концентрації присадки не лише на температуру кипіння, а й на теплофізичні характеристики, стабільність складу, однорідність розчину, корозійний вплив, частоту заміни теплоносія та загальну експлуатаційну придатність багатоконпонентних систем для геліосистем.

Окремої уваги потребує екологічний аспект застосування теплоносіїв із керованим фазовим переходом. У цьому випадку екологічна доцільність визначається не лише нижчою токсичністю робочої рідини, а й її впливом на весь життєвий цикл системи. Обмеження пікових температур у режимах перегріву та стагнації зменшує інтенсивність термодеструкції теплоносія, навантаження на трубопроводи, ущільнення, арматуру та розширювальний контур, що сприяє подовженню ресурсу обладнання, скороченню частоти заміни робочої рідини й зменшенню обсягів експлуатаційних відходів. Відповідно, екологізація сонячних систем теплопостачання у цьому разі досягається як за рахунок вибору менш небезпечного складу теплоносія, так і за рахунок зниження матеріалоємності системи та ризиків, пов'язаних із деградацією й можливим витоком теплоносія.

Таким чином, екологічність й енергоефективність геліосистем може досягатися не лише за рахунок використання відновлюваних джерел енергії, а й шляхом оптимізації внутрішньої логіки їх функціонування. Перехід від концепції максимально термостійкого теплоносія до концепції теплоносія з керованим фазовим переходом відкриває можливості для спрощення системи, зниження матеріалоємності, підвищення експлуатаційної надійності, скорочення обсягів експлуатаційних відходів та зменшення екологічних ризиків. Уже опубліковані праці авторів про спиртові розчини

як альтернативні теплоносії для геліосистем [3 – 5] дають підстави вважати цей напрям не окремим експериментальним рішенням, а цілісною науковою концепцією, у якій підбір складу теплоносія стає одним із головних інструментів забезпечення саморегуляції, а відтак – одночасного підвищення енергоефективності, ресурсної ефективності та екологічної безпеки геліосистем.

**Висновки.** Проведений аналіз підтверджує доцільність переходу від традиційної концепції термостійкого теплоносія до концепції теплоносія з керованим фазовим переходом. Такий підхід дозволяє використати кипіння як механізм саморегуляції, зменшити негативні наслідки стагнації та сформувати передумови для спрощення, здешевлення й екологізації геліосистем. У межах цієї концепції спиртові розчини та їх композиції з функціональними присадками є найбільш обґрунтованою базою для подальшого пошуку оптимального складу теплоносія.

### Перелік посилань

1. Frank E., Mauthner F., Fischer S. Overheating prevention and stagnation handling in solar process heat applications. Technical report A.1.2. IEA SHC Task 49 / SolarPACES Annex IV. January 2015. 42 p. DOI: 10.18777/ieashc-task49-2015-0001.
2. Harrison S.J., Cruickshank C.A. A review of strategies for the control of high temperature stagnation in solar collectors and systems. *Energy Procedia*. 2012. Vol. 30. P. 793 – 804. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.11.090.
3. Yevtushenko E.O., Kutnyi B.A. Analysis of the thermophysical properties, energy efficiency and environmental safety of heat transfer fluids for solar collector circulation circuits. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2025. No. 42-01. P. 88 – 97.
4. Євтушенко Е.О., Кутний Б.А., Чернецька І.В. Оцінка можливості застосування екологічно безпечних спиртових розчинів як альтернативних теплоносіїв для геліосистем за результатами експериментальних досліджень. «Екологія. Довкілля. Енергозбереження». 2025»: Збірник матеріалів VI Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Довкілля. Енергозбереження». Полтава: НУПІ, 2026. С. 155 – 159.
5. Yevtushenko E., Chernetska I., Kutnyi B. Analysis of the corrosive effect of heat transfer fluids on solar heating system materials and changes in their properties in stagnation mode. *World scientific and technical trends*. 2025. Vol. 1, No. 26-01. P. 54 – 61. DOI: 10.30890/2709-1783.2025-42-00-027.
6. Ethanol / NIST Chemistry WebBook / National Institute of Standards and Technology. URL: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C64175&Mask=4>.
7. Ethyl acetate / NIST Chemistry WebBook / National Institute of Standards and Technology. URL: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C141786&Mask=4>.
8. Resa J.M., Goenaga J.M., Iglesias M., McLure I.A., Fernández A.G., Landín H., Orge B. Liquid-liquid equilibrium diagrams of ethanol + water + (ethyl acetate or 1-pentanol) at several temperatures. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 2006. Vol. 51, No. 4. P. 1300 – 1305. DOI: 10.1021/jc060047d.

## **«ОСОБЛИВО СЕРЙОЗНИЙ ЗЛОЧИН» АБО ЗВИЧАЙНИЙ ЕКОЦИД?**

***О.О. Єрьомін, д.т.н., проф.***

*Український державний університет науки і технологій,  
м. Дніпро, Україна  
o.o.yeromin@ust.edu.ua*

Війна у ХХІ столітті набула нові ознаки і особливості, що суттєво збільшують вплив бойових дій на стан довкілля, умови життя місцевого населення та ставлять під сумнів можливість швидкого відновлення екосистеми постраждалих регіонів. Війна України з росією пряме тому підтвердження. Суттєво збільшилася кількість та потужність вибухових снарядів, застосування балістичного озброєння стало щоденним явищем, що неможливо було уявити ще 20 років тому, коли кожен інцидент застосування балістики попадав на передові шпальти газет у всьому світі. Наразі в Україні деколи за сутки вибухають до сотні балістичних ракет середньої дальності з масою бойової частини до 1 т. Район бойових дій засмічений оптоволоконними дротами безпілотних дронів, металобрухтом військової техніки і залишками зруйнованих будівель, території щільно заміновані та не придатні до життя.

Характер ведення війни росії проти України беззаперечно має усі ознаки екоциду. Це визвано чисельною кількістю техногенних аварій, що відбуваються щоденно протягом понад 4 років. До найбільш кричущих злочинів рф слід віднести аварії танкерів з нафтопродуктами у Керченський протоці, знищення понад 20 % природоохоронних територій та 1/3 лісів України, значні втрати популяцій ендемічних видів тварин та рослин, постійні ризики ядерної катастрофи внаслідок боїв біля Запорізької АЕС та її використання росіянами у якості фортеці, нищівне руйнування міст, заводів і фабрик цивільного призначення та інших. Передбачити наслідки таких дій для світу вкрай важко. Розповсюдження шкідливих речовин не обмежується територією України. Проблема торкнеться і інших країн та континентів та вже має місто у найближчих сусідів України. Забруднене турецьке узбережжя Чорного моря, спостерігається виток та викиди шкідливих речовин у довкілля внаслідок руйнування підприємств та інших об'єктів промисловості, викиди парникових газів на території військових дій багатократно зросли від чисельних пожеж, вибухів, знищення рослин. Зруйновані результати багаторічних міжнародних та національних європейських проектів з відновлення біорізноманіття, перелітні птахи Африки позбавлені міст літнього гніздування та вимушені змінювати віками звичні маршрути пересування.

За думкою багатьох вчених найбільш кричущим фактом екоциду росії в Україні стало руйнування греблі Каховській ГЕС 6 червня 2023 року.



Підри́в військами РФ греблі Каховської ГЕС був одностайно сприйнятий світовою спільнотою, як цілеспрямований та варварський акт тероризму, що може бути прирівняний по наслідкам до застосування тактичної ядерної зброї потужністю до 10 кілотонн (за оцінками OSINT (Open Source Intelligence) аналітиків [1]). Незважаючи на відсутність радіаційного забруднення, інші фактори цієї екологічної катастрофи цілком тотожні наслідкам ядерного вибуху. Це чисельні людські жертви, затоплення більше 50 крупних населених пунктів. Десятки тисяч мешканців України постраждали безпосередньо від цього акту тероризму, сотні тисяч людей залишилися без питної води та системи водопостачання на невизначений строк. Загибель безлічі риб та тварин, загроза зникнення 28 із 567 видів тварин на півмільйоні гектарів заповідних територій України національного та міжнародного значення, зокрема Чорноморському біосферному заповіднику [2] – лише маленька частина наслідків катастрофи. Без дніпровської води під загрозою опинилася робота та безпека Запорізької АЕС – п'ятої за потужністю атомної електростанції у світі та найбільшої АЕС у Європі.

За Женевською конвенцією при веденні воєнних дій забороняється завдавати шкоди навколишньому середовищу та, як наслідок, здоров'ю та виживанню населення (Стаття 55). Дамби та греблі, атомні електростанції за конвенцією є спорудами, що містять небезпечні сили (Стаття 56), та їх руйнування є воєнним злочином [2].

У березні 2023 року Європейський парламент проголосував за включення екоциду до законодавства ЄС, а вже після подій терористичного злочину в червні 2023 р. ЄС прискорив дії щодо впровадження закону про екоцид. У резолюції ПАРЄ № 2477 від 2023 року (п. 6) Асамблея Ради Європи (РЄ) запропонувала перегляд кримінального права на рівні РЄ з метою встановлення нового кримінального злочину «екоцид» та внесення цього злочину до Римського статуту Міжнародного кримінального суду (п. 7). Асамблея закликала держави-члени РЄ визнати «універсальну юрисдикцію щодо екоциду та найсерйозніших екологічних злочинів» та введення злочину екоциду до національного кримінального законодавства (“the crime of ecocide into their national criminal legislation”) [3].

Слід відмітити, що і раніше наміри визначити норми щодо протидії екоциду у світі та введення кримінальної відповідальності за такі дії неодноразово декларувалася у резолюціях та рекомендаціях ПАРЄ. У п. 8.5 резолюції ПАРЄ № 2398 та п. 3.1 рекомендацій ПАРЄ № 2213 «Вирішення питань кримінальної та цивільної відповідальності в контексті зміни клімату» від 29.09.2021 р. (які були прийняті 91 голосом «за» при 23 таких, що утрималися, у т.ч. 12 осіб – представники РФ) було рекомендовано розглянути можливість запровадження злочину екоциду «до свого національного кримінального законодавства» [4, 5]. 13 – 14 травня 2025 року Комітет Міністрів Ради Європи схвалив Конвенцію РЄ про захист

довкілля засобами кримінального права. Але в оприлюдненому тексті Конвенції відсутні положення про екоцид як кримінальний злочин [6].

У ст. 31 Конвенції йдеться про кваліфікацію «особливо серйозного злочину», у тому числі такого, що а) спричиняє руйнування; б) завдає незворотну, широкомасштабну та істотну шкоди; в) завдає тривалу, широкомасштабну та істотну шкоди екосистемі значних розмірів або екосистемі, що має екологічну цінність, або середовищу існування в межах охоронюваної території; г) завдає шкоду якості повітря, ґрунту чи води. З цього положення випливає можливість оцінки таких діянь як «... злочину, що тотожний із екоцидом», про що йдеться і у Директиві Європейського парламенту та Європейської Ради (PE-CONS 82/23) від 13 березня 2024 року, де у п. 21 ці дії кваліфіковані як умисні кримінальні злочини, що «можуть охоплювати поведінку, яку можна порівняти з «екоцидом», який вже охоплюється законодавством деяких держав-членів і який обговорюється на міжнародних форумах» [7].

Згідно із статтею 5 другої частини Римського статуту Міжнародного кримінального суду, що прийнятий 17 липня 1998 року, під його юрисдикцію підпадають чотири найтяжчих злочини: геноцид, злочини агресії, військові злочини та злочини проти людяності. Згідно статі 29 статуту «злочини, що підпадають під юрисдикцію Суду, не підлягають жодному строку давності».

Прогресивні сили Європейського союзу, всього світу вже довгий час намагаються ввести поняття екоцид, як п'ятий з найтяжчих злочинів проти людства, на який може бути розповсюджений Римський статут Міжнародного кримінального суду та за який безповоротно наступає кримінальна відповідальність. Але, нажаль, останній крок між визнанням екоцидом такої кримінальної дії «особливо серйозного злочину» (в трактуванні 31 статті Конвенції Ради Європи про захист довкілля засобами кримінального права) досі не зроблений. Частіше за все йдеться про невизначене «співвідношення» між цими діями, тлумачення екоциду, як окремого злочину, що не має досі юридичного формулювання, незавершеності побудови нормування злочинів або взагалі «злочину, що відповідає порогу екоциду, але який не названо екоцидом з ряду політико-правових міркувань». Нажаль таке розмите тлумачення не дає впевненості у швидкій реалізації пропозицій Європейського парламенту та в безповоротності покарання за екоцид, розв'язує руки терористам для скоєння чергових актів агресії у всьому світі.

З нашої точки зору найбільш об'єктивну оцінку у трактуванні тяжкості злочинів проти людства, у тому числі визначенні екоциду, може об'єктивно дати виключно сторона, що потерпає від таких дій, населення, що мешкає на територіях, які підверглися руйнуванню, зазнали незворотну шкоду. Хибно не зважати на думку потерпілих і спиратися тільки на фахову оцінку експертів, що подекуди не мали можливість провести дослідження

зсередини, не оцінили втрати на місці скоєння екоциду, не мали змоги порівняти стан довкілля до і після катастрофи і зафіксувати зміни показників екосистеми та постраждалих територій. І тим більше в цих питаннях не треба дослухатися до аргументів сторони, що безпосередньо має відношення до скоєння злочинів. Як показує практика роботи Європейських інституцій – РЄ, ООН, ПАРЕ, єдиною силою, що заважає визнати злочини проти людності зазвичай є сам злочинець і терорист, який подекуди має «право вето» та постійно їм користується, прикриваючи власні злочини всілякою брехнею та фейками.

Народ України впевнений в розсудливості Європейського співтовариства, в його спразі до справедливості і розцінює дії росії у війні проти України як безперечний екоцид, що потребує невідвертого та справедливого міжнародного кримінального покарання. Ми впевнені, що екоцид наряду із геноцидом, іншими видами злочинності проти людства має стати об'єктом міжнародної кримінальної відповідальності та міжнародного кримінального права.

### **Перелік посилань**

1. Велика Г. Як Україна оговтується після найбільшої штучної катастрофи XXI століття. *Екополітика*. URL: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/sogodni-richnicya-pidrivu-кахovskoi-ges-ekologichni-naslidki-pidrivu-ta-yak-vona-viglyadaie-zaraz/> (дата звернення: 30.03.2026).
2. Додатковий протокол до Женевських конвенцій від 12 серпня 1949 року, що стосується захисту жертв міжнародних збройних конфліктів (Протокол I), від 08.06.1977. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995\\_199#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_199#Text).
3. Parliamentary Assembly of the Council of Europe. Resolution 2477 (2023). Environmental impact of armed conflicts. URL: <https://pace.coe.int/en/files/31600/html>.
4. Parliamentary Assembly of the Council of Europe. Resolution 2398 (2021). Addressing issues of criminal and civil liability in the context of climate change. URL: <https://pace.coe.int/en/files/29512/html>.
5. Parliamentary Assembly of the Council of Europe. Recommendation 2213 (2021). Addressing issues of criminal and civil liability in the context of climate change. URL: <https://pace.coe.int/en/files/29514/html>.
6. 134<sup>th</sup> Session of the Committee of Ministers (Luxembourg, 13-14 May 2025) Council of Europe Convention on the Protection of the Environment through Criminal Law. URL: <https://search.coe.int/cm?i=0900001680b5cfad>.
7. Directive (EU) 2024/1203 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 on the protection of the environment through criminal law and replacing Directives 2008/99/EC and 2009/123/EC. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L\\_202401203](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401203).

## **ВІДНОВЛЕННЯ ВОДНОГО ТА ЗЕМЕЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС**

***Ю.В. Зеленько, д.т.н., проф, О.О. Єрьомін, д.т.н., проф.,  
О.В. Гупало, к.т.н., доц.***

*Український державний університет науки і технологій,  
м. Дніпро, Україна*

*j.v.zelenko@ust.edu.ua, o.o.yeromin@ust.edu.ua, o.v.gupalo@ust.edu.ua*

Руйнування греблі Каховської ГЕС у червні 2023 року спричинило глибоку екологічну кризу в Україні, насамперед у Дніпропетровській, Херсонській та Миколаївській областях. Втрата основного джерела водопостачання – дніпровської води, призвела до активного використання високосолоних вод р. Інгулець, що містять значні концентрації хлоридів і сульфатів, а внаслідок й до деградації та засолення ґрунтів. Тисячі гектарів сільськогосподарських земель втрачають продуктивність, а якість питної води суттєво погіршилася. Європейський досвід демонструє ефективність інтегрованих стратегій управління водними ресурсами – поєднання технологій очищення, біоремедіації та раціонального зрошення. Проте для українських регіонів необхідні адаптовані рішення, що враховують локальні гідрогеологічні, кліматичні та техногенні особливості, враховують реалії воєнного стану в Україні, існуючі логістичні та економічні проблеми в цих регіонах. На сьогодні першочерговим необхідне створення комплексної системи відновлення водних і земельних ресурсів, заснованої на органічному поєднанні сучасних знань та методів оцінки сучасного стану складових екологічної системи, якості наявних ресурсів і техногенного навантаження на довкілля.

Системний аналіз якості водного та земельного потенціалу громад після руйнування Каховської ГЕС, що був зроблений авторами, дозволив рекомендувати комплексне застосування сорбційних, мембранних і біотехнологічних методів очищення води та реабілітації засолених ґрунтів, впровадження замкнених циклів повторного використання ресурсів задля сприяння формуванню стійких систем водокористування, підвищенню екологічної безпеки регіонів, прилеглих до Каховської ГЕС, та відновленню продуктивності аграрних територій півдня України.

Подолання наслідків агресії росії – руйнування Каховської ГЕС – є стратегічно важливим для забезпечення життєдіяльності багатьох територіальних громад, відновлення аграрного потенціалу та підвищення стійкості інфраструктури до воєнних і кліматичних ризиків.

Зміни, що пов'язані з екологічною катастрофою, масштабні та виражаються, насамперед, у змінах у водогосподарському балансі південного регіону України. Внаслідок припинення функціонування Каховського водосховища та магістрального водогону «Дніпро-Миколаїв»

р. Інгулець стала основним джерелом водопостачання для міст Кривий Ріг і Миколаїв, а також для зрошення сільськогосподарських угідь. Води Інгульця характеризуються підвищеною мінералізацією через потрапляння промислових стоків, зокрема гірничо-збагачувальних комбінатів Криворізького регіону. Вміст хлоридів і сульфатів значно перевищує встановлені гранично допустимі концентрації, а концентрація розчинених солей сягає більш ніж  $16000 \text{ мг/дм}^3$ . Існуючі очисні споруди працюють у складних умовах воєнного часу, що унеможлиблює стабільне дотримання нормативів якості води. На сьогодні відсутні економічно доступні технології знесолення шахтних і промислових вод, що придатні для використання у специфічних умовах регіону. Навіть після проведення заходів з екологічного оздоровлення, якість води р. Інгулець не відповідає нормативам. У 2025 – 2026 роках спеціальним розпорядженням КМУ було дозволено скидання із ставка-накопичувача у балці Свистунова, розташованого на території Криворізького району Дніпропетровської області, надлишків зворотних вод у р. Інгулець, зокрема, надлишків зворотних вод гірничорудних підприємств Кривбасу [1].

На сьогодні наявна відсутність економічно доступних технологій знесолення шахтних і промислових вод, придатних для використання у специфічних умовах даного регіону. Децентралізовані джерела у сільських громадах також не розв'язують проблему – підземні води часто мають надмірну жорсткість і солоність. Це спричиняє засолення та деградацію ґрунтів, зниження врожайності й розвиток процесів дезертифікації. Відсутність промивання полів прісною водою призводить до накопичення солей у кореневмісному шарі, що посилює екологічну кризу [2, 3].

У країнах Європейського Союзу подібні проблеми контролюються впровадженням інтегрованих стратегій управління водними ресурсами, які поєднують раціональні методи зрошення, біотехнологічні рішення, системи повторного використання води та адаптацію до гідрологічних і кліматичних умов регіонів [4]. Європейський досвід демонструє, що застосування комплексних кліматично нейтральних технологій забезпечує значний екологічний і господарсько-економічний ефект.

Водночас, пряме перенесення європейських моделей у південні регіони України є неможливим через відмінності у кліматичних, гідрогеологічних і техногенних умовах. Українські громади потребують адаптованих підходів, заснованих на використанні місцевих природних і техногенних ресурсів, що дозволить сформувати стійкі системи водокористування та відновлення деградованих земель.

Серед сучасних методів знесолення найпоширенішими є зворотний осмос і промислова дистиляція [5, 6]. Основними недоліками систем зворотного осмосу залишаються біофаулінг, масштабування та потреба у застосуванні хімічних реагентів для попередньої обробки води. Промислова дистиляція, своєю чергою, є надзвичайно енерговитратною: для

випаровування і відведення тепла потрібно близько 2270 кДж/кг або 0,63 кВт·год/кг.

Останні наукові дослідження свідчать про ефективність комбінованих технологій, що інтегрують електродіаліз, мембранні процеси, зворотний осмос і сорбційні методи. Перспективним напрямом розвитку є використання розроблених в УДУНТ фізико-хімічних і біотехнологічних рішень – сорбційних матриць, модифікованих біогенними компонентами, які стимулюють мікробіологічні процеси відновлення ґрунтів, а також розвиток мембранних технологій одержання прісної води методом низькотемпературного випаровування шахтних вод з подальшою конденсацією водяної пари у теплообміннику-конденсаторі.

Додаткові можливості відкриває використання місцевих ресурсів – мінералів, рослинної біомаси та відходів виробництв – для створення сорбентів і фільтрувальних матеріалів. Після використання в системах водопідготовки такі матеріали можуть служити матрицями-носіями поживних речовин для реабілітації ґрунтів. Крім того, можливе вилучення з води накопичувальних басейнів сполук натрію, кальцію та магнію у вигляді сульфатів і гідроксидів як потенційно корисних технологічних продуктів.

### Перелік посилань

1. Про скидання надлишків зворотних вод у р. Інгулець. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 жовтня 2025 р. № 1179-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1179-2025-%D1%80#Text> (дата звернення: 01.04.2026).
2. Frontiers in Environmental Science. Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review. 2023. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2021.712831/full>.
3. Nature Sustainability. Impact of War on Water Resources in Ukraine. 2024. URL: [https://www.researchgate.net/publication/372103783\\_Impact\\_of\\_War\\_on\\_Hydroecosystems\\_of\\_Ukraine\\_Conclusion\\_of\\_the\\_First\\_Year\\_of\\_the\\_Full-Scale\\_Invasion\\_of\\_Russia\\_a\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/372103783_Impact_of_War_on_Hydroecosystems_of_Ukraine_Conclusion_of_the_First_Year_of_the_Full-Scale_Invasion_of_Russia_a_Review)
4. FAO. Saline Soils and Their Management. 2023. URL: <https://www.fao.org/newsroom/detail/fao-launches-first-major-global-assessment-of-salt-affected-soils-in-50-years/en>
5. Ahmed M.A. et al. Fouling in reverse osmosis membranes: monitoring, mitigation and research needs. *Water Research* / PMC. 2023. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10102236/>.
6. Curto D. et al. A Review of Water Desalination Technologies. *Applied Sciences*. 2021. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/2/670>.

# ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ БІШОФІТУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

*О.Е. Ілляш, к.т.н., доц., Г.В. Ганошенко*  
*Національний університет «Полтавська політехніка*  
*імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна*  
iloks2504@gmail.com

Сучасні полігони твердих побутових відходів (ТПВ) є складними інженерно-екологічними системами, які характеризуються високим рівнем техногенного навантаження на довкілля. В процесі їх експлуатації формуються фільтрат та біогаз, що містять широкий спектр забруднюючих речовин, включаючи важкі метали, органічні сполуки та токсичні гази [1, 2].

Проблема міграції забруднюючих речовин особливо актуальна для полігонів, що не обладнані сучасними системами ізоляції. У таких умовах речовини можуть проникати у ґрунтові води та поширюватися за межі полігону, створюючи ризики для екосистем і здоров'я населення.

Метою дослідження є оцінка ефективності застосування відходів бішофіту як стабілізуючого матеріалу для зменшення екологічного впливу полігонів ТПВ.

Бішофіт ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) є природним мінералом, що характеризується високою реакційною здатністю. Його використання базується на здатності іонів магнію взаємодіяти з компонентами відходів, змінюючи їх фізико-хімічні властивості [3].

Одним із ключових механізмів є утворення малорозчинних сполук, які обмежують рухливість важких металів. Це дозволяє значно зменшити їх вимивання та поширення у навколишньому середовищі [4].

Крім хімічного впливу, відходи бішофіту забезпечують фізичну стабілізацію укривних шарів. Завдяки гігроскопічності вони утримують вологу, що сприяє зменшенню пиління та покращує експлуатаційні характеристики поверхні полігону. Використання відходів бішофіту також сприяє ущільненню матеріалу, що призводить до зниження коефіцієнта фільтрації. Це, у свою чергу, зменшує проникнення атмосферних опадів у тіло полігону та обсяги утворення фільтрату (табл. 1.).

Таблиця 1 – Вплив бішофіту на властивості полігону ТПВ

| Показник              | Без обробки | З бішофітом |
|-----------------------|-------------|-------------|
| Коефіцієнт фільтрації | Високий     | Знижений    |
| Пиління               | Інтенсивне  | Мінімальне  |
| Міграція металів      | Активна     | Обмежена    |
| Щільність шару        | Низька      | Підвищена   |

Важливим аспектом є використання відходів виробництва бішофіту, що дозволяє реалізувати принципи циркулярної економіки та зменшити навантаження на довкілля за рахунок повторного використання ресурсів [5].

Результати досліджень показують, що застосування відходів бішофіту дозволяє підвищити щільність укривного шару, зменшити пиловиділення та стабілізувати біохімічні процеси у тілі полігону.

Загалом, використання відходів бішофіту забезпечує комплексний ефект, що включає як хімічну стабілізацію, так і фізичне покращення властивостей матеріалу.

Отже, відходи бішофіту можуть бути ефективним інструментом підвищення екологічної безпеки полігонів ТПВ.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на визначення оптимальних технологічних параметрів застосування відходів бішофіту та оцінку їх довгострокового впливу.

### Перелік посилань

1. Report from the commission to the European parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52023DC0304>.
2. Silpa Kaza, Lisa Yao, Perinaz Bhada-Tata, and Frank Van Woerden. What a Waste 2.0 A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/697271544470229584/pdf/What-a-Waste-2-0-A-Global-Snapshot-of-Solid-Waste-Management-to-2050.pdf>.
3. Fan C., Zhang J., Zhao Y. Review on cement stabilization/solidification of municipal solid waste incineration fly ash. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25 (36). P. 36415 – 36433. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3577-8>.
4. Wang L., Jiang Y., Li H. Introducing reactive magnesia to activate chloride/sulfate in MSWI fly ash for immobilization of Pb, Zn, Cd. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2025. Vol. 13 (7). P. 3510 – 3522. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c08763>.
5. Final Report – Summary Recommendations / Circular Economy Approaches in Solid Waste Management. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099200012132212911/pdf/P173141084571c0f3084a307acc29708a0e.pdf>

## ПЕСТИЦИДНЕ НАВАНТАЖЕННЯ НА ҐРУНТИ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

**А.О. Ільїна, PhD з Наук про Землю, ст. викладач**

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса,

Україна

[ilina\\_ann@ukr.net](mailto:ilina_ann@ukr.net)

З огляду на посилення антропогенного навантаження на ґрунти, винесення поживних речовин разом із врожаєм, їх забруднення хімічними засобами та відходами тваринництва, а також процеси дегуміфікації й ерозії



сприяють деградації природних ландшафтів. При вирощуванні сільськогосподарських культур значна частина застосованих пестицидів потрапляє до ґрунту як у результаті їх прямого внесення, так і через змивання опадами з поверхні рослин, що обробляються. Отже, ґрунт займає центральне місце у регулюванні долі пестицидів у навколишньому середовищі та виконує подвійну роль – накопичення і очищення [1].

Полтавська область є одним з провідних регіонів України за обсягами агровиробництва. Сільське господарство формує понад третину валового регіонального продукту. Рослинництво домінує в структурі виробництва, забезпечуючи більше 70 % валової продукції. Основними культурами є кукурудза на зерно, озима пшениця, соняшник, ячмінь, ріпак і соя. У регіоні активно впроваджуються сучасні технології землеробства: мінімальний та нульовий обробіток ґрунту, точне землеробство, застосування високопродуктивних гібридів. Проте зростання інтенсивності землеробства спричиняє ризики деградації ґрунтів, виснаження мікробіоценозів, збільшення пестицидного навантаження. Попри це, виробничі показники залишаються високими: середня врожайність кукурудзи перевищує 8 – 9 т/га, соняшнику – 2,5 – 3,0 т/га, озимої пшениці – 5 – 6,5 т/га [2].

Агровиробництво Полтавської області базується на зернових, технічних, бобових та овочевих культурах. Полтавщина має один із найпотужніших серед регіонів України агропромисловий комплекс, а за обсягом виробництва валової продукції сільського господарства область займає 2 місце серед регіонів України. У 2024 році за валовим збором основних сільськогосподарських культур Полтавщина посіла 1-ше місце в державі, кукурудзи на зерно 2-ге місце, цукрових буряків – 4-те місце [3].

Така структура посівних площ у Полтавській області у 2025 році, де кукурудза займає 55 %, а соняшник – 35 % усіх площ, безпосередньо визначає обсяги та інтенсивність застосування пестицидів у регіоні. Разом ці дві культури охоплюють 90 % посівних площ, і саме вони належать до найінтенсивніших за потребою у засобах захисту рослин. Кукурудза на зерно має підвищену чутливість до бур'янів і ґрунтових шкідників, що обумовлює потребу у застосуванні протруйників насіння, ґрунтових та післясходових гербіцидів. За сприятливих умов поширюється кукурудзяний метелик, що потребує інсектицидного контролю. Соняшник є стратегічно важливою технічною культурою, вирощування якої потребує обов'язкового застосування фунгіцидів для захисту від таких хвороб як фомоз, склеротиніоз і фомопсис [4]. Найбільшу небезпеку для рослин на початкових етапах розвитку становлять бур'яни, тому використання гербіцидів у цей період є вкрай необхідним. Отже, структура посівних площ зумовлює значне застосування гербіцидів, фунгіцидів та інсектицидів, що пояснюється біологічними особливостями вирощуваних культур і високим рівнем інтенсивності землеробства в регіоні [5].

Проблема накопичення залишкових кількостей пестицидів у ґрунтах є однією з найважливіших при оцінці екологічної стійкості агроландшафтів. Полтавська область, як один із провідних аграрних регіонів Лісостепу України, відзначається інтенсивним застосуванням засобів захисту рослин. Це зумовлює необхідність систематичного контролю за рівнем їх залишкових концентрацій у ґрунтовому середовищі [6]. Для аналізу сучасних тенденцій у 2018 – 2021 роках було використано дані державного агрохімічного обстеження, а також статистичну інформацію щодо рівня пестицидного навантаження.

На рис. 1 представлений сумарний обсяг внесення пестицидів (в активній речовині) під урожай сільськогосподарських культур в Полтавській області у 2018 – 2021 роках.

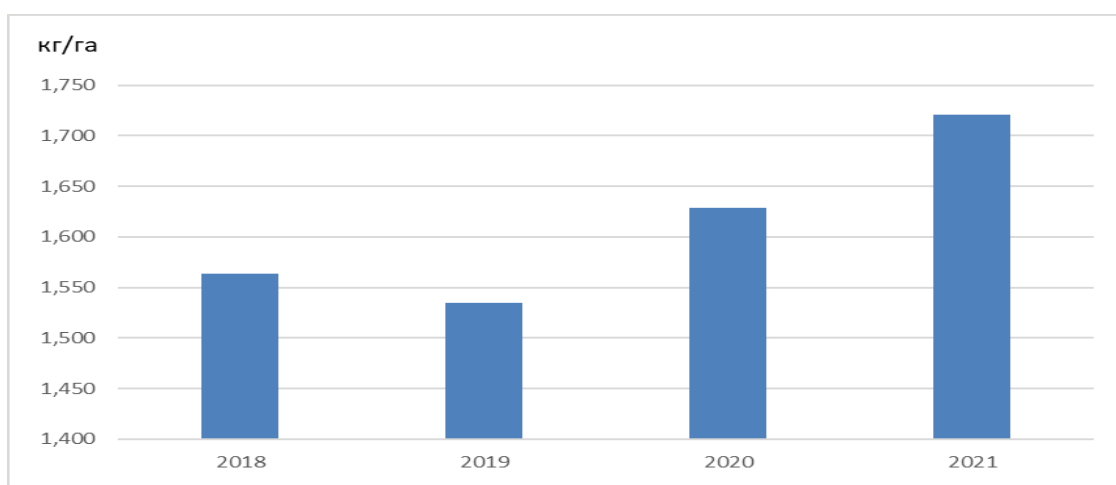


Рисунок 1 – Обсяг внесених пестицидів під урожай сільськогосподарських культур в Полтавській області у 2018 – 2021 рр., кг/га

Як показано на рис. 1, упродовж 2018 – 2021 років простежується чітка тенденція до зростання обсягів застосування пестицидів [7]. Зокрема, у 2018 році середній рівень їх внесення становив 1,564 кг/га, тоді як у 2019 році цей показник дещо знизився до 1,535 кг/га. Ймовірно, таке зменшення було зумовлене сприятливими погодними умовами та нижчим рівнем розвитку патогенних організмів, що дало змогу оптимізувати системи захисту рослин.

Водночас зниження обсягів застосування пестицидів виявилось короткочасним: уже у 2020 році зафіксовано їх суттєве зростання до 1,629 кг/га, а у 2021 році показник досяг найвищого рівня за досліджуваний період – 1,721 кг/га. Отже, упродовж 2018 – 2021 років рівень внесення пестицидів зріс приблизно на 11 %, що свідчить про посилення хімічного навантаження на агроєкосистеми регіону.

На рис. 2 відображено динаміку використання основних груп засобів захисту рослин у Полтавській області протягом 2018 – 2021 рр. Зокрема, проаналізовано зміни в обсягах застосування фунгіцидів і бактерицидів,

гербіцидів, інсектицидів та акарицидів, регуляторів росту, а також інших видів засобів захисту рослин.

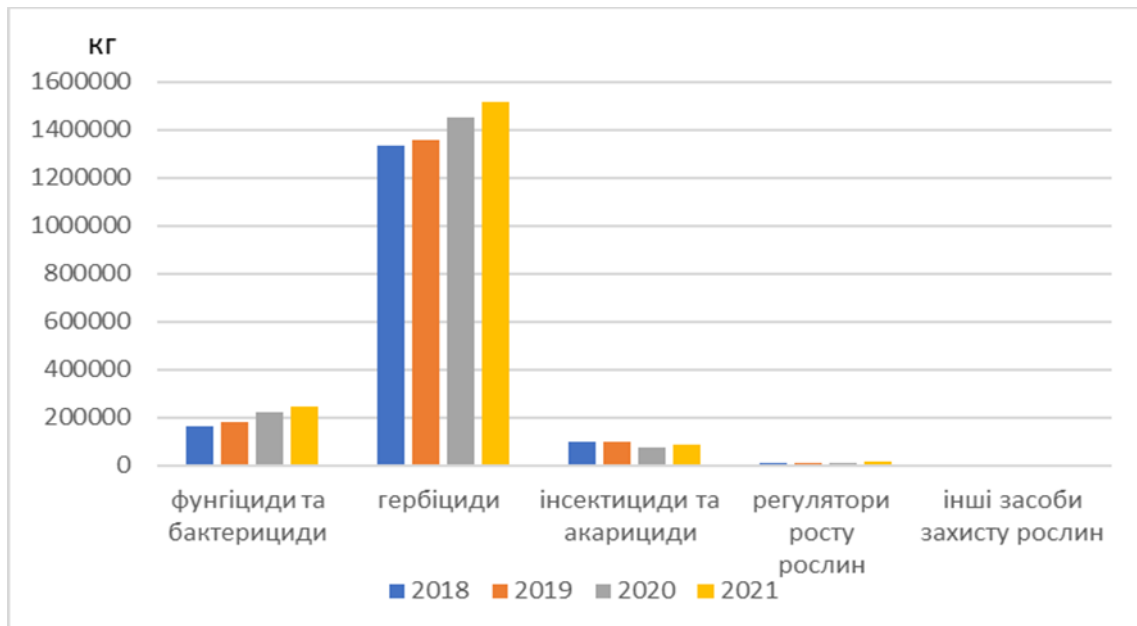


Рисунок 2 – Обсяг внесених пестицидів за видами у Полтавській області (2018 – 2021 рр.), кг

Розподіл пестицидів за окремими групами дозволив детальніше оцінити структуру хімічного навантаження та визначити пріоритетні напрями їх використання в агровиробництві регіону. Як видно з рис. 2, домінуючу групу у структурі використаних засобів захисту рослин становлять гербіциди – понад 80 % від загального обсягу. На другому місці за обсягом застосування перебували фунгіциди та бактерициди, кількість яких у 2018 – 2021 рр. зростає з 163 тис. кг до понад 240 тис. кг. Це вказує на ускладнення фітосанітарної ситуації в регіоні, що проявлялося інтенсивним поширенням септоріозу, фомозу, альтернаріозу та інших грибних захворювань.

Інсектициди та акарициди застосовувалися у значно менших кількостях – у межах 80 – 120 тис. кг залежно від року. Найменшу питому вагу в структурі займають регулятори росту та інші засоби захисту рослин. Їх використання має цільовий характер і пов'язане, передусім, із специфічними технологіями вирощування окремих культур.

На рис. 3 наведено дані щодо використання основних груп засобів захисту рослин при вирощуванні сільськогосподарських культур у Полтавській області у 2023 році.

Аналізуючи інформацію щодо застосування основних груп засобів захисту рослин під урожай сільськогосподарських культур у Полтавській області у 2023 році можна відмітити, що під соняшник, кукурудзу, буряк та сою використовують великі обсяги гербіцидів, в той час як під пшеницю –

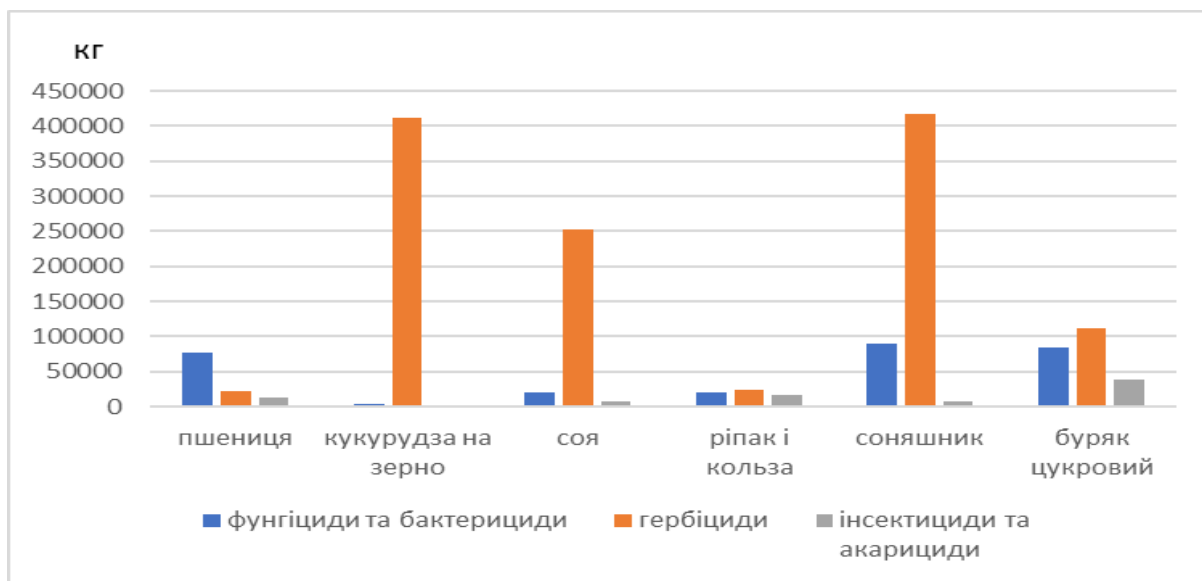


Рисунок 3 – Застосування основних груп засобів захисту рослин під урожай сільськогосподарських культур у Полтавській області у 2023 році, кг/га

фунгіциди та бактерициди. Структура використання пестицидів на більшості культур чітко свідчить про переважання гербіцидного захисту, що зумовлено особливостями біології культур і технологіями їх вирощування. Зростання застосування гербіцидів пов'язане, передусім, з поширенням технологій Mini-Till та No-Till, збільшенням площ соняшнику й кукурудзи, а також загостренням проблеми резистентних бур'янів [8]. Значна частка фунгіцидів свідчить про підвищений фітосанітарний ризик і широке поширення грибних хвороб у регіоні. Інсектициди застосовуються у відносно невеликих обсягах, проте їх роль суттєво зростає в роки масового розвитку шкідників.

Отже, сучасний рівень використання пестицидів у Полтавській області вказує на значну залежність агровиробництва від хімічних засобів захисту рослин. Для забезпечення екологічної безпеки агроландшафтів регіону необхідно вдосконалювати системи інтегрованого захисту рослин, оптимізувати норми внесення препаратів з урахуванням здатності ґрунтів до самоочищення, а також посилювати контроль за використанням пестицидів та їх впливом на компоненти довкілля.

### Перелік посилань

1. Fatichi S., Or D., Walko R., Vereecken H., Young M.H., Ghezzehei T.A. et al. Soil structure is an important omission in earth system models. *Nature Communications*. 2020. No 11 (522).
2. Полтавська ОВА. Агропромисловий комплекс. URL: <https://poda.gov.ua/page/agropromyslovyy-kompleks> (дата звернення: 22.03.2026).
3. Регіональна Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Полтавській області у 2024 році. Полтава, 2025. 158 с.

4. Akashe M.M., Pawade U.V., Nikam A.V. Classification of pesticides: a review. *Int. J. Res. Ayurveda Pharm.* 2018. No 9 (4). P. 144 – 150.
5. Андрієнко В.О., Моклячук Л.І., Андрієнко Г.Г. та ін. Оцінка впливу забруднення стійкими пестицидами на формування мікробіоценозу ґрунту. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2006. № 100. С. 281 – 287.
6. SuperAgronom.com. URL: <https://superagronom.com/news/20152-za-2024-rik-ploscha-polivu-na-derjavnih-zroshuvalnih-sistemah-u-poltavskiy-oblasti-zrosla-na-364-ga> (дата звернення: 20.03.2026).
7. Державна служба статистики України. URL: [https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/cg.htm](https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/cg.htm) (дата звернення: 3.04.2025)
8. Гутянський Р.А. Комплексний вплив пестицидів на забур'яненість посівів і врожайність насіння сої. *Карантин і захист рослин*. 2020. № 3 (260). С. 41 – 44.

## **ЕКОЛОГО-АГРОХІМІЧНА ОЦІНКА ҐРУНТІВ ВІННИЦЬКОЇ ОБЛАСТІ**

***В.Г. Ільїна, к.геогр.н., доц., А.Р. Барська, маг.***

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса,  
Україна  
vilina653@gmail.com*

Теоретичною основою агроекологічного принципу бонітування ґрунтів є закон рівнозначимості та незамінності факторів життєзабезпечення рослин, до яких, за К. А. Тімірязєвим, належать світло, тепло, живлення та волога. Перші з них (світло і тепло) зараховані до космічних, два останні (живлення й волога) – до земних факторів. Бонітування ґрунтів як «метод визначення ґрунтової родючості» (за В.В. Докучаєвим), дає можливість надати кількісну оцінку якості ґрунтів, тобто виявити, наскільки один ґрунт кращий за інший. Показником якості або еколого-агрохімічного стану ґрунту є бонітет, виражений у балах. Бонітет являє собою інтегральну величину різноманітних властивостей і природних ознак, виражених у мг, %, мг-екв, мм, т та інших одиницях вимірювання, які перераховують у бали бонітету. Внутрішні природні властивості й ознаки ґрунту виступають як критерії бонітування критеріїв і діляться на такі дві групи: основні (типові) та модифіковані [1].

Агрохімічна оцінка якості ґрунтів характеризується фізико-хімічними властивостями з використанням показників, які визначають за результатами аналізів агрономічного обстеження цих ґрунтів і вираження в балах за 100-бальною оцінкою. За 100 балів береться еталонний ґрунт з найвищим значенням показників властивостей ґрунту, інші ґрунти отримують оцінку відповідно еталона.

Середні дані діагностичних ознак служать основою для встановлення бала бонітету ґрунтів, який обчислюється таким чином. Для кожного

діагностичного показника з групи основних типових критеріїв спочатку обчислюють бал бонітету як процентне відношення фактичного значення критерію по еталонного (стандартного):

$$B = \frac{\Phi}{E} * 100,$$

де  $B$  – бал ґрунту за вмістом гумусу (%), вологи (мм) чи поживних елементів (мг/кг);  $\Phi$  – активний вміст гумусу (%), вологи (мм) чи поживних речовин (мг/кг);  $E$  – вміст гумусу (%), вологи (мм) чи поживних речовин (мг/кг) в еталонному ґрунті.

На щільність ґрунту (г/см) і кислотність вводяться відповідні поправочні коефіцієнти, які множаться на 100 і переводяться у 100 балів.

З усіх вирахованих у такий спосіб основних показників для цього ґрунту розраховують середньоарифметичний агрохімічний бал бонітету (всі бали за агрохімічною оцінкою додаються і діляться на кількість показників). У такий спосіб переводять абсолютне значення ознаки у відносне. Але для цього потрібне обґрунтоване нормативне забезпечення основних (типових) ознак для визначення еталонного ґрунту [1].

Для кожного діагностичного показника, що є одним з основних (типових) критеріїв, обчислюють бонітувальний бал як процентне відношення фактичного значення ознаки до стандарту (еталона). З усіх обрахованих у такий спосіб основних типових критеріїв для цього ґрунту розраховується як середньоарифметичний середній бал. Вирахований за основними критеріями середній бал коригується потім за допомогою модифікаційних критеріїв через поправочні коефіцієнти на негативні властивості ґрунту і на клімат. Остаточний бал бонітету може бути визначений і способом послідовного множення вихідного бала на відповідні коефіцієнти поправок [2].

Коригування нормативної врожайності проводиться на найбільш істотні чинники. Спочатку на еродованість, заболоченість, засоленість, а потім на ґрунтові показники (гранулометричний склад, ступінь кислотності, вміст рухомих поживних речовин). Поправочні коефіцієнти вводимо тільки на ті показники, які найбільше будуть знижувати врожайність. Алгоритм розрахунку такий:

$$Y_{роз} = Y_{нор} (K_1 * K_2 * K_3 * \dots K_n),$$

де  $Y_{роз}$  – урожай розрахунковий, ц/га;  $Y_{нор}$  – урожай нормативний, ц/га;  $K_1, K_2, K_3, K_n$  – поправочні коефіцієнти.

Основними ґрунтами Вінницької області є чорноземи, які займають 50,1 % площі сільськогосподарських угідь, а саме: чорноземи типові – 28,4 %, чорноземи лучні – 1,8 % та чорноземи опідзолені – 19,9 %, 17,9 %

площ займають темно-сірі опідзолені ґрунти середнього рівня родючості. Майже третина території сільськогосподарських угідь зайнята ясносірими лісовими ґрунтами з відносно низькою родючістю. Також 98 тис. га зайнято малопродуктивними ґрунтами – дерново-підзолистими, мочаристими і мочарними, лучно-болотними та болотними, які для виробничого використання потребують значних енергетичних і матеріальних витрат та капітальних вкладень.

Чорнозем звичайний слабоеродований середньогумусний важко суглинковий:

$K_1$  – поправочний коефіцієнт на еродованість ґрунту – 0,90;

$K_2$  – поправочний коефіцієнт на гранулометричний склад ґрунту – 0,90;

$K_3$  – поправочний коефіцієнт на вміст обмінного калію – 1,10.

Для дерново-підзолистого супіщаного ґрунту поправочні коефіцієнти будуть інші:

$K_1$  – поправочний коефіцієнт на гранулометричний склад ґрунту 0,85;

$K_2$  – поправочний коефіцієнт на ступінь кислотності – 0,90;

$K_3$  – поправочний коефіцієнт на вміст доступного азоту – 0,95;

$K_4$  – поправочний коефіцієнт на вміст обмінного калію – 0,90;

$K_5$  – поправочний коефіцієнт на вміст рухомого фосфору – 1,15.

На основі розрахованих даних про урожай сільськогосподарських культур, які вирощуються в умовах Вінницької області, визначено бонітет ґрунту поля в балах, який наведено в табл 1.

Таблиця 1 – Агроекологічна оцінка деяких районів Вінницької області

| Райони        | Бал бонітету | Клас якості                 |
|---------------|--------------|-----------------------------|
| Літинський    | 35 балів     | VII клас, (низької якості)  |
| Жмеринський   | 36 балів     | VII клас, (низької якості)  |
| Тиврівський   | 39 балів     | VII клас, (низької якості)  |
| Тростянецький | 40 балів     | VII клас, (низької якості)  |
| Шаргородський | 40 балів     | VII клас, (низької якості)  |
| Хмільницький  | 57 балів     | VI клас, (середньої якості) |
| Калинівський  | 54 бали      | VI клас, (середньої якості) |
| Ямпільський   | 54 бали      | VI клас, (середньої якості) |
| Бершадський   | 50 балів     | V клас, (середньої якості)  |
| Козятинський  | 50 балів     | V клас, (середньої якості)  |

Так, визначено, що райони Літинський (35 балів), Жмеринський (36 балів), Тиврівський (39 балів), Тростянецький (40 балів) і Шаргородський (40 балів) належать до VII класу, що свідчить про наявність земель низької якості. Натомість райони Хмільницький (57 балів), Калинівський (54 бали), Ямпільський (54 бали), Бершадський (50 балів) і Козятинський (50 балів) мають кращі показники і віднесені до V – VI класів, тобто землі середньої якості. Найвищий бал бонітету зафіксовано в Хмільницькому районі, що говорить про найкращу якість ґрунтів серед наведених у таблиці.

Найнижчий бал – у Літинському районі, що свідчить про найменшу придатність земель для сільськогосподарського використання. Таким чином, табл. 1 дозволяє зробити висновки щодо потенціалу аграрного виробництва в різних районах області залежно від якості ґрунтів.

В цілому у Вінницькій області нараховується 149,9 тис. га низької якості, з них віднесено: до VIII класу якості (21 – 30 балів) – 2,6 тис. га та VII класу якості (31 – 40 балів) – 147,3 тис. га. 375,7 тис. га земель середньої якості (задовільні ґрунти), з них належать до VI класу якості (41 – 50 балів) 248,2 тис. га та V класу (51 – 60 балів) – 127,5 тис. га. 10,8 тис. га земель високої якості (хороші ґрунти) IV класу якості (61 – 70 балів). Результати порівняння якісної оцінки ґрунтів за два тури обстежень свідчать, що у Барському, Жмеринському, Липовецькому, Літинському, Погребищенському та Ямпільському районах якість ґрунтів майже не змінилася за 10 років досліджень. На 3 – 8 балів зросла якісна оцінка ґрунтів Чечельницького, Тульчинського, Немирівського, Могилів-Подільського, Барського, Бершадського, Калинівського та Гайсинського районів. Зниження показників якісної оцінки сільськогосподарських земель зафіксовано у Крижопільському, Томашпільському, Козятинському та Іллінецькому районах.

#### **Перелік посилань**

1. Рідей Н.М., Строкаль В.П., Рибалко Ю.В. Екологічна оцінка агробіоценозів: теорія, методика, практика. Херсон: Видавництво Олді – плюс, 2011.

#### **THE CURRENT STATE AN FUTURE DEVELOPMENT OF INTERNATIONAL EDUCATIONAL NETWORKS AS A TOOL FOR ENVIRMENTAL EDUCAION UNDER CRISIS CONDITIONAL**

***V. Khrutba, Doctor of Technical Sciences, Professor, Y. Nikitchenko,  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Eberswalde University for Sustainable Development, Eberswalde, Germany,  
I. Balykin, Candidate of Historical Sciences, Associate Professor  
Universität Mannheim, Mannheim, Germany  
Viktoriia.Khrutba@gmail.com***

The contemporary higher education system in Ukraine operates under multifaceted challenges related to military conflict, ecosystem degradation, and the urgent need for post-war environmental recovery. These conditions necessitate the development of new models of interuniversity cooperation aimed at integrating education, research, and practice. In this context, the digitalization of education serves as a key driver for the emergence of innovative forms of interuniversity collaboration that extend beyond individual projects and purely technical solutions.



Practice shows that after the completion of funding, projects often face difficulties in sustaining achieved results and maintaining collaboration among partners. A viable solution to this challenge is networking – the establishment of interinstitutional educational networks that bring together educators and researchers around shared goals, themes, and initiatives [1].

Although educational networks are not a new phenomenon, today particular importance is attributed to niche networks formed around specific thematic areas or contexts. Such networks provide deeper expertise, foster stable horizontal connections among partners, and contribute to long-term institutional cooperation beyond the scope of formal grant funding [2].

The role of digitalization and network-based approaches in creating a foundation for the sustainable development of universities and facilitating their integration into the global educational space has already been confirmed by numerous successful examples. At the same time, a key condition for transforming such digital initiatives into sustainable educational ecosystems is their ability to continue functioning and evolving beyond the duration of project funding. A clear example of this transition is the evolution of the DTN Moodle platform, developed within the Ukrainian–German project *Digital Teaching Network for the Transformation of Environmental Education* (2022–2025, DAAD [3]), into a viable academic network – the Ukrainian-German Digital Teaching Network (DTN) [4].

Initially, the DTN Moodle platform primarily served a functional purpose as a technical infrastructure for hosting online courses in environmental education developed by Ukrainian and German university instructors. This solution proved to be critically important in response to the war in Ukraine and the associated crisis phenomena in higher education. Universities experienced the loss of part of their material infrastructure, institutional relocation took place, and a significant number of faculty members and students were forced to move abroad. Under these conditions, the platform ensured the continuity of the educational process (within specific courses), enabling students to continue their studies regardless of location, while allowing instructors to maintain professional activity and sustain communication with students and colleagues.

At present, the DTN Moodle platform serves as a functional pedagogical hub, integrating specialized resources, academic expertise, and methodological innovations from a network of partner higher education institutions (HEIs). The platform facilitates the hosting of proprietary curricula by academic staff while ensuring continuous access for students to high-quality instructional materials via a streamlined digital interface. Concurrently, the project has advanced the digital literacy of faculty members and enhanced didactic frameworks through a series of specialized webinars, training programs, and workshops. These initiatives focused on modernizing online pedagogical strategies, including digital didactics, gamification, multimedia content development, and the integration of immersive Virtual Reality (VR) technologies into the instructional process.

Supported by DAAD funding and under the strategic coordination of the Eberswalde University for Sustainable Development (HNEE) [5], the consortium has expanded to encompass over 18 Ukrainian and 4 German universities. During the 2022–2025 cycle, the DTN Moodle ecosystem saw the implementation of eight distinct course categories and over 50 instructional modules, including integrated VR-based geospatial tours of nature conservation zones. The registered user base has exceeded 1,000 participants, primarily representing faculty and students within the disciplines of Ecology, Environmental Engineering, and Information Technology across various Ukrainian regions. This period was further characterized by the delivery of approximately ten thematic webinars involving over 200 educators, eight residential workshops in Eberswalde for 55 participants, and 15 academic mobilities for Ukrainian HEI staff. The involvement of experts from German partner institutions – specifically the University of Mannheim [6] and HNEE – facilitated a robust knowledge-sharing environment and intensified international scientific cooperation. Furthermore, the contribution of online courses by faculty from the universities of Mannheim, Wildau, and Greifswald to the DTN Moodle repository exemplifies a successful model for the international integration of educational resources within a unified digital academic space.

The collaborative development of curricula, continuous communication within specialized working groups, and proactive networking during both virtual and on-site events have established a robust foundation for advancing strategic partnerships between Ukrainian and German universities. These professional linkages have progressively transcended the scope of the original project, catalyzing new collaborative research, inter-institutional frameworks, and educational initiatives that have secured further support through various international funding programs.

Consequently, the project and the DTN Moodle platform have evolved beyond a mere technical tool or a repository for educational resources; they have become a dynamic interactive environment. This ecosystem has fostered the formation of inter-university teams, the development of collaborative instructional materials, and the emergence of innovative didactic practices. As a result, DTN Moodle has been transformed into a collaborative space that bridges formal and informal learning, establishing a definitive foundation for the continued evolution of the Ukrainian–German Digital Teaching Network academic alliance.

A logical progression of this interaction and international cooperation, aimed at enhancing the training of future environmental specialists, is the establishment of the German–Ukrainian university network within the ConnectED project: *German-Ukrainian University Network for Empowering Higher Education in Environmental Protection and Nature Conservation*. This initiative is being implemented between 2025 and 2029 with the support of the DAAD and the German Federal Ministry of Education and Research [7]. The Eberswalde

University for Sustainable Development (HNEE) serves as the project coordinator in partnership with Ukrainian universities. The project is an integral component of the broader German–Ukrainian University Networks (DUHN) program, which is dedicated to supporting and reconstructing Ukraine’s higher education system.

The primary objective of the project is to sustain and strengthen the German–Ukrainian partnership by exploring new avenues of cooperation and creating opportunities for capacity building in both education and research.

The core areas of activity are presented in Fig. 1.

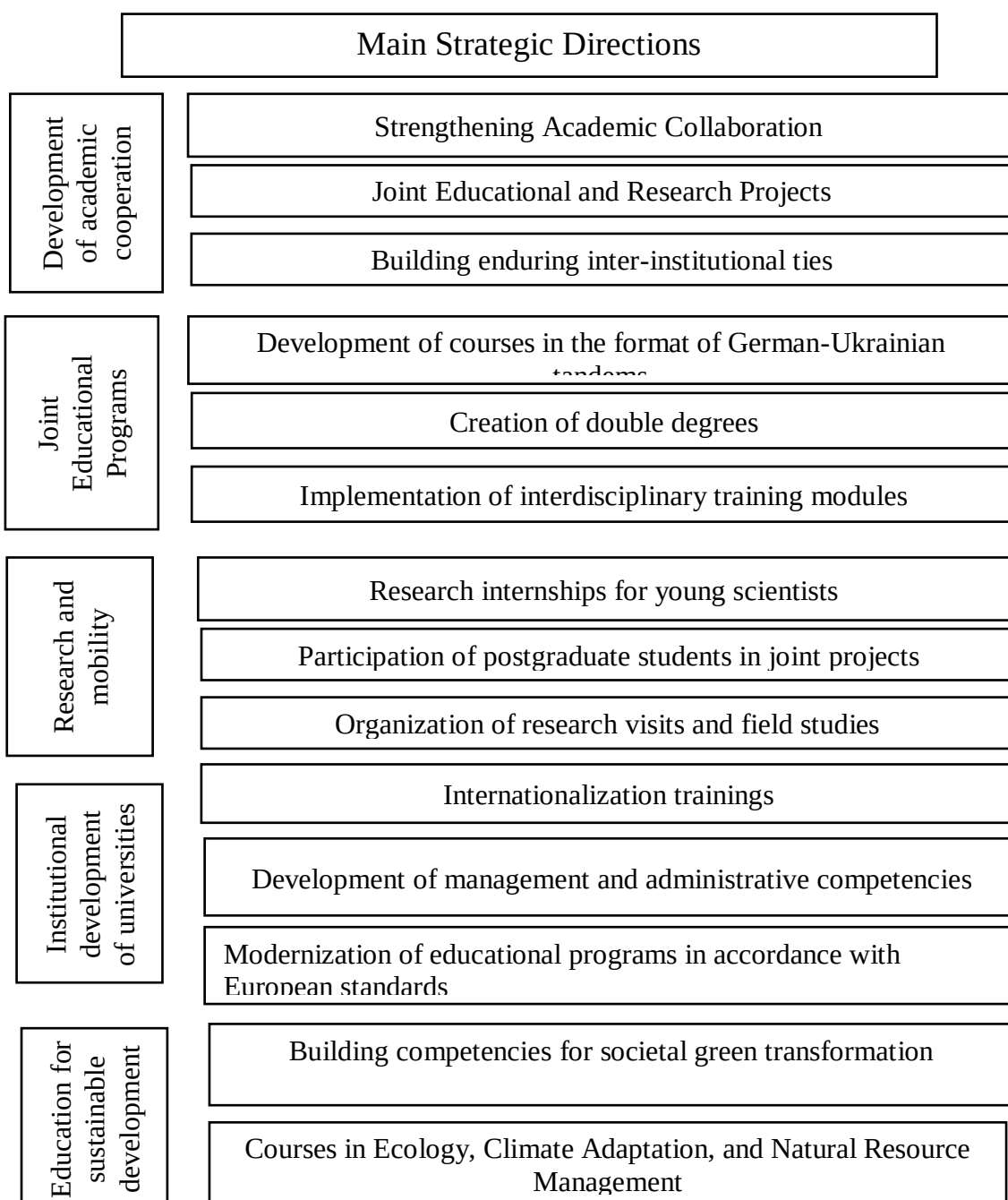


Figure 1 – Main tasks of the network

The central task is the creation of the "ConnectED" German–Ukrainian University Network, which consolidates the outcomes of previous projects while engaging new partners from both nations. The network facilitates collaborative activities and initiatives, serving as a long-term framework for sustainable partnership and ensuring the continuity of cooperation beyond the project's official lifecycle [8].

ConnectED is a German–Ukrainian university network that integrates higher education institutions, academic bodies, organizations, and individual experts to facilitate and strengthen academic and research synergy within the field of higher education.

The network provides a long-term platform for sustainable and impactful collaboration, fostering a continuous exchange of knowledge and professional expertise across international borders.

Through collaborative teaching and research, the development of dual and joint degree programs, interdisciplinary learning camps, the promotion of early-career researchers, and targeted professional development for university staff, ConnectED supports capacity building, institutional resilience, and the modernization of higher education – objectives that are of paramount importance for the Ukrainian partners.

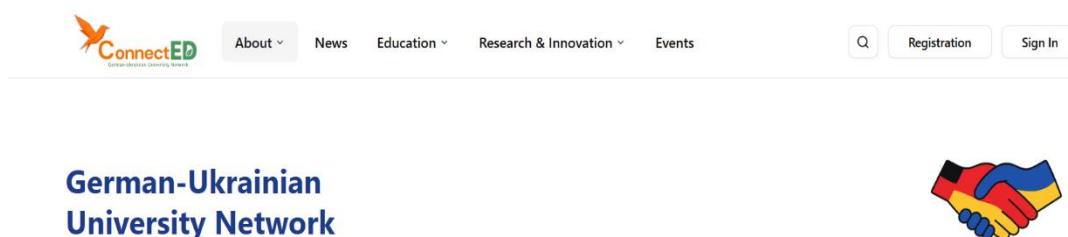


Figure 2 – Website of the German-Ukrainian university network ConnectED

The pivotal outcome is the establishment of the ConnectED German–Ukrainian University Network, which:

- Consolidates more than 25 universities and research institutions;
- Integrates existing collaborative experience while engaging new strategic partners;
- Establishes a platform for long-term knowledge exchange.

In summary, the current development of international educational networks within the field of environmental science demonstrates a strategic transition from isolated digital solutions toward the formation of resilient inter-institutional ecosystems. These systems are capable of ensuring educational continuity amidst crisis-related challenges. The experience gained from implementing Ukrainian–German initiatives – specifically the evolution of the DTN digital platform into a comprehensive academic network – underscores the effectiveness of integrating digitalization, networking approaches, and international partnerships to preserve

and advance educational potential. In this context, the ConnectED project emerges as a qualitatively new stage aimed at the institutionalization of collaboration, the expansion of partnership ties, and the assurance of their long-term sustainability beyond the duration of grant-based funding. Its implementation facilitates the synergy of education, science, and practice, the development of joint degree programs and collaborative research, the enhancement of participants' professional competencies, and the overall strengthening of universities' institutional capacity. In conclusion, these networks are crucial for modernizing Ukrainian higher education, ensuring its European integration, and preparing professionals to tackle current environmental and social challenges.

### References

1. Using modern digital tools for the transformation of education in times of crisis and danger: A textbook / J.-P. Mund, E. Wallor, A. Golovko, Yu. Nikitchenko, V. Khrutba, Yu. Khrutba, M. Dekhtyar, Yu. Zakharova, G. Kireitseva, I. Patseva, V. Mykhailenko, L. Kondratyuk Київ, 2024. 98 p.
2. Khrutba V., Nikitchenko Y., Balykin I., Nechyporenko A., Frohme M. Academic & educational networking as a mechanism of University cooperation in the digital era. *European Journal of Interdisciplinary*. 2025. Issues, 2(2). P. 84 – 97. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17707764>
3. Ukrainian-German Teaching Network for a Digital Transformation of Environmental Education (Consolidation and Expansion Phase 2025) HNE Eberswalde: Ukrainian-German Teaching Network 2025.
4. Ukrainian-German Digital Teaching Network. URL: <https://ukrdigital.hnee.de/>.
5. Eberswalde University for Sustainable Development. URL: <https://www.hnee.de/en/>.
6. University of Mannheim. URL: <https://www.uni-mannheim.de/>.
7. URL: [https://www.daad-ukraine.org/en/duhn/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.daad-ukraine.org/en/duhn/?utm_source=chatgpt.com).
8. ConnectED. Vision & Mission | ConnectED

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ВОДОКОРИСТУВАЧІВ-ЗАБРУДНЮВАЧІВ НА СТАН ПОВЕРХНЕВИХ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ В МЕЖАХ ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

*А.В. Колісник, к.геогр.н., доц.*

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса,*

*Україна*

*kolisnyk.a.v@gmail.com*

У Чернігівській області є актуальною проблема антропогенного впливу на стан природних вод. Однією з основних екологічних проблем області є стала тенденція до значного забруднення водних об'єктів внаслідок неупорядкованого відведення стічних вод та надмірне антропогенне навантаження на водні об'єкти внаслідок екстенсивного способу ведення водного господарства. Метою дослідження є оцінка впливу водокористувачів-забруднювачів на стан поверхневих водних

об'єктів в межах Чернігівської області. *Об'єктом* – поверхневі води в межах Чернігівської області. *Предмет дослідження*: вплив об'єктів господарської діяльності на поверхневі води в межах Чернігівської області в 2019 – 2023 роках. Вихідні дані – це офіційна інформація про показники водозабору та водовідведення в Чернігівській області в 2019 – 2023 рр. за даними Екологічних паспортів регіону [1 – 5]; гідрохімічна інформація про стан поверхневих вод у контрольних пунктах спостереження в межах Чернігівської області; дані про водокористувачів-забруднювачів з Офіційного сайту Деснянського басейнового управління [6].

Чернігівщина – одна з найбагатших областей України за запасами водних ресурсів. Уздовж її західних меж протікає річка Дніпро. Головна річка Чернігівщини – Десна, яка тече з північного сходу на південний захід. Її ліві притоки – Сейм, Доч, Остер; праві – Убідь, Мена, Снов, Білоус.

На території області значущими точковими джерелами забруднення є підприємства комунального господарства, які здійснюють безпосередньо скиди стічних вод у річки Десна, Борзенка, Снов, Білоус, В'юниця, Удай, Іченька. Переважну частку дифузного забруднення вод визначає вплив сільського господарства у результаті внесення добрив, розорювання, впливу тваринницьких комплексів.

Основними показниками водогосподарської діяльності є водоспоживання і водовідведення. Перший негативно впливає на гідрологічний баланс водних об'єктів, а другий на стан та якість річкових вод. Максимальна доля водозабору в регіоні приходить на промислові потреби регіону і вона збільшується з кожним роком, у 2019 р. становила 61 %, а в 2023 р. – 97 %. Доля водозабору на сільськогосподарські потреби з кожним роком стає все меншою – в 2019 р. вона складала 13 %, а в 2023 р. – 3 %.

Аналізуючи динаміку використання води в регіоні встановлено, що чітко прослідковується тренд до зменшення водозабору для забезпечення економічної діяльності об'єктів господарської діяльності. За видами потреб більше всього свіжої води з поверхневих водних об'єктів у Чернігівській області використовується для виробничої галузі, на другому місці – господарсько-питні, а на третьому – сільськогосподарські потреби (рис. 1).

Аналізуючи структуру водовідведення (рис. 2) слід відмітити, що доля забруднених зворотних вод є незначною в 2022 та 2023 рр. на відміну від періоду 2019 – 2021 рр. Це свідчить про зменшення антропогенного навантаження в останні роки дослідження. Паралельно з цим відмічається зменшення кількості скинутих зворотних вод всіх категорій у поверхневі водні об'єкти.

За даними Екологічних паспортів встановлено, що основними водокористувачами-забруднювачами поверхневих об'єктів є підприємства комунального господарства: КП «Господар» (с. Варва Прилуцького району), КП ВКГ «Ічень» (м. Ічня Прилуцького району), КП «Бахмач-

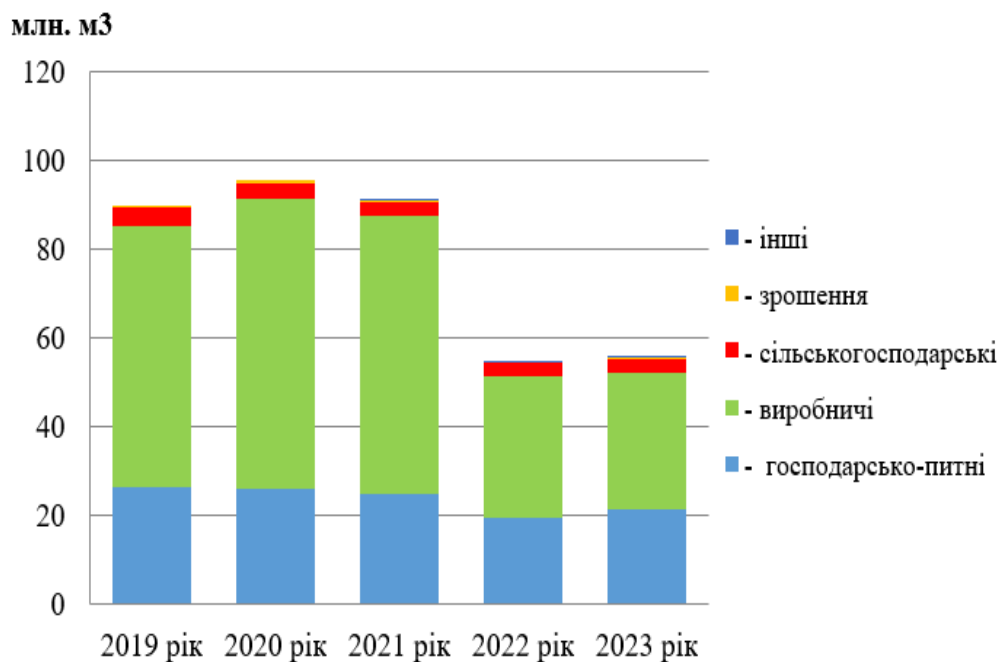


Рисунок 1 – Використання свіжої води на різні потреби в Чернігівській області за період 2019 – 2023 рр.

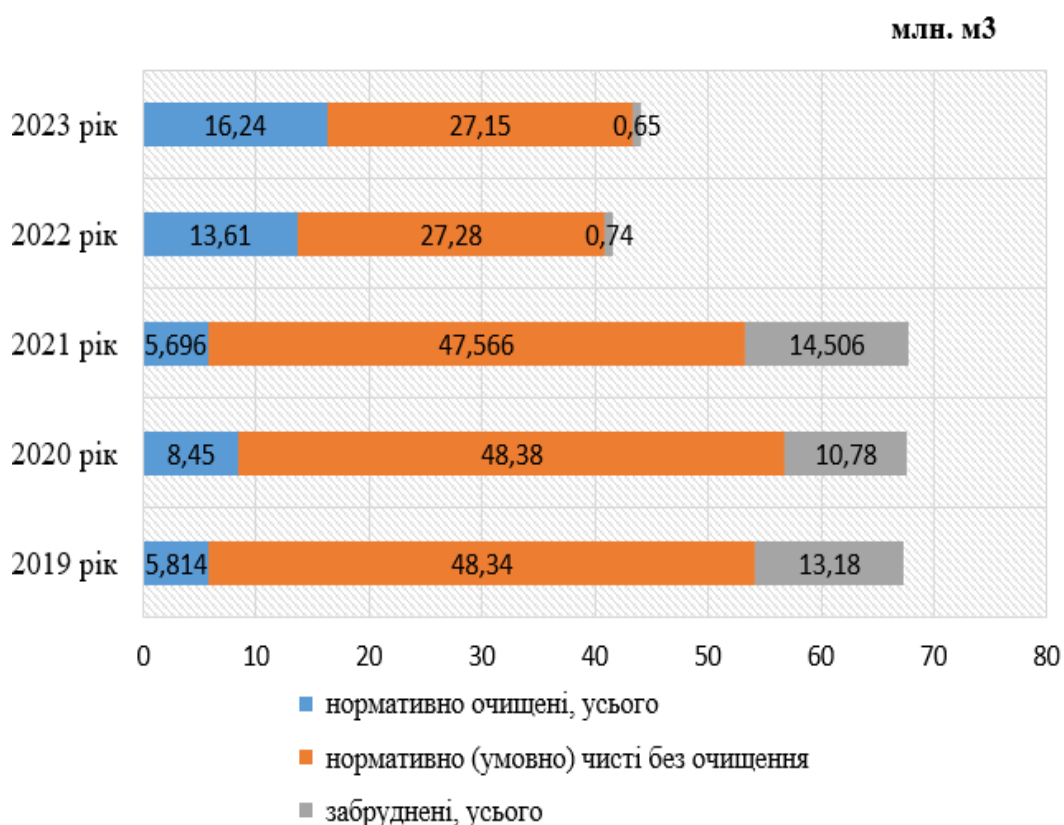


Рисунок 2 – Скид зворотних вод у поверхневі водні об'єкти у Чернігівській області за період 2019 – 2023 рр.

водсервіс» (м. Бахмач Ніжинського району), Остерське ВУЖКГ (м. Остер Чернігівського району), КП «Козелецьводоканал» (с. Козелець

Чернігівського району), КП «Вода» (Коропська селищна рада с. Короп Новгород-Сіверського району), КП «Куликівське ВУЖКГ» (с. Куликівка Чернігівського району), ПрАТ «Комунальник» (м. Сновськ Корюківського району), КП «Ревна» (м. Семенівка Корюківського району).

На рис. 3 представлені результатами систематизації офіційної інформації за кожен звітний рік з даними про скидання водокористувачами-забруднювачами забруднювальних речовин із зворотними водами в поверхневі водні об'єкти регіону. Найбільший внесок у забруднення річкових вод вносять такі показники як сухий залишок, хлориди, сульфати, нітрати.

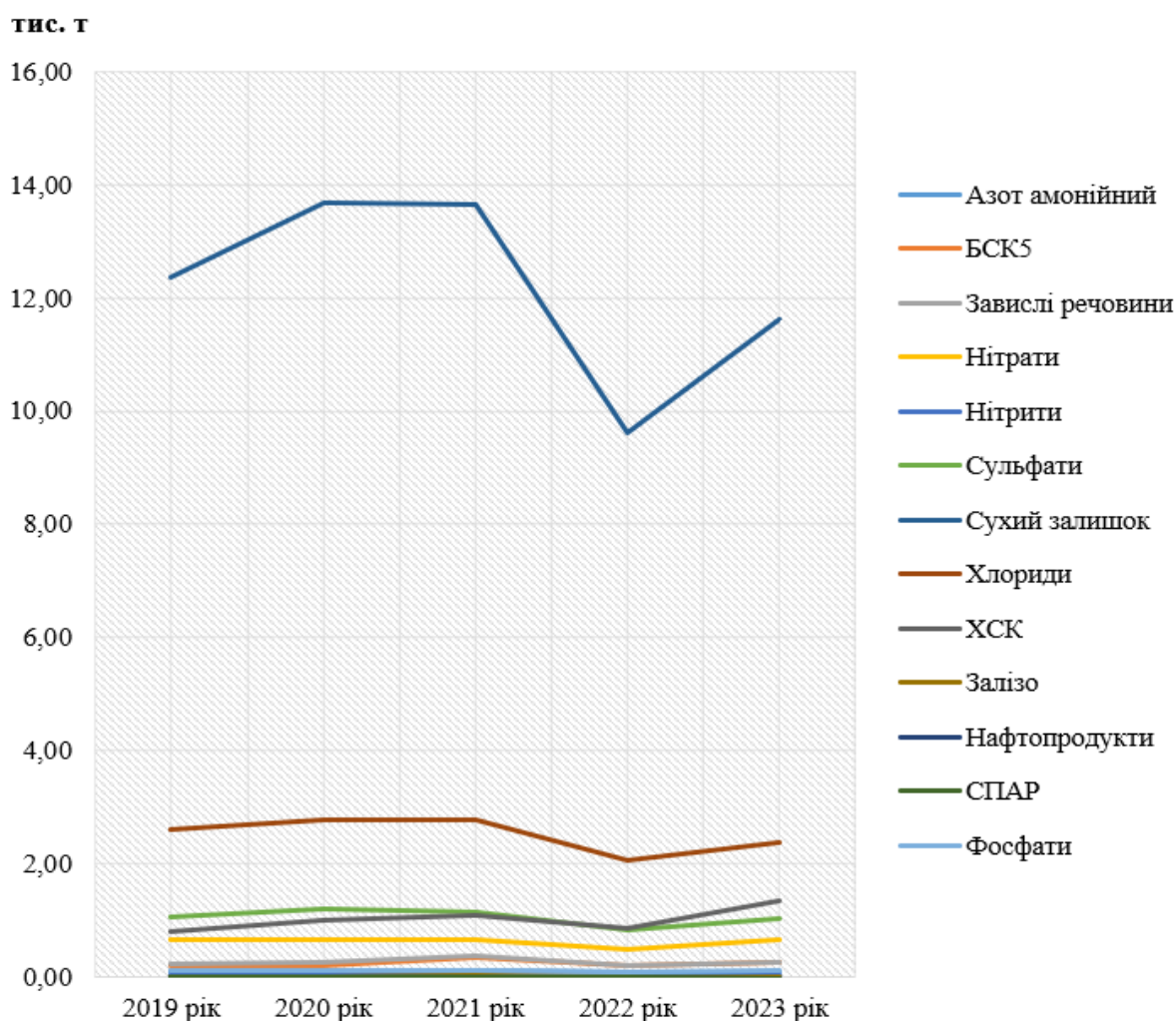


Рисунок 3 – Скидання забруднювальних речовин у поверхневі водні об'єкти у Чернігівській області за період 2019 – 2023 рр.

На основі отриманих результатів побудовано графіки для двох типів об'єктів господарської діяльності: чотири останніх у переліку ми умовно відносимо до потужних підприємств, оскільки показники скидів зворотних вод ними на порядок вищі, ніж у інших десяти, які представлені на першому з двох рисунків (рис. 4).



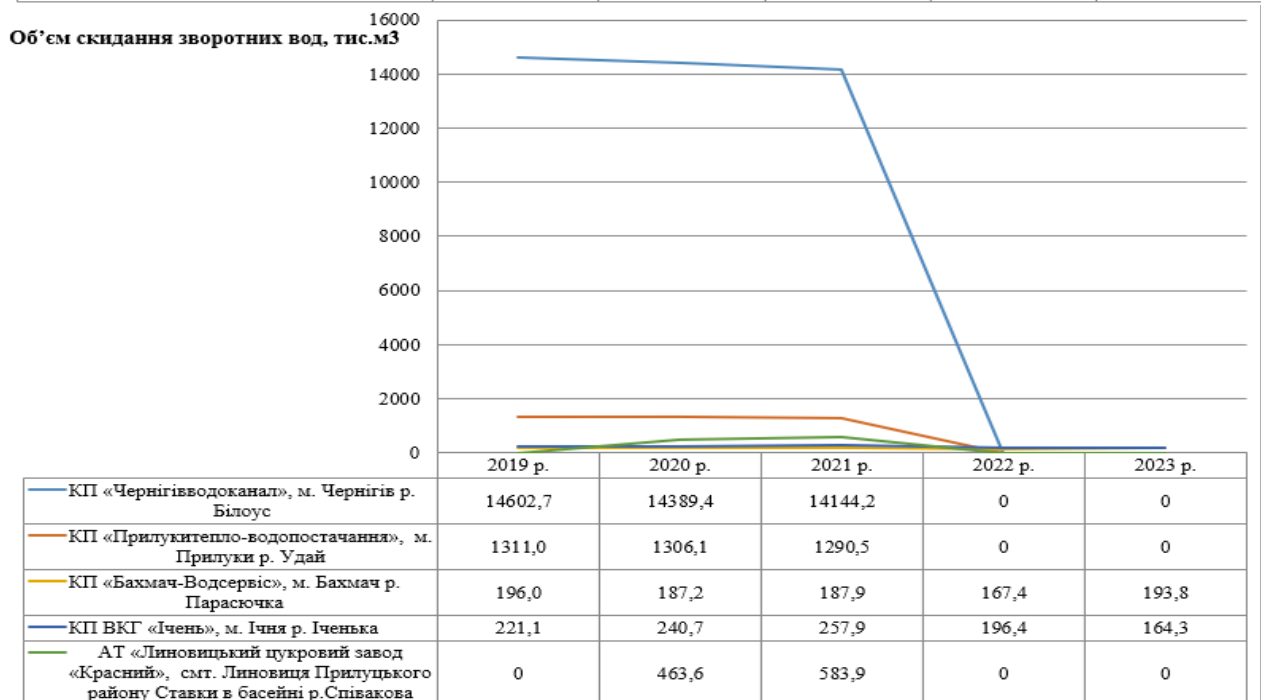
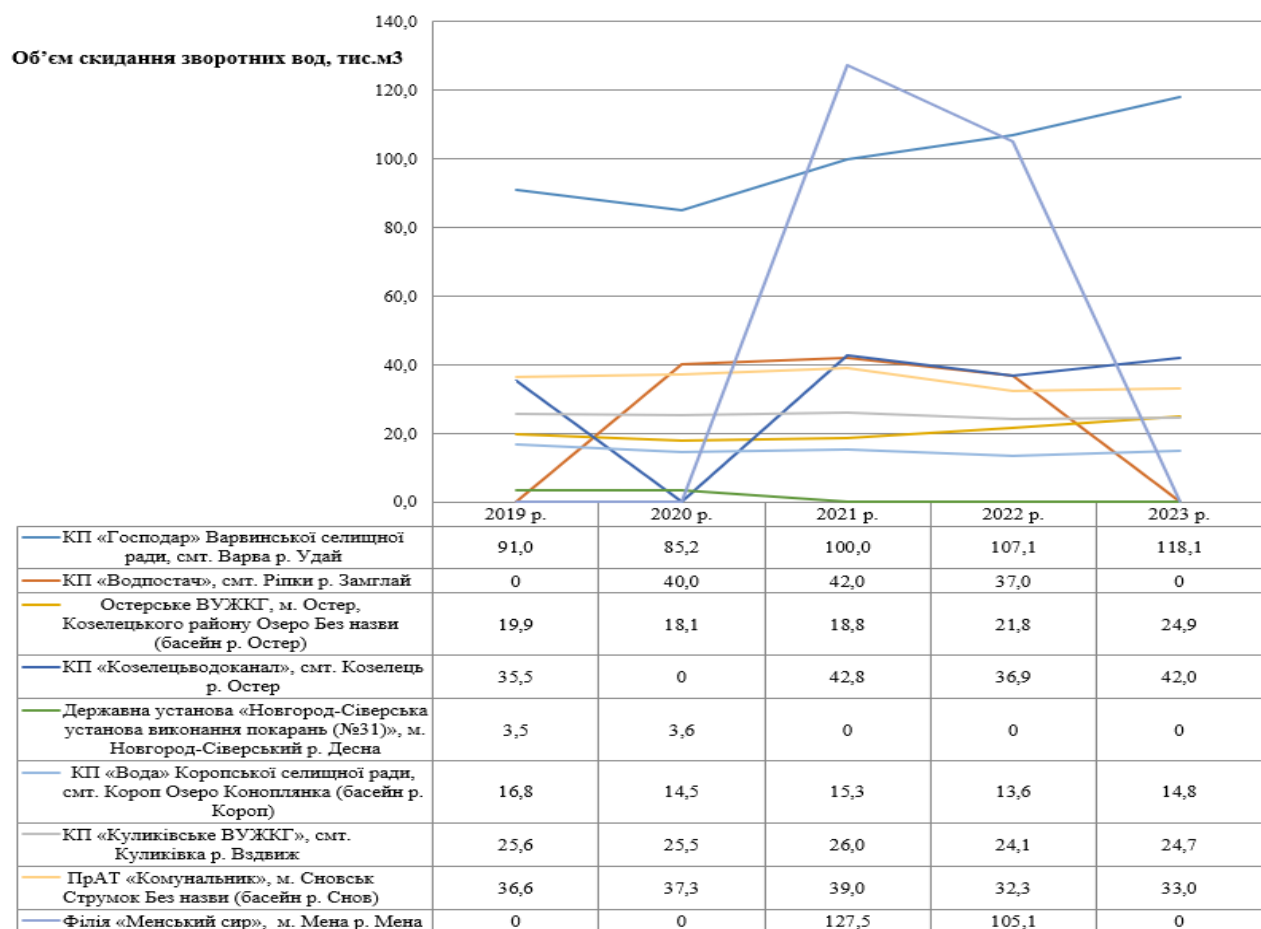


Рисунок 4 – Об'єми скидання зворотніх вод водокористувачами-забруднювачами у поверхневі водні об'єкти Чернігівської області за період 2019 – 2023 рр.

Найбільші показники скиду зворотних вод відзначаємо для підприємства «Чернігівводоканал», вони перевищують 14,0 млн. м<sup>3</sup> у 2019 – 2021 рр. На другому місці за потужністю скидів «Прилуки тепловодопостачання», це підприємство в 2019 – 2021 рр. щорічно скидало в русло р. Удай 1,3 млн. м<sup>3</sup> зворотних вод.

Серед проаналізованих показників скиду слід відмітити тенденцію до збільшення цього показника для: 1) КП «Господар», яке скидає зворотні води в русло р. Удай; 2) Остерського ВУЖКГ, яке скидає зворотні води в озеро в басейні р. Остер. Впродовж періоду дослідження зменшення показника скиду забруднених та недостатньо очищених зворотних вод відмічається для: 1) КП ВКГ «Ічень»; 2) ПрАТ «Комунальник»; 3) КП «Вода». Цей факт свідчить про впровадження природоохоронних заходів та інструментів екологізації виробництва, що зменшило антропогенний вплив на стан річкових вод у межах регіону впродовж п'ятирічного періоду дослідження. За результатами аналізу загального показника скиду відзначено його максимальне значення в 2021 р., яке з 2019 р. поступово зростало, а з 2019 р. відмічається для більшості підприємств-водокористувачів його поступове зменшення.

**Основні висновки за результатами дослідження** полягають у наступному: 1) Максимальна доля водозабору в регіоні відзначається для промислових потреб регіону, і вона збільшується з кожним роком; 2) Відмічається зменшення водозабору для забезпечення економічної діяльності об'єктів господарської діяльності; 3) Доля забруднених зворотних вод є незначною в 2022 та 2023 рр. на відміну від періоду 2019 – 2021 рр., що вказує на зменшення антропогенного навантаження в останні роки дослідження; 4) Найбільший внесок у забруднення річкових вод вносять скиди сухого залишку, хлоридів, сульфатів, нітратів; 5) Найбільші показники скиду зворотних вод відмічаються для КП «Чернігівводоканал» (р. Білоус) та КП «Прилуки тепловодопостачання» (р. Удай); 6) Впродовж періоду дослідження зменшення показника скиду забруднених та недостатньо очищених зворотних вод відмічається для: КП ВКГ «Ічень»; ПрАТ «Комунальник»; КП «Вода». Цей факт свідчить про впровадження природоохоронних заходів та інструментів екологізації виробництва, що зменшило антропогенний вплив на стан річкових вод у межах регіону впродовж п'ятирічного періоду дослідження.

Для досліджуваного водогосподарського регіону рекомендуємо в процесі природокористування запобігати забрудненню поверхневих вод шляхом скорочення об'ємів скидів у водні об'єкти недостатньо очищених зворотних вод підприємствами. Для цього необхідно проводити екологізацію технологічних процесів та покращувати методи очистки стоків; розвивати мережу каналізаційних систем і очисних споруд; розробляти інженерні заходи для попередження аварійних скидів зворотних

вод; проводити роз'яснювальну роботу серед населення щодо необхідності охорони водотоків від забруднення та виснаження.

### **Перелік посилань**

- 1 Екологічний паспорт Чернігівської області за 2020 рік. Чернігівська обласна державна адміністрація. 262 с.
- 2 Екологічний паспорт Чернігівської області за 2021 рік. Чернігівська обласна державна адміністрація. 249 с.
- 3 Екологічний паспорт Чернігівської області за 2022 рік. Чернігівська обласна державна адміністрація. 374 с.
- 4 Екологічний паспорт Чернігівської області за 2023 рік. Чернігівська обласна державна адміністрація. 362 с.
- 5 Екологічний паспорт Чернігівської області за 2024 рік. Чернігівська обласна державна адміністрація. 379 с.
- 6 Офіційний сайт Деснянського басейнового управління. URL: <https://desnabuvr.gov.ua/> (дата звернення: 05.02.2026).
- 7 Хільчевський В.К. Водопостачання і водовідведення. Гідроекологічні аспекти. Київ: Київський університет, 1999. 320 с.
- 8 Запольський А.К. Водопостачання, водовідведення та якість води: підручник. Київ: Вища школа, 2005. 671 с.
- 9 Швебс Г.І. Каталог річок і водойм України: навчально-довідковий посібник. Одеса: Астропринт, 2003. 392 с.

## **КОНВЕКТИВНО-ДИФУЗІЙНІ МОДЕЛІ МІГРАЦІЇ ЗАБРУДНЕНЬ В ЗАДАЧАХ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

***В.В. Курятников, к.ф.-м.н., доц.***

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса,*

*Україна*

*kuryatnikov1@ukr.net*

Елементи систем довкілля, якими є природні або штучні об'єкти, атмосферне повітря, водне середовище, ґрунти та ін., є складними нерівноважними, дисипативними системами, вивчення яких проводиться в напрямку досліджень технологій захисту навколишнього середовища. Цей висновок [1, 2] потрібно враховувати при моделюванні релаксації систем до їх рівноважного стану, враховувати вплив дисипації енергії на незворотність процесів. Потрібно мати на увазі елементи термодинаміки замкнених та відкритих систем, питання стаціонарних станів у відкритих системах, зміни ентропії відкритих систем, динаміку дифузійних процесів міграції забруднень в цих системах.

Зазначимо також, що одним із шляхів підвищення ефективності технологій очищення водних об'єктів і атмосферного повітря є удосконалення методів фізичного і математичного моделювання дифузійних масообмінних процесів як при вивченні міграції забруднень, так

і при експлуатації сучасних апаратів і систем очищення, що дозволяє оптимізувати конструкцію і роботу технологічного обладнання ще на етапі його проектування.

Вивчення міграції радіонуклідних забруднень у водному середовищі ускладнюють конвективні потоки, наприклад, морські течії, що мають гравітаційне походження та пов'язані із кліматичними і сезонними змінами. Тому питання моделювання конвективної дифузії у задачах захисту навколишнього середовища безперечно є актуальними, а для узбережжя Чорного моря несуть ще і риси регіональних екологічних питань.

Мета роботи – розглянути дифузійні процеси, що обумовлюють міграцію забруднень, зокрема, радіонуклідних забруднень, у потоках водного середовища або повітря з урахуванням конвективних механізмів, провести верифікацію цих моделей з доведенням їх до розрахунків.

У роботі розглянуті моделі фізичних процесів, що супроводжують гравітаційне осадження дисперсних частинок у природних гідрологічних потоках, штучних апаратах очищення повітря та гідромеханічних відстійниках, в яких враховуються броунівський рух цих частинок, здатний, як виявляється, викликати їх коагуляцію. А коагуляція переводить забруднюючі речовини у дисперсний стан із більшим розміром частинок.

Моделювання [3] динаміки радіоактивних домішок в умовах річкових стоків в районі морського узбережжя надали такі результати.

Запропонований конвективно-дифузійний механізм поширення радіонуклідів пояснює переміщення домішкової забруднюючої речовини за сумісною дією конвекції та дифузії у воді.

Конвективний потік може здійснюватися течією річки або морськими течіями. Механізм переносу в цьому випадку носить назву адвективного.

Показано, що адвективна модель масштабного перенесення радіонуклідів у водному середовищі при цілком реальних значеннях коефіцієнта дифузії (для дифузії водних розчинів –  $10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с, а для броунівської дифузії –  $10^{-10} \div 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с) слушно описує динаміку радіоактивних домішок, що надходять із забруднених територій і поширюються у Дніпровському басейні річок та водосховищ, попадаючи у північно-західну частину Чорного моря.

Результати розрахунків за цією моделлю добре співпадають із значеннями активності радіонуклідів Чорнобильського походження, представленими у звіті [4] Центральної геофізичної обсерваторії ім. Бориса Срезневського у вигляді даних вимірювань, отриманих в 2019 – 2020 рр. у різних місцях Дніпровського басейну і північно-західної частини Чорного моря. Це свідчить про суттєву роль дифузійного розбавлення в процесі водної міграції радіонуклідів і потребу врахування його при моделюванні динаміки процесу.

Результати розрахунків за конвективно-дифузійною моделлю вказують на те, що наявність конвекції сприяє збільшенню масштабів розподілу

домішок (іншими словами, сприяє більш широкомасштабному поширенню домішок), і на відміну від випадку чистої дифузії максимум розподілу зміщується у напрямку конвективного потоку.

При розв'язанні конвективно-дифузійних задач було б зручно мати деякий показник, який здатний був вказувати область застосування моделі, роль тих чи інших процесів. З цією метою запропонований для розгляду фактор автомодельності.

Цей фактор являє собою математичний вираз, який може бути застосований для отримання рішення деякого рівняння в часткових похідних в області великих конвекційних рухів з дифузійними процесами.

Фактор автомодельності вказує на залежність концентрації (або іншої величини) від просторового та часового розподілу швидкості конвекції ( $U$ ), просторової координати ( $x$ ) і часу ( $t$ ). Цей вираз може бути використаний для аналізу і моделюванні процесів переносу та дифузії у фізичних системах з рухомим середовищем.

Так, стосовно гравітаційного осадження дисперсних домішок в стічних водах [5] фактор автомодельності  $b$  показує превалюючу роль одного з двох фізичних механізмів осадження – стоксівський під дією гравітаційних сил або броунівський рух завислих частинок.

При переході від одновимірного випадку до двовимірної та тривимірної дифузії фактор автомодельності враховує просторову залежність адвективних складових:  $x = v_x \cdot t$ ;  $y = v_y \cdot t$ ;  $z = v_z \cdot t$ .

Седиментація дисперсних частинок, теплові конвективні рухи відбуваються у вертикальному напрямку з швидкістю  $v_y = v_s$ . Цю швидкість визначає формула:

$$v_s = \frac{d^2 [g(\rho_c - \rho_0) + 2\rho_c v \cdot \omega]}{18\eta} ,$$

де  $d$  – діаметр дисперсних частинок,  $\rho_c$  – густина речовини частинок,  $\rho_0$  – густина води,  $\eta$  – в'язкість води,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Швидкість осадження  $v_s$  визначається із умови рівності нулю рівнодіючої діючих на дисперсну частинку сил.

На відміну від формули Пуазейля тут враховується поправка на дію сили Коріоліса у вигляді добутку густини частинки на горизонтальну швидкість частинки  $v$  і кутову швидкість обертання Землі  $\omega$ , що стоїть у чисельнику формули.

Якщо розмір  $d$  частинок близький до середньої довжини вільного пробігу молекул води, відбувається хаотичний броунівський рух частинок з відхиленням від закону Стокса. Броунівський рух частинок прагне порушити механізм гравітаційного осадження, розподілити частинки рівномірно по всьому об'єму. Він перешкоджає осіданню (або спливанню)

частинок. Унаслідок броунівського руху в полідисперсній системі встановлюється певний розподіл частинок за висотою.

Розрахунки швидкості седиментації дисперсних частинок у воді показують, що вертикальна швидкість  $v_y$  залежить, перш за все, від розміру дисперсних частинок та їх густини, і для частинок 0,1 мкм – 60 мкм лежить в межах  $10^{-8} - 10^{-2}$  м/с.

При обраних значеннях коефіцієнту дифузії ( $10^{-9} - 10^{-11}$ ) м<sup>2</sup>/с оцінки фактору автомодельності уздовж вертикальної осі  $Y$  є цілком слушними, вони достатньо добре можуть пояснити зменшення концентрації радіонуклідів та їх радіоактивності по даних вимірів у воді Дніпра і північно-західній частині Чорного моря. Зрозуміло, що порівняння швидкості процесів у трьох різних напрямках має відбуватися при однакових умовах та при порівнянних параметрах.

Таким чином, застосовуючи фактор автомодельності до відповідного рівняння, можна отримати аналітичні або числові розв'язки, які відображатимуть перенос і розподіл домішок або інших фізичних величин в системі за умови великих конвекційних рухів і дифузійних процесів.

Запропонований фактор автомодельності може бути застосований для отримання рішення деяких рівнянь в часткових похідних в області великих конвекційних рухів з дифузійними процесами та може бути використаний для аналізу і моделювання процесів переносу та дифузії у фізичних системах з рухомим середовищем.

Для двовимірної та тривимірної дифузії фактор автомодельності визначатиме просторову залежність адвективних складових: горизонтальний рух у напрямку адвективних потоків, течії річки або морської течії, седиментацію дисперсних частинок, теплові конвективні рухи з урахуванням сили Коріоліса та ін.

Сформульовані і представлені фізичні моделі процесу абсорбційного очищення газів з урахуванням змін концентрації газу по висоті абсорбційного апарату. Відповідно запропонованим фізичним моделям розроблені математичні моделі диференціальних рівнянь масообміну, основу яких складає рівняння конвективної дифузії.

Для дослідження масообміну на вільній границі фаз в технологіях очищення повітря проведена верифікація простих фізичних моделей в різноманітних конвективно-дифузійних задачах із найбільш простою геометрією конструктивних форм. Отримані співвідношення та залежності надали можливість оперативно проводити оцінки регулюючих факторів, режимів процесів та розраховувати параметри апаратів очищення.

### **Перелік посилань**

1. Герасимов О.І. Технології захисту навколишнього середовища: підручник. Одеса: ТЕС, 2019. 268 с.
2. Герасимов О.І. Фізичні основи технологій захисту навколишнього середовища: підручник. Одеса: ОДЕКУ, 2022. 168 с.

3. Герасимов О.І., Курятников В.В. Моделювання динаміки радіоактивних домішок в умовах річкових стоків в райони морського узбережжя. *Фізика аеродисперсних систем*. 2024. № 62. С. 130 – 149.
4. Огляд стану забруднення навколишнього природного середовища на території України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій у 2020 р. Центральна геофізична обсерваторія ім. Бориса Срезневського URL: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/data/ukr-zabrud-viz-1/oglyad-stanu-zabrudnennya-2020-sayt.pdf> (дата звернення: 01.04.2026).
5. Герасимов О.І., Курятников В.В. Фізичне моделювання в технологіях водоочищення. *Фізика аеродисперсних систем*. 2023. № 61. С. 17 – 31.
6. Герасимов О.І., Курятников В.В. Верифікація моделей динаміки масообмінних процесів в апаратах з вільною міжфазною границею сучасних технологій очищення повітря. *Фізика аеродисперсних систем*. 2025. № 63.

## **МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ІНТЕГРАЦІЇ ТА КОРЕЛЯЦІЙНОГО АНАЛІЗУ РІЗНОРІДНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ДАНИХ У СИСТЕМІ МУНІЦИПАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ**

**О.С. Лелека, К.О. Вадурін, В.С. Бахарєв**  
*Кременчуцький національний університет  
імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, Україна  
kir3337@gmail.com*

**Актуальність та проблематика екологічного моніторингу.** Сучасна екологічна криза в урбанізованих екосистемах вимагає перегляду традиційних парадигм спостереження за станом атмосферного повітря. Обмеженість класичних мереж моніторингу стає критичною перешкодою для проактивного управління якістю довкілля. Цифровізація та інтеграція великих даних відкривають нові можливості для муніципальних стратегій адаптації до кліматичних змін [1].

Використання виключно наземних стаціонарних постів не дозволяє отримати цілісну просторову картину через високу вартість та точкову локалізацію. Інтеграція різномірних даних – супутникових знімків, метеорологічних архівів та показників транспортних потоків – є необхідною умовою для створення сучасних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень [2, 3]. Застосування дистанційного зондування у поєднанні з геопросторовими даними забезпечує високу точність моніторингу на територіях зі складним ландшафтом [4].

Ключова методологічна суперечність полягає у розриві між потребою управлінців у високогранульованій інформації (з точністю до кварталів) та фізичними обмеженнями існуючих мереж. Ця проблема посилюється міською морфологією, де будівлі створюють повітряні каньйони з нерівномірним розподілом концентрацій. Подолання цього інформаційного вакууму та забезпечення системного мислення у прийнятті рішень

неможливе без об'єднання дискретних точок вимірювання з безперервними багатofакторними полями [5].

**Мета дослідження та робочі гіпотези.** Метою дослідження є розробка методологічних засад формування інтегрованого масиву екологічних даних та створення на його основі моделей підтримки прийняття рішень. Математичний підхід до інтеграції даних  $D_{int}$  виражається функцією:

$$D_{int} = f(S_{ground}, R_{remote}, M_{meteo}, T_{traffic}),$$

де  $S_{ground}$  – дані наземних станцій,  $R_{remote}$  – дистанційне зондування,  $M_{meteo}$  – метеопараметри,  $T_{traffic}$  – транспортне навантаження.

Оскільки лише комплексний облік екологічних та географічних параметрів забезпечує сталий розвиток [6], у роботі верифіковано наступні гіпотези (табл. 1).

Таблиця 1 – Робочі гіпотези дослідження та методи їх верифікації

| Гіпотеза                     | Чинники впливу                 | Метод перевірки                | Очікуваний результат                     |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------|
| Просторова кореляція трафіку | Кількість авто, тип доріг      | Регресійний аналіз, ML-моделі  | Локалізація зон максимального ризику     |
| Метеорологічна модуляція     | Швидкість вітру, азимут, T, RH | Анізотропні шлейфи розсіювання | Адаптивна модель інтерполяції            |
| Інформаційна синергія        | Супутникові дані + IoT         | Крос-валідація (RMSE, MAE)     | Мінімізація похибки просторового аналізу |

**Архітектура збору даних та підготовка пілотної вибірки.** Пілотним регіоном обрано м. Вінниця (понад 30 IoT-станцій EcoCity). Досліджуваний період (вересень 2019 – березень 2024 рр.) охоплює повний цикл сезонних коливань, пандемічні обмеження та періоди різного антропогенного навантаження із дискретизацією у 20 хв.

Архітектура системи побудована за принципом багаторівневого ф'южну (табл. 2).

Таблиця 2 – Параметри інтегрованих джерел даних.

| Рівень даних    | Джерело               | Параметри                                                                                    | Частота      |
|-----------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Наземний IoT    | EcoCity               | PM <sub>1.0</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>10</sub> , CO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> | 20 хв        |
| Метеорологічний | Open-Meteo / локальні | Вітер, T, RH, Тиск                                                                           | 1 год        |
| Супутниковий    | Sentinel-5P (TROPOMI) | Тропосферні колони NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> , CO                                    | 1 доба       |
| Транспортний    | OSM / Traffic API     | Щільність потоку, затори                                                                     | Реальний час |



Попередня обробка масивів включає просторово-часову синхронізацію (стандарт *UTC*, інтерполяція) та багатокритеріальну фільтрацію. Для усунення короткострокових електричних шумів застосовується ковзний медіанний фільтр:

$$\hat{x}_t = \text{median}(x_{t-k}, \dots, x_{t+k}),$$

де  $k = 3$  часові кроки. Детектування системних збоїв реалізується порівнянням показників сусідніх станцій. Дані трансформуються у «широкий формат» з нормалізацією одиниць ( $\text{мкг/м}^3$ ) та генерацією похідних ознак (наприклад, відношення  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  для ідентифікації природи пилу).

**Методологія кореляційного аналізу та тестування гіпотез.** Для оцінки зв'язків між полутантами та метеочинниками використовується комплекс статистичних методів. Лінійна кореляція Пірсона застосовується для залежностей між фракціями пилу, тоді як рангова кореляція Спірмена ( $\rho$ ) – для нелінійних зв'язків (наприклад, вологість та  $\text{PM}_{2.5}$ ). Аналіз часових лагів та частинна кореляція використовуються для нівелювання мультиколінеарності (наприклад, впливу температури при оцінці трафіку). Значущість оцінюється за порогом  $\alpha = 0,05$ .

Тестування гіпотези адвективно-дифузійного переносу проводиться порівнянням фактичних даних із моделюванням Гаусового шлейфу (анізотропне масштабування). Гіпотеза антропогенної циклічності тестується дисперсійним аналізом добових профілів буднів та вихідних:

$$F = \frac{\text{міжгрупова дисперсія}}{\text{внутрігрупова дисперсія}}.$$

Просторова верифікація реалізується алгоритмом *K-Means*: станції кластеризуються за формою добових профілів на «транспортні», «житлові» та «фонові».

**Результати багатofакторного аналізу.** Глобальна матриця кореляцій виявила сильний зв'язок між  $\text{PM}_{2.5}$  та  $\text{PM}_{10}$  ( $r > 0,85$ ). Показник *PM\_ratio* динамічно змінюється: зростає взимку (горіння/опалення) та знижується влітку (механічний пил). Вплив метеofакторів представлено у табл. 3.

Таблиця 3 – Кореляційна взаємодія (коефіцієнт Спірмена)

| Показник          | Температура | Відн. вологість | Атм. тиск | <i>AQI</i> |
|-------------------|-------------|-----------------|-----------|------------|
| $\text{PM}_{2.5}$ | -0,30       | +0,18           | +0,12     | +0,94      |
| $\text{PM}_{10}$  | -0,25       | +0,05           | +0,08     | +0,88      |
| $\text{CO}_2$     | -0,42       | +0,22           | +0,03     | +0,35      |

Від’ємна кореляція температури та  $PM_{2.5}$  (-0,30) зумовлена термічною стабільністю атмосфери (інверсією). Позитивний зв’язок із вологістю (+0,18) підтверджує гігроскопічний ріст часток. Теплові карти виявили сезонні «вікна ризику»: максимальні значення  $AQI$  фіксуються восени та взимку з 18:00 до 22:00 (синергія опалення та вечірнього трафіку). Крім того, у вихідні дні рівень забруднення в житлових кварталах залишається високим, що свідчить про значний внесок побутової діяльності.

**Висновки та перспективи.** Експеримент довів обмеженість ізольованих систем: в умовах слабкої конвекції концентрація  $PM_{2.5}$  поблизу магістралей перевищує показники фонових станцій на 45 – 60 %. Валідація просторової моделі показала, що впровадження даних про вітер (адвективна складова) зменшує похибку RMSE реконструкції поля концентрацій з 25 – 40 % до 12 %. Мультиполютантна карта (ф’южн  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $CO_2$ ) підвищила точність ідентифікації джерел емісії на 35 % за рахунок аналізу екологічних «сигнатур». Крос-валідація IoT-мережі супутниковими даними Sentinel-5P довела ефективність виявлення дрейфу сенсорів.

Отримані структуровані набори даних відкривають перспективи для предиктивного моделювання. Декомпозиція часових рядів дозволяє застосовувати рекурентні нейромережі (LSTM, GRU) для прогнозування  $AQI$  на 1 – 24 год. Інноваційним вектором є використання гібридних квантово-класичних моделей для обробки нелінійних залишків прогнозів. Інтегрований датасет створює базу для «What-If» симуляцій (моделювання управлінських рішень щодо трафіку) та навчання без вчителя для автоматичного детектування нелегальних викидів. Реалізація цих підходів трансформує систему моніторингу в «Екологічного цифрового двійника міста».

### Перелік посилань

1. Balogun A.-L., Marks D., Sharma R. et al. Assessing the Potentials of Digitalization as a Tool for Climate Change Adaptation and Sustainable Development in Urban Centres. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 53. Art. 101888. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101888>.
2. Alamanos A., Rolston A., Papaioannou G. Development of a Decision Support System for Sustainable Environmental Management and Stakeholder Engagement. *Hydrology*. 2021. Vol. 8, no. 1. Art. 40. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010040>.
3. Ali R., Hussain A., Nazir S. et al. Intelligent Decision Support Systems – An Analysis of Machine Learning and Multicriteria Decision-Making Methods. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 22. Art. 12426. <https://doi.org/10.3390/app132212426>.
4. Babbar H., Rani S. AI-Driven integration of remote sensing and geospatial data for Enhanced environmental monitoring and decision-making. *International Journal of Remote Sensing*. 2025. P. 1 – 17. <https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2514820>.
5. Barquet K., Järnberg L., Alva I. L., Weitz N. Exploring mechanisms for systemic thinking in decision-making through three country applications of SDG Synergies. *Sustainability Science*. 2022. Vol. 17, no. 4. P. 1557 – 1572. <https://doi.org/10.1007/s11625-021-01045-3>.

6. Anusha B.N., Raghu Babu K., Pradeep Kumar B. et al. Integrated studies for land suitability analysis towards sustainable agricultural development in semi-arid regions of AP, India. *Geosystems and Geoenvironment*. 2023. Vol. 2, no. 2. Art. 100131. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100131>.

## **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ГЕНЕРАЦІЇ З ПОЗИЦІЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ**

*А.В. Лініх, асп., В.М. Шмандій, д.т.н., проф., Т.Є. Ригас, к.т.н., доц.,  
А.Є. Мельник, асп.*

*Кременчуцький національний університет імені Михайла*

*Остроградського, м. Кременчук, Україна*

*alinikh@gmail.com*

За роки розбудови енергетичної галузі світова спільнота рухалась шляхом збільшення економічної ефективності, що призвело до глобалізації усіх ланок виробництва та видобутку, постачання та розподілення, зберігання та споживання. Стабільний світоустрій спровокував нехтування ризиками, які можуть виникнути, якщо система вийде з рівноваги.

Тривалий час відбувалося коливання вартості вуглеводнів під впливом політичних чи військових криз у світі, і, в першу чергу, на «близькому сході», але надприбутки нівелювали всі ризики. Екологи акцентували увагу на ризиках техногенних аварій, що відбувались по всьому світові. Витрачалися величезні кошти на розробку заходів з протидії та ліквідації наслідків витоків нафтопродуктів як на суші, так і на воді, в результаті незначна частина надприбутків освоювалася та розподілялася, залишаючи приховані екологічні ризики на майбутнє.

З початком повномасштабного вторгнення на територію України в 2022 році всі екологічні ризики приголомшливо проявилися. Були атаковані різноманітні об'єкти енергетичної інфраструктури, спричинивши забруднення складових докільля паливно-мастильними матеріалами, продуктами горіння, різноманітними хімічними сполуками, що призвело до порушення екосистем, водосховищ, заповідників та ін. Ліквідація наслідків була ускладнена веденням бойових дій. В середині країни були порушені логістичні ланцюги, що спричинило колапс в постачанні необхідного обладнання, реагентів та ін. Виявлення, аналіз та ліквідація наслідків аварій техногенного характеру у зоні бойових дій та на окупованих територіях взагалі недосяжні до настання миру.

У 2026 році розпочалася активна фаза протистояння на «близькому сході», що виявило неготовність держав світу до протистояння блокування міжнародних морських шляхів. Через блокаду Ормузької протоки, через яку проходило близько 20 % світової нафти та безліч інших вантажів, у світі

спочатку почалися коливання вартості нафти, а згодом виник суттєвий дефіцит нафтової сировини та паливно-мастильних матеріалів.

Наведені обставини обумовили значні проблеми у галузі енергозабезпечення у світовому масштабі і особливо в окремих регіонах. Цим обґрунтовується актуальність обраного напрямку досліджень.

Ми вважаємо, що одним з ефективних напрямів вирішення енергетичних проблем є використання альтернативних джерел енергогенерації.

Світова сонячна енергетика починала свій розвиток в розвинених країнах і досягла такого рівня, що за рахунок розгортання виробництва в країнах Азії опанувала дешеву вартість при сучасній технологічності. Зараз більшість виробництв та домогосподарств мають змогу користуватися перевагами автономності та економії при встановленні систем сонячної енергетики. Сьогодні рівень технологій зберігання енергії досяг рівня, коли за достатності потужності поля сонячних панелей її вистачає на цілодобові потреби будь-якого масштабування. Локалізація виробництва та споживання енергії значно зменшує втрати на її транспортування та розподіл.

Українське суспільство вперше в світі відчуло недієздатність великих систем генерації енергії під час нестабільності. Значна кількість об'єктів господарювання були вимушені перейти до безпечної автономності. Існуючі проблеми традиційної енергетики (такі як викиди шкідливих речовин від двигунів внутрішнього згорання, випаровування в місцях зберігання паливно-мастильних матеріалів, шумові забруднення, необхідність утилізації відпрацьованих мастил) можна вирішити шляхом переходу до використання зеленої енергетики.

Застарілі системи опалення були побудовані на принципі спалення газу, мазуту, вугілля або навіть дров, що формувало зони підвищеного забруднення на територіях громад, деякі низинні регіони взагалі перетворювалися на зони екологічної катастрофи.

Завдяки достатньо «м'якому» клімату Україна має значний потенціал для переходу на електроопалення, реалізація якого знизить рівень екологічного навантаження взимку, а вивільнені потужності влітку, на нашу думку, доцільно використовувати в системах кондиціонування або в сушильних установках у сільському господарстві та ін. Після масованих ракетних атак по ТЕЦ та котельнях для багатьох родин, що мешкали у багатоповерхівках, цей тип опалення був єдино доступним.

Для зберігання традиційних видів палива потрібні значні площі. В той же час рівень безпеки сучасних акумуляторних блоків дозволяє розміщувати їх навіть у приміщеннях, де перебувають люди, що значно зменшує витрати на облаштування спеціальних приміщень чи навісів. З точки зору екологічної безпеки навіть при порушенні цілісності блоку виробництва чи зберігання не відбувається випаровування шкідливих речовин, мають місце мінімальні ризики займання, а збирання уламків

можливе особами без спеціальних навичок та засобів захисту. Це, до речі, стосується більшості обладнання зеленої енергетики. Без сумніву, до системи зберігання також можливе додавання наявних ресурсів, таких як гідроакумулючі електростанції та ін.

Ми впевнені, що перерозподіл масштабування зеленої енергетики має практично необмежений потенціал для екологічного середовища, починаючи від зменшення площ, відведених під високовольтні мережі, до запровадження сучасних систем виробництва, які в більшості побудовані на електронній складовій. Розбудова такої системи виробництва та зберігання електроенергії значно покращить якість життя людей та нормальну роботу підприємств у мирний час, при цьому забезпечуючи високий рівень екологічної безпеки.

Сучасний рівень розвитку та розповсюдження електротранспорту забезпечує зниження впливу на довкілля та збільшує економічні вигоди в багатьох містах світу, виробництвах та логістиці. Блекаути техногенного або екологічного характеру, віддаленість регіонів від потужних мереж електропостачання обмежують використання електротранспорту. В деяких регіонах США взагалі використовуються дизельгенератори для зарядних станцій, що нівелює економічний та екологічний ефект від їх використання.

На нашу думку, розбудова національної мережі відновлювальної енергетики повинна базуватися на принципах циркулярної системи, адже науковий та технічний потенціал в цій галузі достатньо розвинений. В Україні зараз функціонує близько 25 виробників кабельно-провідникової продукції. За сучасними оцінками на території України знаходиться близько 3 % світових запасів літію – одного з базових компонентів систем накопичення та зберігання енергії. Ми впевнені, що в Україні є усі інтелектуальні та технічні можливості для розбудови власного виробництва елементів всіх ланцюгів системи. Щодо забезпечення екологічної безпеки, вважаємо за необхідне запровадити обов'язковість вторинної переробки та утилізації електричних відходів, що буде відігравати важливу роль як в короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі.

Актуалізація питання розробки нових або більш ефективних технологій в Україні може бути досягнута за підтримки держави та фінансових інститутів з огляду на світові тенденції нових викликів з боку економічної, енергетичної та військової небезпеки, руйнування стабільності логістичних маршрутів та залежності від іноземних технологій. Переробка електронних відходів має забезпечити галузь додатковим надходженням сировини для виробництва та зменшити обсяги утилізації.

Розбудова сучасної зеленої галузі економіки замкненого циклу дозволить ефективно використовувати весь цикл життя приладів від виробництва до утилізації або вторинної переробки, забезпечуючи належний рівень екологічної безпеки.

## АНТРОПОГЕННЕ НАВАНТАЖЕННЯ У МЕЖАХ НПП «СИНЕВИР»

*І.І. Лугош, асп., О.Ю. Сухарева, к.х.н., доц., С.М. Сухарев, д.х.н., проф.  
ДВНЗ «Ужгородський національний університет», м. Ужгород, Україна  
serhii.sukharev@uzhnu.edu.ua*

Національний природний парк «Синевир» є одним із найбільш привабливих об'єктів туристично-рекреаційної галузі Закарпатської області. НПП «Синевир» має, переважно, гірські та передгірські ландшафти, а лісистість парку становить більше 90 % [1]. Лісові масиви представлені буковими та смерековими насадження, вік значної частини яких перевищує 150 років. У межах НПП є кілька привабливих туристичних об'єктів, такі як озеро Синевир, центр реабілітації бурих ведмедів, долина вовків тощо.

За офіційною статистикою [2], серед національних природних парків Закарпатської області найбільш відвідуваним є НПП «Синевир», і у 2024 році кількість відвідувачів становила 149,6 тис. осіб, у 2025 році – 142,8 тис. Площа НПП «Синевир» становить 43 тис. га, тому очевидним є значне курортно-рекреаційне навантаження на територію НПП (як щоденне, так і посезонне) [3]. Слід зазначити, що більшість туристів – відвідувачі НПП протягом 1 – 3 днів, проте відвідуваність парку є відносно рівномірною протягом року. Крім того, важливою особливістю курортно-туристичного навантаження на НПП «Синевир» є те, що окремі території парку мають значно більше навантаження (найбільш відвідувані об'єкти з розвиненою інфраструктурою), ніж інші території (віддалені ділянки лісів, полонини тощо). З огляду на це, інтенсивно розвивається туристично-рекреаційна інфраструктура території НПП «Синевир», яка, переважно, складається із садиб, міні-готелів та невеликих дворогосподарств для відпочинку. Такі об'єкти мають заповненість на 80 – 100 % протягом року.

Серед пріоритетних антропогенних впливів на НПП «Синевир» можна виділити вплив на водні об'єкти.

Вплив на стан водних об'єктів є різнонапрямленим і проявляється як у впливі на стан озера Синевир, так і у впливі на основну водну артерію НПП «Синевир» – річку Терембю. Детальне дослідження хімічного стану озера Синевир [4] було проведено у 2016 році. Дослідження якості води озера проводилося за всією глибиною, проте суттєвого погіршення стану води не спостерігалось. Проте, протягом останні 5 років спостерігаються дві негативні тенденції щодо стану озера Синевир. По-перше, озеро значно обміліло, що, очевидно, пов'язано з порушенням гідрологічного режиму, адже озеро живиться за рахунок 4-х струмків, які впадають у нього. По-друге, у весняно-літній період спостерігається відчутна евтрофікація води озера. Цвітіння, очевидно, пов'язано з потраплянням у воду органічних речовин із джерел антропогенного походження.

Систематичні власні моніторингові дослідження стану води річки Тересля показують, що стан води річки погіршується за рахунок скиду комунально-побутових стічних вод населеними пунктами (с. Синевирська Поляна, Синевир, Негровець, Колочава), що узгоджується з даними [5]. Серед показників стану річкової води, які змінюються найбільш значимо, слід зазначити ХСК і БСК<sub>5</sub>, вміст ПАР і фосфатів, а також неорганічні сполуки нітрогену. Найбільш значиме погіршення стану води річки Тересля спостерігається після с. Синевирська Поляна, що, очевидно, пов'язано з відсутністю повноцінних очисних споруд і безпосереднім скидом стічних вод житловим фондом і суб'єктами господарювання безпосередньо в річку. Це призводить навіть до загибелі молодняку річкової форелі, як індикатора стану річок, що видно з даних рис. 1.



Рисунок 1 – Загибель молодняку форелі у с. Синевирська Поляна (власне фото, серпень 2025 року)

Крім того, місцеві жителі по-варварські ставляться до річки Тересля. Це зумовлено як безпосереднім скидом стічних вод дворогосподарств, у т.ч. стічні води скотарства, так і порушенням русла річки за рахунок транспортних засобів. Як приклад, на рис. 2, показано, як вантажівка долає річку вброд, руйнуючи русло і зумовлюючи незворотні зміни у стані річки. Причиною такого безвідповідального ставлення місцевих жителів до стану річки є відсутність належних шляхів, а також байдужість і лінь (наприклад для вивозу заготовленого сіна з важкодоступних місць).





Рисунок 2 – Вантажівка долає річку Тересля вброд задля завантаження сіна (власне фото, с. Синевирська Поляна, серпень 2025 року)

Таким чином, не зважаючи на унікальність природи НПП «Синевир» ступінь антропогенного навантаження на нього є значний.

#### Перелік посилань

1. Національний природний парк «Синевир». URL: <https://synevyr-park.in.ua/mizhnarodnyy-den-lisu/> (дата звернення 05.04.2026).
2. Закарпаття. URL: <https://zaktour.gov.ua/u-2025-rotsi-natsionalni-parky-zakarpattia-vidvidaly-ponad-200-tys-turystiv/> (дата звернення 05.04.2026).
3. Ісаєнко В.М., Ніколаєв К.Д., Бабіков К.О., Білявський Г.О., Смирнов І.Г. Стратегія сталого розвитку (туристична галузь). Навчальний посібник. Київ: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2013. 300 с.
4. Ярема Т.М., Сухарев С.М. Оцінка ступеня навантаження на пам'ятку природи оз. Синевир. *Програма і тези доповідей Підсумкової наукової студентської конференції ДВНЗ «Ужгородський національний університет», секція «Хімічних наук та екології»*. Ужгород: Вид-во УжНУ «Говерла», 2016. С. 56.
5. Фенцик О., Станкевич-Волосянчук О. Звіт щодо стану річкових екосистем басейну Верхньої Тиси (у межах України): джерела забруднення, негативні впливи, трансформація та рекомендації до поліпшення ситуації. Ужгород, 2023. 30 с.



## ОЦІНКА ВПЛИВУ МЕТОДІВ ЗНЕВОДНЕННЯ ОСАДУ СТИЧНИХ ВОД НА СТАН ТА ЯКІСТЬ ДОВКІЛЛЯ

*М.А. Лук'яненко, асп., В.Ф. Моїсєєв, проф., к.т.н.*

*НТУ «ХПІ», Харків, Україна*

*maksym.lukianenko@mit.khpi.edu.ua*

Осади стічних вод є невід'ємним продуктом функціонування сучасних систем очищення стічних вод і утворюються внаслідок складних фізико-хімічних та біологічних процесів. У сучасних умовах урбанізації, зростання промислового виробництва та підвищення рівня водоспоживання спостерігається тенденція до збільшення обсягів утворення осадів, що зумовлює зростання техногенного навантаження на довкілля. У зв'язку з цим проблема ефективного управління осадами стічних вод є однією з ключових у системі забезпечення екологічної безпеки.

Встановлено, що одним із найбільш важливих етапів обробки осадів є їх зневоднення, яке дозволяє суттєво зменшити їх об'єм, підвищити концентрацію сухих речовин та забезпечити можливість подальшої утилізації або повторного використання. Крім того, зневоднення сприяє зниженню витрат на транспортування та захоронення осаду, що має важливе економічне значення [1].

Разом з тим вибір технології зневоднення визначає характер і рівень впливу на основні компоненти довкілля. У цьому контексті особливого значення набуває комплексна оцінка екологічної ефективності різних методів з урахуванням їх технічних, економічних та природоохоронних характеристик.

Природні методи зневоднення осаду, які реалізуються на мулових майданчиках, базуються на процесах випаровування та фільтрації води через ґрунт. Незважаючи на низькі енергетичні витрати та відносну простоту, даний метод має ряд суттєвих екологічних недоліків. Зокрема, встановлено, що тривале використання мулових полів призводить до деградації ґрунтів, зміни їх фізико-хімічних властивостей та зниження родючості. Внаслідок накопичення органічних і мінеральних компонентів осаду відбувається порушення природного балансу ґрунтових систем.

Додатковим фактором негативного впливу є міграція забруднюючих речовин у водне середовище. Азот, фосфор, а також інші сполуки можуть потрапляти у поверхневі та підземні води, спричиняючи їх евтрофікацію, що призводить до порушення гідробіологічного режиму водойм. У результаті цього знижується якість води та погіршуються умови існування водних організмів [3].

Окрім цього, експлуатація мулових майданчиків супроводжується виділенням газоподібних продуктів розкладу органічних речовин, що негативно впливає на якість атмосферного повітря. Встановлено, що такі

процеси можуть бути джерелом сірководню, аміаку та інших сполук, які мають неприємний запах та можуть впливати на здоров'я населення. Також відзначається негативний вплив на біорізноманіття, оскільки зміна ландшафтів і забруднення територій призводять до знищення природних середовищ існування [1].

Механічні методи зневоднення осаду характеризуються більш високим рівнем технологічності та ефективності. До них належать центрифуги, стрічкові фільтр-преси та шнекові дегідратори. Принцип їх роботи базується на використанні механічних сил, що дозволяє значно прискорити процес відокремлення води. Встановлено, що застосування механічних методів дозволяє зменшити площі, необхідні для обробки осаду, та забезпечити більш контрольований характер процесу [2].

Центрифуги є ефективними при обробці великих обсягів осаду, однак їх використання супроводжується значними енерговитратами та потребує високого рівня технічного обслуговування. Стрічкові фільтр-преси забезпечують стабільну якість фільтрату та відносно низьке енергоспоживання, проте потребують значних витрат води на промивання та мають обмеження щодо стабільності роботи при зміні властивостей осаду.

Особливе місце серед механічних методів займають шнекові мультидискові дегідратори, які характеризуються високою ефективністю та низьким енергоспоживанням. Встановлено, що завдяки особливостям конструкції та повільному обертанню шнека забезпечується ефективне відокремлення води та отримання фільтрату з низьким вмістом завислих речовин. Це дозволяє зменшити навантаження на подальші стадії очищення та підвищити загальну ефективність системи [4].

Водночас механічні методи потребують використання електроенергії та, у деяких випадках, хімічних реагентів, що може створювати додаткове навантаження на довкілля. Однак при належному контролі технологічного процесу цей вплив є значно меншим у порівнянні з природними методами.

Термічні методи зневоднення базуються на використанні теплової енергії для видалення вологи з осаду. Встановлено, що такі технології забезпечують високий ступінь висушування та стабілізації осаду, що дозволяє значно зменшити його об'єм та покращити умови зберігання і транспортування. Однак їх застосування пов'язане зі значними енергетичними витратами та викидами парникових газів, що негативно впливає на кліматичні процеси [5].

Додатковим екологічним аспектом є необхідність очищення газових викидів та конденсату, які можуть містити шкідливі речовини. Це потребує впровадження додаткових систем очищення, що ускладнює технологічний процес та збільшує витрати.

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що найбільш екологічно небезпечними є природні методи зневоднення, тоді як механічні

технології забезпечують оптимальний баланс між ефективністю та екологічною безпекою. Термічні методи, незважаючи на їх ефективність, мають обмеження через високі енерговитрати та екологічні ризики.

Обґрунтовано, що зниження техногенного навантаження можливе за рахунок впровадження енергоефективного обладнання, оптимізації технологічних параметрів та розвитку технологій повторного використання осадів. Використання осаду як добрива або альтернативного джерела енергії дозволяє зменшити обсяг відходів та сприяє реалізації принципів циркулярної економіки [6].

Таким чином, встановлено, що раціональний вибір технології зневоднення осаду є важливим чинником забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку систем очищення стічних вод.

### Перелік посилань

1. Сорокіна К.Б. Процеси та обладнання для обробки осадів. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. 116 с.
2. Ковальчук В.А. Очистка стічних вод. Рівне: Рівненська друкарня, 2003. 622 с.
3. Клос В.Р. та ін. Еколого-геохімічні дослідження мулових полів стічних вод. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2013. № 1. С. 34 – 43.
4. ESMIL Group. Обладнання для зневоднення осаду. URL: [https://ua.esmil.eu/product\\_cat/sludge-treatment/](https://ua.esmil.eu/product_cat/sludge-treatment/) (дата звернення 05.04.2026).
5. Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery. New York: McGraw-Hill, 2014.
6. Fytli D., Zabaniotou A. Utilization of sewage sludge in EU. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2008.

## МЕТОДИЧНІ ПРОБЛЕМИ ОЦІНКИ РЕКРЕАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ КЛЮЧОВИХ ЛОКАЦІЙ ЗАКАРПАТТЯ

**Н.В. Максименко, д.геогр.н., проф., Є.С. Коротецька, студ.,  
T. Zaninović, Doc, Dr. Sc.**

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків,  
Україна*

*Загребський університет, м. Загреб, Хорватія*

*maksymenko@karazin.ua*

*korotetska2021.9512119@student.karazin.ua*

*tmaric@arhitekt.unizg.hr*

У сучасних умовах просторового перерозподілу рекреаційних потоків Закарпатська область закріпила за собою статус головного туристичного хабу України. З позицій системного аналізу якості довкілля цей процес супроводжується явищем локального надмірного туризму та експоненційним зростанням антропогенного тиску на природні та урбанізовані ландшафти регіону.

Стрімке зростання туристичних потоків зумовлено комплексом геополітичних та соціально-психологічних причин. Ключовим детермінантом залишається безпековий фактор, оскільки Закарпаття об'єктивно сприймається як найменш вразливий до воєнних загроз регіон [1]. Крім того, закриті кордони перенаправили попит на внутрішній ринок, а потреба суспільства (зокрема військовослужбовців) у психологічній реабілітації згенерувала стабільний потік рекреантів у гірські та бальнеологічні зони [2]. Водночас адаптивність місцевого бізнесу до інфраструктурних викликів згладила сезонність, перетворивши область на цілорічну дестинацію, що вимагає нових підходів до оцінки екологічної ємності територій [3].

Важливим науково-методичним аспектом системного аналізу довкілля є пошук об'єктивних індикаторів рекреаційного навантаження. Таким індикатором виступають обсяги надходжень від туристичного збору, динаміка яких за останні роки демонструє стійке зростання. У 2023 році обсяг збору склав 22,10 млн. грн. (провідні громади – Полянська, Ужгородська, Косоньська). Протягом 2024 року надійшло 23,17 млн. грн. (+4,8 %), що засвідчило стабілізацію галузі. Однак у 2025 році зафіксовано різкий стрибок до 31,90 млн. грн., що становить зростання на 37,6 % порівняно з попереднім роком (у лідерах Полянська, Ужгородська, Баранинська, Косоньська громади) [4]. Таке збільшення фінансових показників прямо вказує на масове зростання фізичної кількості туристів, що становить загрозу для екологічної рівноваги. Ключовою методичною проблемою в контексті збереження якості довкілля є нерівномірна просторова концентрація цих потоків.

Оскільки популярні дестинації функціонують в умовах постійного перевантаження, подібна локалізація неминуче призводить до перевищення меж екологічної стійкості ландшафтів. Для системного аналізу стійкості геосистем та визначення моменту початку їхньої деградації застосовується розрахунок базової рекреаційної ємності ( $V_i$ ), що визначається за формулою [5]:

$$V_i = \frac{N_i \cdot S_i \cdot C_i}{D_i}$$

де  $N_i$  – норма (ос./км<sup>2</sup>): 100 (1 ос./га) для регульованої зони, 5000 (50 ос./га) для стаціонарної;  $S_i$  – площа зони (км<sup>2</sup>;  $S_i$  (км<sup>2</sup>) =  $S_i$  (га) × 0,01);  $C_i$  – тривалість періоду (90 діб);  $D_i$  – перебування (1 день для денних туристів).

Доведено, що систематичне перевищення розрахункового показника  $V_i$  виступає головним тригером рекреаційної дигресії – незворотного процесу погіршення стану та руйнування ландшафтних комплексів унаслідок антропогенного впливу. Дигресія проявляється через механічне витоптування рослинності, критичне ущільнення верхніх горизонтів ґрунту,

що порушує його водно-повітряний режим, оголення кореневих систем дерев та, як наслідок, зникнення вразливих фітоценозів [6].

Вибір трьох модельних локацій для дослідження є репрезентативним для системного аналізу, оскільки вони відображають різні вектори деградації довкілля. У НПП «Синевир» спостерігається екстремальне точкове перевантаження: озеро функціонує як туристичний «магніт», акумулюючи надмірний потік на обмеженій площі (II – III стадія дигресії) [7].

Вирішуючи проблеми практичної оцінки, було розраховано рекреаційну ємність для цих ділянок на період 90 діб. Територія НПП «Синевир» (табл. 1) забезпечує загальну ємність у 2187216 осіб за сезон [7]. Чорногірський заповідний масив (табл. 2), віднесений виключно до зони регульованої рекреації через низьку стійкість, при площі 163,75 км<sup>2</sup> здатен прийняти 1473750 осіб [8]. Термальні води Косонь (табл. 3), як інфраструктурно змінена територія стаціонарної рекреації, мають ємність лише 36000 осіб [9]. Загалом ємність трьох локацій сягає 3,7 млн. відвідувань. Однак саме просторовий аналіз виявляє критичні ризики: Синевир страждає від точкового перевантаження берегової лінії, Чорногора вразлива до площинної ерозії, а Косонь уже працює на межі екологічних можливостей.

Таблиця 1 – Розрахунок рекреаційної ємності НПП «Синевир» [7]

| Зона                   | $S_i$ (га) | $S_i$ (км <sup>2</sup> ) | $N_i$ (ос./км <sup>2</sup> ) | $C_i$ (діб) | $D_i$ (дні) | $N_i \times S_i$ | $\times C_i$ | $V_i$ (осіб) |
|------------------------|------------|--------------------------|------------------------------|-------------|-------------|------------------|--------------|--------------|
| Регульованої рекреації | 21550,39   | 215,504                  | 100                          | 90          | 1           | 21550,4          | 112,869      | 1939536      |
| Стаціонарної рекреації | 55,04      | 0,5504                   | 5000                         | 90          | 1           | 2752             | 135,900      | 247680       |
| Загалом                | 21605,43   | 216,05                   |                              |             |             |                  |              | 2187216      |

Таблиця 2 – Розрахунок рекреаційної ємності Чорногірського заповідного масиву [8]

| Зона                   | $S_i$ (га) | $S_i$ (км <sup>2</sup> ) | $N_i$ (ос./км <sup>2</sup> ) | $C_i$ (діб) | $D_i$ (дні) | $N_i \times S_i$ | $\times C_i$ | $V_i$ (осіб) |
|------------------------|------------|--------------------------|------------------------------|-------------|-------------|------------------|--------------|--------------|
| Регульованої рекреації | 16375      | 163,75                   | 100                          | 90          | 1           | 16375            | 112,869      | 1473750      |
| Загалом                | 16375      | 163,75                   | 100                          | 90          | 1           | 16375            | 112,869      | 1473750      |

З огляду на результати системного аналізу якості довкілля, пропонується впровадження обґрунтованих регуляторних механізмів. Для НПП «Синевир» рекомендується запровадити ліміт денних відвідувань біля озера (2000 – 2500 осіб) та облаштувати дерев'яні настили. Для

Чорногірського масиву критично важливо ввести онлайн-реєстрацію на маршрути та контролювати ширину стежок. Для курорту Косонь слід встановити добовий ліміт до 400 осіб і модернізувати системи водоочищення [10].

Таблиця 3 – Розрахунок рекреаційної ємності Термальних вод «Косонь» [9]

| Зона                   | $S_i$<br>(га) | $S_i$<br>(км <sup>2</sup> ) | $N_i$<br>(ос./<br>км <sup>2</sup> ) | $C_i$<br>(діб) | $D_i$<br>(дні) | $N_i \times S_i$ | $\times C_i$ | $V_i$<br>(осіб) |
|------------------------|---------------|-----------------------------|-------------------------------------|----------------|----------------|------------------|--------------|-----------------|
| Стаціонарної рекреації | 8             | 0,08                        | 5000                                | 90             | 1              | 400              | 112,869      | 36000           |
| Загалом                | 8             | 0,08                        | 5000                                | 90             | 1              | 400              | 112,869      | 36000           |

Комплексне вирішення виявлених методичних проблем оцінки ємності та щорічний моніторинг стадій дигресії дозволять запобігти деградації ландшафтів і забезпечити стале рекреаційне використання регіону.

### Перелік посилань

1. Про стан розвитку туризму та курортів у Закарпатській області: аналіт. доп. Ужгород: Департамент туризму та курортів Закарпатської облдержадміністрації, 2024. 34 с.
2. Аналіз впливу воєнного стану на внутрішній туризм: звіт. Київ: Держ. агентство розвитку туризму України (ДАРТ), 2024. URL: <https://www.tourism.gov.ua/reports-2024> (дата звернення: 03.04.2026).
3. Адаптивність туристичного бізнесу в умовах енергетичної кризи: інформ. бюл. Асоціація готельєрів та курортів України. 2025. № 2. С. 10 – 14.
4. Про виконання бюджету Закарпатської області за 2023–2025 роки: стат. дані. Ужгород: Головне управління ДПС у Закарпатській області, 2026. URL: <https://zk.tax.gov.ua/statistics-2025> (дата звернення: 03.04.2026).
5. Кучерявий В.П. Ресурсознавство та рекреаційне природокористування: навч. посіб. Львів: Новий Світ-2000, 2021. 320 с.
6. Назарук М.С. Рекреаційна дигресія природних ландшафтів: монографія. Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2018. 240 с.
7. Проект організації території НПП «Синевир» та охорони його природних комплексів: офіц. вид. Хуст, 2022. URL: <https://npp-synevyr.net.ua/docs/project2022> (дата звернення: 03.04.2026).
8. Карпатський заповідний масив: моніторинг антропогенного впливу / За ред. М.П. Рибака. Рахів: КБЗ, 2023. 112 с.
9. Техніко-економічне обґрунтування розвитку рекреаційної зони «Косонь». Ужгород: Департамент екології та природних ресурсів Закарпатської ОДА, 2024. 48 с.
10. Рекомендації щодо встановлення лімітів антропогенного навантаження на об'єкти ПЗФ. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Київ, 2024. URL: <https://mepr.gov.ua/limits-guidelines> (дата звернення: 03.04.2026).

## **SUSTAINABLE DEVELOPMENT POLICY OF THE PUBLIC TRANSPORT COMPANY**

***V. Mateichyk, Dr.Sc. in Engineering, Prof., W. Piziorski, st.***  
*Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland*  
*vmate@prz.edu.pl*

In the context of increasing urbanization and environmental degradation, the implementation of the concept of sustainable development is becoming a priority for local authorities and the private sector. This idea is based on the creation of a transport system that is not only efficient and accessible to all, but, above all, neutral for the ecosystem.

A key link in this transformation is the modernization of public transport. To effectively encourage residents to abandon private cars, investments are needed in:

- electrification of public transport (electric buses, trams).
- intelligent traffic management systems that ensure smooth movement.
- full integration of different modes of transport (for example, ticketing systems that connect trains with city bikes).

Thanks to these initiatives, cities can significantly reduce road congestion, improve air quality and reduce greenhouse gas emissions.

At the same time, it is extremely important to include sustainable development models in the overall company strategy. The implementation of innovations in the field of mobility requires not only technological progress, but also appropriate organizational and financial planning. Companies that are able to harmoniously combine economic goals with social and environmental responsibility gain a competitive advantage and create a positive image among customers and partners. The European Union guidelines included in the "Strategy for Sustainable and Smart Mobility" [1] determine the direction of transport development towards climate neutrality by 2050, where the electrification of public transport in Europe, including Poland, plays a crucial role.

These projects are an integral part of the continuous maintenance and improvement of the Environmental Management System (EMS), which complies with the international standard ISO 14001. The adoption of this standard creates the basis for systematic management and reduction of the negative impact of operational activities on the environment. The development of sustainable mobility is seen as a key operational step aimed at effectively controlling and continuously improving environmental parameters, in particular in the field of exhaust emissions and fossil fuel consumption. The project is also strictly based on the principle of "Do No Significant Harm" (DNSH) [2], which is implemented by striving for a sharp reduction in air and noise pollution, as well as optimizing the use of energy and resources using the best available technologies. The most

important and measurable goal of modernizing public transport is the gradual phasing out of diesel vehicles and their replacement with a modern, low-emission fleet.

The aim of this work was to develop a sustainable development policy for the public transport company TORSKI in accordance with the DNSH principle as proof of compliance with this principle for receiving investment through the European Transport Projects Center [3].

Environmental principles constitute a comprehensive set of guidelines, tasks, and mechanisms that the company actively implements, striving to minimize the environmental impact of its operations. This environmental program encompasses numerous aspects, including priority actions aimed at reducing climate-impacting gas emissions, reducing the intensity of electricity and fuel consumption, introducing eco-friendly technologies, and strict compliance with environmental protection regulations. This environmental strategy is an integral part of a broad-based approach to sustainable development and often includes a clear commitment to the continuous improvement of internal procedures and intensive investment in innovative pro-ecological solutions.

TORSKI public transport company focuses on passenger transport services, operating a collection of M3-class buses. Currently, it owns a total of 62 vehicles (divided into two groups: 36 and 26), powered by compression-ignition engines, commonly referred to as diesels. Although the current fleet meets Euro 5 and Euro 4 emission norms, demonstrating the use of certain technologies to reduce pollution, the company still relies on fossil fuels.

In light of its sustainable development policy, TORSKI company is modernizing its fleet, planning to introduce buses powered by compressed natural gas (CNG). By 2027, the company will maintain a total of 62 buses, but some of them will be replaced with new models that will meet the higher emission norm – the Euro 6 norm. The next stage of the transformation involves the gradual introduction of purely electric (E) vehicles into service. In 2028, the number of vehicles will remain at 62, but their power system will undergo further significant transformation: part of the fleet will be fully electrified, while the remaining vehicles will use CNG. All new units will be fully compliant with the Euro 6 norm, enabling the company to achieve significant reductions in emissions and move closer to its ambition of achieving climate neutrality.

**TORSKI's Mission and Values.** The TORSKI company consistently strives to solidify its position as a leading player in the transport services market. This ambition is based on the continued support of sustainable mobility for the region's residents. Achieving this goal requires systematically expanding access to public transport, strengthening safety standards, and improving passenger comfort, while simultaneously incorporating environmental protection into all areas of management. Responsible resource management, reducing harmful impacts on the natural environment, and promoting pro-ecological attitudes for present and future generations also play a significant role.



TORSKI's Commitments. The company operates based on the principles of sustainable development, respecting the DNSH principle (causing no significant harm), as well as all applicable legal regulations. The overarching goal is to continually improve the quality of transport services while protecting the environment and ensuring universal, equal, and equitable access to transport options for all social groups.

TORSKI's Strategic Goals. With a focus on the natural environment, the company's activities focus on:

- implementing and continuously improving the Environmental Management System, compliant with ISO 14001 and EMAS standards;
- strict compliance with applicable legal regulations and other environmental protection requirements;
- regular fleet modernization through investments in modern, eco-friendly vehicles;
- efficient management of company resources, including the economical and conscious use of raw materials, materials, fuels, and energy, and responsible management of water resources;
- decarbonizing operational processes to mitigate the effects of climate change and adapting operations to its consequences;
- reducing greenhouse gas emissions and other environmental pollutants to prevent and control air, water, and soil degradation;
- improving wastewater quality and reducing its volume to protect water and soil and effectively control pollution;
- implementing the principles of a circular economy, including waste reduction and recycling;
- rising environmental awareness among employees and actively engaging them in compliance with environmental protection principles.

The Sustainable Development Policy is made available to all employees of the Company and those acting on its behalf. Information about it is also communicated to contractors and customers.

### References

1. Strategy for Sustainable and Smart Mobility. [https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy\\_en](https://transport.ec.europa.eu/transport-themes/mobility-strategy_en).
2. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2020/852 z dnia 18 czerwca 2020 r. w sprawie ustanowienia ram ułatwiających zrównoważone inwestycje, zmieniające rozporządzenie (UE) 2019/2088. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj/pl>.
3. <https://www.cupt.gov.pl/strefa-beneficjenta/wdrazanie-projektow/ochrona-srodowiska/zasada-dnsh/>.

# ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ БУДІВЕЛЬ ТА СИСТЕМИ «РОЗУМНИЙ ДІМ» ЯК ФАКТОР ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАЛОСТІ

**В.О. Моздолевський, асп.**

*Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ,  
Україна*

mozdolevskyi\_vo-2024@knuba.edu.ua

Енергоефективність будівель є однією з ключових проблем сучасного суспільства та економіки, яка привертає увагу як компаній і державних установ, так і міжнародних організацій, особливо у сучасний період тимчасової кризи енергоресурсів, що пов'язано з подіями на Близькому Сході. Рациональне використання енергетичних ресурсів дозволяє значно знизити негативний вплив на навколишнє середовище, зменшити викиди парникових газів та скоротити витрати на експлуатацію будівель. В Європейському Союзі досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року є стратегічною метою, яка передбачає не лише оптимізацію споживання енергії, а й запровадження інноваційних технологій, вдосконалення контрольних систем та енергозберігаючих заходів [1]. У цьому контексті концепція Smart Energy виступає ефективним інструментом підвищення енергоефективності, визначаючи інтелектуальне та «на вимогу» забезпечення енергією пристроїв та додатків, при якому невикористані ресурси зберігаються для подальшого використання або передаються для інших потреб. Реалізація цієї концепції неможлива без використання розумних технологій, зокрема Інтернету речей (IoT), що дозволяє сенсорам відслідковувати взаємодію із зовнішнім середовищем та передавати дані на інші пристрої або кінцевим користувачам, забезпечуючи можливість оперативного управління та адаптації будівельних систем [2].

Застосування IoT у енергетичному ланцюзі охоплює всі етапи – генерацію, передачу, розподіл та споживання енергії, проте особлива увага в дослідженнях приділяється кінцевому споживанню у будівлях. Будівлі становлять значний резерв енергозбереження, оскільки вони споживають близько 40 % кінцевої енергії та виробляють приблизно 36 % викидів CO<sub>2</sub> у Європейському Союзі [3]. В Україні цей відсоток значно вищий, оскільки до 70 % житлового фонду будувалися у часи необмеженості енергоресурсів та безвідповідального ставлення до екологічних аспектів такого споживання. Крім того, за оцінками 75 % будівель у Європі є енергетично неефективними, що створює значний потенціал для скорочення енергоспоживання. Одним із найбільш практичних підходів до підвищення енергоефективності є впровадження розумних технологій, що не потребують капітальних конструктивних змін і дозволяють оптимізувати роботу будівельних систем без значного втручання у структуру будівлі. Використання IoT дозволяє збирати дані про споживання електроенергії та

тепла, аналізувати їх та здійснювати автоматичне регулювання освітлення, опалення та кондиціонування повітря, що забезпечує економію енергії та підвищує комфорт користувачів. За оцінками фахівців, застосування інтегрованих систем Smart Building може забезпечити економію енергії на рівні 30 – 50 % порівняно з традиційними будівлями [4 – 5].

Метою є оцінити економічну ефективність впровадження IoT-пристроїв у змішаних будівлях, що використовуються для комерційних та житлових цілей, з урахуванням ретрофітних втручань. Для цього було розроблено аналітичну модель, яка дозволяє порівняти сценарій із встановленням IoT-технологій та сценарій без їх застосування. У моделі враховувалися витрати на придбання та встановлення обладнання, а також експлуатаційні витрати на технічне обслуговування та ремонт. Оцінювалися економічні вигоди від скорочення споживання енергії та відповідної економії коштів та ресурсів.

Модель була застосована до будівлі площею 2000 м<sup>2</sup>, яка складається з чотирьох поверхів: перші два поверхи займали офіси відкритого типу, третій поверх – професійні офіси, а четвертий – житлові квартири. Для офісних приміщень пропонувалося LED-освітлення, що керується системою на основі датчиків DALI, регулювання мікрокліматичних показників на основі датчиків відкриття вікон, термостатів та HVAC-контролерів, що забезпечують управління освітленням та мікрокліматом у приміщеннях. Запропонована система передбачає, що житлові приміщення були оснащені Zigbee-шлюзами, датчиками руху, розумними термостатами, автоматичними клапанами та розумними розетками. Орієнтовна вартість впровадження IoT склала 2,8 млн. грн., річні експлуатаційні витрати – 124 тис. грн., очікувана річна економія – 893 тис. грн., що дозволяє окупити інвестицію за 4 роки.

Для оцінки чутливості моделі було проведено аналіз залежності вигоди від класу енергетичної ефективності будівлі за сертифікатом APE (*Attestato di Prestazione Energetica*), який включає сім основних класів – від A до G, що відповідають різним рівням споживання енергії. Результати показали, що для будівель із низьким класом енергетичної ефективності (E – G) економічний ефект від впровадження IoT є найбільшим, тоді як для будівель високого класу (A – C) термін окупності збільшується. Це пояснюється тим, що будівлі з високим споживанням енергії мають більший потенціал для економії завдяки розумним технологіям.

Встановлення розумних пристроїв дозволяє забезпечити значну економію ресурсів та коштів, не потребуючи капітальних змін конструкцій. Переваги найбільш помітні для будівель із низьким класом енергоефективності, тоді як для будівель високого класу вони відносно менші. Обмеження дослідження полягають у використанні середніх значень економії, що можуть відрізнятися залежно від рівня експлуатації та типу обладнання. Подальші дослідження можуть розширювати оцінку

економічної ефективності за рахунок інтеграції додаткових функцій IoT, таких як безпека, контроль ризиків та управління ресурсами будівлі в реальному часі, а також врахування динаміки розвитку ринку розумних технологій.

З огляду на актуальність енергоефективності та швидкий розвиток розумних технологій, впровадження IoT у будівельний сектор є стратегічно важливим напрямом для досягнення сталого розвитку. Розроблена модель дозволяє науково обґрунтувати інвестиційні рішення, оцінити економічні результати та сприяє прийняттю стратегічних рішень щодо модернізації існуючих будівель із метою підвищення їх енергоефективності, екологічності та комфорту користувачів.

### **Перелік посилань**

1. Al-Obaidi K.M., Hossain M., Alduais N.A.M., Al-Duais H.S., Omran H., Ghaffarianhoseini A. A. Review of Using IoT for Energy Efficient Buildings and Cities: A Built Environment Perspective. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 16. P. 5991. DOI: 10.3390/en15165991.
2. Jaharudin N.B. Systematic Literature Review: The Development of the Internet of Things (IoT) in the Energy Sector. *Engineering and Technology International Journal*. 2022. Vol. 5, № 03. P. 667. DOI: 10.55642/eatij.v5i03.667.
3. Metallidou C.K., Psannis K.E., Egyptiadou E.A. Energy Efficiency in Smart Buildings: IoT Approaches. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 63679 – 63699. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984461.
4. Poyyamozi P., Murugesan B., Rajamanickam N., Shorfuzzaman M., Aboelmagd Y. IoT - A Promising Solution to Energy Management in Smart Buildings: A Systematic Review, Applications, Barriers, and Future Scope. *Buildings*. 2024. Vol. 14, № 11. P. 3446. DOI: 10.3390/buildings14113446.
5. Rojek I., Mikołajewski D., Mroziński A., Macko M., Bednarek T., Tyburek K. Internet of Things Applications for Energy Management in Buildings Using Artificial Intelligence – A Case Study. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 7. P. 1706. DOI: 10.3390/en18071706.

### **АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОЇ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ**

**М.Ю. Монченко, асп., С.М. Юрасов, к.т.н., доц.**

*Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса,*

*Україна*

shmonda@gmail.com

urasen54@gmail.com

**Актуальність проблеми.** У сучасних умовах глобальної цифровізації традиційні наземні пости моніторингу не здатні забезпечити достатню просторову щільність даних. Дистанційні методи (*Remote Sensing*) стають ключовим інструментом для отримання оперативної та цілісної картини

забруднення атмосфери на локальному, регіональному та глобальному рівнях [1, 5].

Дистанційне зондування атмосфери базується на взаємодії електромагнітного випромінювання з молекулами газів та аерозолями. Основні методи включають:

- *пасивні методи* – базуються на реєстрації відбитого сонячного випромінювання або власного теплового випромінювання Землі (супутникові спектрометри) [7];
- *активні методи* – використовують власне джерело випромінювання.

Ключовим є *LIDAR (Light Detection and Ranging)*, що дозволяє будувати вертикальні профілі розподілу домішок [8].

Сучасний аналіз спирається на дані європейської програми *Copernicus* (супутник *Sentinel-5P* з інструментом *TROPOMI*). Це дозволяє з високою точністю (до  $3,5 \times 5,5$  км) визначати концентрації таких речовин: діоксид азоту ( $NO_2$ ) та діоксид сірки ( $SO_2$ ); чадний газ ( $CO$ ) та метан ( $CH_4$ ); формальдегід ( $HCHO$ ) та озоновий шар ( $O_3$ ) [3, 9].

**Роль аерозольної оптичної товщини (AOD).** Одним із найважливіших теоретичних параметрів є *AOD (Aerosol Optical Depth)*. Це кількісна міра послаблення світла аерозолями. Науковий аналіз доводить пряму кореляцію між значеннями *AOD* та концентрацією дрібнодисперсного пилу ( $PM_{2,5}$  та  $PM_{10}$ ), що є критичним для оцінки ризиків для здоров'я населення [2, 10].

Теоретичний аналіз показує, що «сірі» дані дистанційного зондування потребують верифікації. Найбільш перспективним підходом є асиміляція даних:

- поєднання супутникових знімків із даними наземних станцій (*IT-мереж*);
- використання хіміко-транспортних моделей (наприклад, *WRF-Chem* або *CAMS*) для врахування метеорологічних факторів (вітер, вологість, інверсія температур) [11].

Сучасний етап розвитку методів прогнозування переходить від класичних статистичних моделей до машинного навчання (*ML*) та нейронних мереж (*CNN, LSTM*). Вони дозволяють:

- враховувати нелінійні зв'язки між викидами та погодними умовами;
- прогнозувати пікові забруднення (смог) на 24 – 72 год. вперед з точністю понад 85 – 90 % [12].

Коли ми маємо справу з масивами даних від супутників та наземних станцій, звичайна статистика недостатньо ефективна. Більш доцільним є використання архітектур глибокого навчання, кожна з яких виконує свою функцію.

*CNN (Convolutional Neural Networks)* – очі системи. Згорткові нейронні мережі ідеально підходять для аналізу просторових даних. У контексті моніторингу повітря вони обробляють супутникові знімки як багатошарові карти. *CNN* використовує спеціальні фільтри, які сканують зображення,

виявляючи патерни: скупчення аерозолів, шлейфи диму або теплові аномалії [12].

Мережа здатна ідентифікувати джерела викидів на основі візуальних ознак та спектральних підписів, які лінійний алгоритм не помітить.

*LSTM (Long Short-Term Memory)* – пам'ять системи. Це особливий тип рекурентних нейронних мереж (*RNN*), розроблений для обробки часових послідовностей. Так як звичайні мережі швидко втрачають інформацію, що була на початку ланцюжка даних то *LSTM* (завдяки системі брам) вирішує, яку інформацію варто зберігати довгостроково, а яку – відкинути.

Показники *PM<sub>2.5</sub>* (дрібнодисперсному пилу) чи *NO<sub>2</sub>* сьогодні залежать від того, що відбувалося в атмосфері вчора. *LSTM* аналізує історичні тренди (сезонність, добові коливання) і дозволяє будувати точні прогнози на 24 – 72 год. вперед [12].

Узагальнюючи отримані дані стосовно нейронних мереж *CNN* та *LSTM* можна припустити, що найбільш перспективним методом сьогодні є поєднання цих двох архітектур.

Виходячи з проведеного теоретичного аналізу сучасних дистанційних методів оцінювання та прогнозування стану атмосферного повітрям можна зробити висновок, що дистанційні методи є незамінними для моніторингу трансграничного перенесення забруднюючих речовин та оцінки екологічного стану територій, де відсутні наземні спостереження. Майбутнє галузі полягає у створенні «цифрових двійників» атмосфери, які об'єднують супутникові дані, наземні сенсори та прогностичні алгоритми штучного інтелекту в єдину екосистему прийняття рішень.

### Перелік посилань

1. Мельник А.О. Космічний моніторинг довкілля: навч. посіб. Київ: Кондор, 2022. 240 с.
2. Іванюта С.П. Екологічна безпека України: загрози та шляхи забезпечення: аналіт. доповідь. Київ: НІСД, 2023. 84 с.
3. Адаменко О.М., Приходько М.М. Регіональний екологічний моніторинг: монографія. Івано-Франківськ: Супрун В. П., 2021. 352 с.
4. Li X. et al. Deep learning for air quality forecasting: A comparative study of LSTM, GRU, and Transformer models. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 351. Art. 119842.
5. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Thriving on Our Changing Planet: A Decadal Strategy for Earth Observation from Space. Washington, DC: The National Academies Press, 2018. 709 p. <https://doi.org/10.17226/24938>.
6. Sentinel-5P TROPOMI Science Data Products. European Space Agency. 2023. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p> (дата звернення: 04.04.2026).
7. Schowengerdt R.A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. 3rd ed. Academic Press, 2006. 656 p.
8. Wandinger U. Introduction to Lidar. *Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere* / Ed. by C. Weitkamp. New York: Springer, 2005. P. 1 – 18.
9. Veefkind J.P. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor mission: A high-

- resolution chemical data cube for air quality and climate applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 15 – 32. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.026>.
10. Hoff R.M., Christopher S.A. Remote Sensing of Particulate Pollution from Space: Have We Reached the Promised Land? *Journal of the Air & Waste Management Association*. 2009. Vol. 59, iss. 6. P. 645 – 675. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.6.645>.
  11. Inness A. et al. Data assimilation of satellite-retrieved fractional aerosol optical depth in the Copernicus Atmosphere Monitoring Service data assimilation system. *Geoscientific Model Development*. 2019. Vol. 12, iss. 9. P. 3811 – 3834. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3811-2019>.
  12. Ryzhikov Y. et al. Deep Learning for Air Quality Prediction: A Comparative Study of CNN, LSTM, and GAN Models. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2022. Vol. 194. Art. 452. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10112-x>.

## **АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПРОМИСЛОВОЇ БЕЗПЕКИ ТЕРМІЧНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ВУГЛЕВОДНЕВІСНИХ ВІДХОДІВ**

**М.М. Москаль., асп., Є.В. Манойло, к.т.н., проф.**

*НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна*

*Ievgeniia.Manoilo@khpі.edu.ua*

На сучасному етапі розвитку паливно-енергетичного комплексу накопичення нафтошламів та вуглеводневих відходів досягло масштабів, що загрожують національній екологічній безпеці. За даними галузевого аналізу, внаслідок екологічних порушень підприємствами з господарського обороту виводяться придатні сільськогосподарські землі. Стратегічне значення проблеми зумовлене не лише колосальними обсягами накопичень, а й здатністю вуглеводнів до тривалої персистенції та латеральної міграції у ґрунтових горизонтах. Масштаби видобутку вуглеводнів на планеті, що вимірюються мільярдами тон, породжують глобальну екологічну проблему накопичення відходів нафтогазової галузі.

Типовим прикладом формування масштабних «техногенних покладів» є діяльність Шебелинського відділення з переробки газового конденсату та нафти. Виробничий майданчик у смт. Андріївка, що спочатку виступав як точкове джерело забруднення, внаслідок постійної міграції вуглеводнів трансформувався у площинне джерело. Моніторингові дослідження підземних вод із шахтних колодязів у 2019 – 2021 рр. підтвердили критичний стан екосистеми: нафтопродукти виявлені у всіх точках спостереження, при цьому в ключових пробах зафіксовано перевищення нормативних вимог у 1,33 – 2,83 рази [1].

Процес поширення забруднення ускладнюється тим, що відбувається фракціонування вуглеводневого потоку: легкі сполуки проникають у глибокі водоносні горизонти, тоді як важкі смолисто-асфальтенові фракції консервуються у верхніх шарах. Сумісна дія цих речовин та їх взаємодія з іншими хімічними агентами створює синергетичний токсичний ефект, який

блокує механізми природного самоочищення. Хронічна деградація підземних вод у таких регіонах стає незворотною без ліквідації самих накопичувачів, що вимагає переходу від пасивного моніторингу до активної високотехнологічної утилізації [2].

Глобальна проблема накопичення мільярдів тон нафтошламів призводить до виведення з господарського обігу земельних площ. Відходи, що містять нафту, утворюються на всіх етапах виробничого циклу: під час будівництва нафтових і газових свердловин, промислової експлуатації родовищ, транспортування магістральними трубопроводами, переробки на НПЗ, очистки стічних вод та регламентної чистки резервуарів і обладнання.

Нафтошлами – це багатокomпонентні колоїдні системи зі стійкою фізико-хімічною структурою. Їх склад коливається у широких діапазонах: вуглеводні (5 – 90 %), вода (1 – 52 %), механічні домішки. Щільність варіюється від 870 до 1700 кг/м<sup>3</sup>.

За об'єктів виникнення нафтошлами можна класифікувати наступним чином:

- промислові – відходи буріння та видобутку;
- резервуарні – шлами після чищення ємностей на нафтобазах та НПЗ;
- ґрунтові – результат аварійних розливів.

Більшість цих відходів належать до II – IV класів небезпеки через вміст важких металів та екотоксикантів.

Тривале зберігання нафтошламів у відкритих амбарах створює постійні загрози для всіх компонентів екосистеми:

- атмосфери – відбувається вивільнення летких органічних сполук (ЛОС) та метану ( $CH_4$ ), посилює парниковий ефект та створює ризики пожежної небезпеки;
- гідросфери – фільтрація вуглеводнів у ґрунтові горизонти призводить до практично незворотного забруднення підземних вод, що робить їх непридатними для господарського використання;
- літосфери – нафтове забруднення знищує родючий шар ґрунту, порушує його водно-повітряний баланс та співвідношення мікроелементів;
- біоти – вплив нафтопродуктів пригнічує фотосинтетичний апарат рослин, знижує вміст хлорофілу в клітинах та викликає високу фітотоксичність ґрунтів.

Щорічне утворення нових шламів вимагає радикального перегляду підходів до їх деструкції. Пасивне зберігання таких відходів є неприпустимим, а термічна деструкція є перспективним методом радикальної трансформації їх органічної частини.

Термічна деструкція є домінуючим підходом у поводженні з нафтошламами завдяки здатності руйнувати стійкі органічні матриці. Проте ефективність методу критично залежить від обраної технології та складу сировини.

Критична оцінка традиційних методів виявляє певні обмеження щодо



їх відповідності сучасним стандартам.

Спалювання реалізується в обертових печах при  $T > 1200$  °C. Обсяг відходів зменшується на 95 %. Пряме спалювання є неприпустимим для хлор- та сірковмісних відходів, оскільки це неминуче призводить до синтезу діоксинів та оксидів сірки, токсичність яких перевищує вихідну сировину. Крім того, традиційні печі з «киплячим шаром» та обертові установки характеризуються високою енергоємністю та схильністю до коксування інертного матеріалу при роботі з важкими фракціями. Ризиком методу є утворення вторинних токсикантів, тому метод стає дедалі менш привабливим через надмірні витрати на подальшу багатоступеневу очистку газів.

Газифікація відходів реалізується для отримання синтез-газу (суміші  $H_2$  та  $CO$ ) при 600 – 1100 °C у відновному середовищі. Метод дозволяє досягти мінімальне утворення оксидів азоту, та вважається ефективною перехідною технологією, що дозволяє отримувати енергоносії з мінімальним екологічним слідом.

Піроліз передбачає деструкцію відходів без доступу кисню при температурах від 450 – 1050 °C. В результаті отримується піролізний газ, рідке паливо та технічний вуглець. Метод забезпечує максимальну рекуперацію ресурсів у замкненому циклі.

Поряд із зазначеними трьома методами активно розвиваються інноваційні та високотемпературні технології деструкції.

Для повної деструкції стійких сполук необхідно впроваджувати системи, що працюють за межами традиційних температурних режимів.

Серед таких технологій виділяються плазмовий метод, СВЧ-утилізація та термоудар.

Плазмовий метод є технологією високотемпературної газифікації відходів із використанням плазмотронів високої потужності. Відходи вводяться безпосередньо в плазмову дугу плазмохімічного реактора. Одностадійне розкладання при  $T > 1500$  °C гарантує відсутність у отриманих газах діоксинів.

СВЧ-утилізація передбачає об'ємний нагрів відходів. На відміну від поверхневого нагріву, СВЧ-випромінювання проникає всередину обводненого шламу, забезпечуючи миттєву дестабілізацію стійких емульсій та інтенсивне пароутворення по всьому об'єму, що критично важливо для шламів з високим вмістом води.

Технологія термоудару передбачає миттєвий нагрів ( $10^4$  град/с), яке викликає «вибухове» вскипання. Це руйнує міжмолекулярні зв'язки високомолекулярних сполук, дозволяючи зменшити об'єм відходів у 10 разів без їх попередньої сушки.

Для повної деструкції найбільш стійких токсикантів, присутніх у нафтошламах та продуктах їх переробки, необхідне впровадження комбінованих термічних методів їх утилізації, зокрема заснованих на

використанні плазмових технологій.

Низькотемпературна плазма (2000 – 10000 K) є інструментом для безповоротного руйнування галоїдованих діоксинів та інших стійких органічних забруднюючих речовин. Плазмохімічний реактор дозволяє досягати ступеня конверсії сировини на рівні 96 – 98 % за одну технологічну стадію. Оптимальний технологічний режим передбачає подачу стабілізованої емульсії в реактор зі швидкістю 600 мл/хв. під тиском 1,2 ат. Важливо зазначити, що при перевищенні швидкості подачі понад 800 мл/хв. процес випаровування припиняється через недостатній нагрів системи, що робить такий режим недопустимим.

Висока ефективність методу зумовлена наявністю таких факторів:

- 1) теплові мікрорзриви, тобто миттєве випаровування води всередині мікрокрапель призводить до їх дроблення, що радикально збільшує поверхню контакту з плазмою;
- 2) активна дисоціація, коли кисень та водень, що утворюються при розкладанні води, ініціюють повне догоряння вуглеводнів, виключаючи механічний недопал.

Традиційні засоби технічного захисту (обвалування, ізоляція) є паліативними заходами, оскільки вони не ліквідують джерело ризику, а висока ймовірність термічного ураження персоналу (понад 40 %) при аваріях вимагає повної переробки накопичених відходів. Перехід на комбіновані та плазмові технології є стратегічно необхідним, оскільки високотемпературна деструкція забезпечує повне знешкодження стійких токсикантів та викликає утворення діоксинів.

Економічна привабливість плазмової технології підтверджується відносно низькою собівартістю, відсутністю вторинних відходів та компактністю установок, що дозволяє реалізувати утилізацію нафтошламів безпосередньо на місцях їх накопичення.

На основі даних про забруднення на родовищах рекомендується розгортання мобільних комплексів для обробки джерел забруднення до моменту міграції цих антропогенних покладів у підземні горизонти. Впровадження датчиків контролю газодинамічних та енергетичних параметрів установок для підтримки тиску 1,2 – 1,3 атм та стабільної деструкції дозволяє автоматизувати процеси утилізації [3].

Комплексне впровадження методів плазмової деструкції у поєднанні з іншими методами обробки дозволить трансформувати екологічний тягар вуглеводневих відходів у ресурсний потенціал енергоефективної економіки та стане фундаментом екологічної безпеки нафтогазового комплексу.

#### **Перелік посилань**

4. Іваненко І.І., Петренко П.П. Оцінка забруднення підземних вод нафтопродуктами. *Екологічні науки*. 2022. № 1. С. 25 – 30.
5. Sililo O.T. Migration and attenuation of organic contaminants in the unsaturated zone: field experiments in the Western Cape, South Africa / Ground-water in the Urban

- Environment: Problems, Processes and Management. Rotterdam: Balkema, 1997. P. 181–186.
6. Moiseev V.F., Manoilo E.V., Zhuha O.O., Davydov D.V., Moskal M.M. Industry 4.0 technologies in the design of reliable systems in chemical engineering. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. 2025. № 1 (13). С. 9 – 15.

## **ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРЯМІВ І МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ІНВАЗІЙНИХ ЗАНОСНИХ ВИДІВ НА ТЕРИТОРІЯХ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ УКРАЇНИ**

**Д.О. Мудрак, асп., Є.Д. Ткач, д.б.н., В.І. Стародуб, к.с.-г.н.**

*Інститут агроекології і природокористування НААН, м. Київ, Україна*  
dima.mudrak.2001@gmail.com

**О.В. Мудрак, д.с.-г.н., проф.**

*КЗВО «Вінницька академія безперервної освіти», м. Вінниця, Україна*  
ov\_mudrak@ukr.net

Проблема контролю заносних, інвазійних чужорідних видів рослин на територіях природно-заповідного фонду набуває виняткової наукової і прикладної ваги у зв'язку з тим, що біологічні інвазії нині розглядаються як один із провідних прямих чинників глобальної втрати біорізноманіття [1, 2].

За оцінками IPBES ці види входять до числа п'яти головних безпосередніх причин змін біоти на глобальному рівні, а їхній вплив проявляється не лише у трансформації видового складу, але й у зміні екосистемних функцій, послуг екосистем, економічних показників і, навіть, соціокультурних практик природокористування [3, 4].

У межах сучасної міжнародної політики збереження біорізноманіття це питання винесене в окремий пріоритет: Куньмінсько-Монреальська глобальна рамкова програма з біорізноманіття у Цілі 6 прямо вимагає виявлення та управління шляхами занесення, запобігання інтродукції та укоріненню пріоритетних інвазійних видів, а також скорочення темпів їх поширення щонайменше на 50 % до 2030 року [5].

У теоретико-методологічному вимірі контроль заносних видів на територіях природно-заповідного фонду (ПЗФ) доцільно трактувати не як сукупність розрізнених винищувальних заходів, а як багаторівневу систему екологічної безпеки, що охоплює аналіз шляхів занесення, превенцію, раннє виявлення, швидке реагування, локалізацію осередків, довгострокове стримування чисельності, а також відновлення природних оселищ і підсилення бар'єрної спроможності автохтонних угруповань [6, 7]. Саме така логіка закріплена в керівних принципах Конвенції про біологічне різноманіття, де наголошено на пріоритетності екосистемного підходу та випереджувального запобігання інвазіям, а також у Регламенті ЄС № 1143/2014, який нормативно поєднує профілактику, раннє виявлення,

швидке викорінення та управління вже поширеними інвазійними чужорідними видами. Таким чином, міжнародна практика однозначно вказує, що найефективнішими є не постфактумні дії, а системний контроль та рання діагностика.

Для територій ПЗФ ця проблема є особливо гострою, оскільки заповідні та напівприродні екосистеми, з одного боку, виконують функцію резерватів автохтонного біорізноманіття, а з другого – часто залишаються вразливими до поширення видів із порушених, антропогенно-трансформованих ландшафтів [8 – 10]. Навіть локальні інвазійні осередки в межах ПЗФ можуть виступати джерелом подальшої перебудови рослинного покриву: посилювати конкурентний тиск на аборигенні види, змінювати ярусність і мозаїчність фітоценозів, спрощувати ценотичну структуру, трансформувати ґрунтово-гідрологічний режим і, як наслідок, знижувати стійкість природних угруповань до нових хвиль біотичних інвазій. У міжнародних документах з управління інвазійними видами в заповідних територіях підкреслено, що для таких екосистем пасивна стратегія «невтручання» не є достатньою; натомість потрібне активне управління, інтегроване у загальну систему менеджменту природоохоронних територій.

Додаткової актуальності проблемі надає взаємодія біологічних інвазій із сучасними глобальними змінами довкілля [11]. У документах CBD та IPBES наголошено, що ризики занесення і натуралізації чужорідних видів посилюються під впливом міжнародної торгівлі, транспорту, туризму, змін землекористування та кліматичних змін. Це означає, що для України, як і для Європи загалом, контроль заносних видів уже не може обмежуватися лише фіксацією присутності небажаних таксонів; він потребує прогнозування шляхів проникнення, оцінки інвазійного потенціалу видів, просторового аналізу вразливості оселищ і моделювання осередків майбутнього розселення. У цьому сенсі особливої цінності набувають геоботанічний моніторинг, GIS-картування, оцінка пропагувального тиску та система індикаторів стану бар'єрного блоку природних фітоценозів.

Український контекст останніх років свідчить про істотне посилення інституційної і нормативної визначеності у сфері протидії інвазійним чужорідним видам. Зокрема, Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства наказом від 15.03.2024 № 290 затвердило Методичні рекомендації щодо оцінки наявного і потенційного впливу (ризиків) інвазійних чужорідних видів, що є важливим кроком до уніфікації національних підходів до ризик-аналізу, ранжування видів за ступенем небезпеки та обґрунтування управлінських рішень [12]. Ще більш показовим є ухвалення постанови Кабінету Міністрів України від 17.01.2025 № 45, якою затверджено Порядок здійснення моніторингу біологічного та ландшафтного різноманіття: у переліку об'єктів такого моніторингу прямо зазначено інвазійні чужорідні види рослинного і тваринного світу, внесені до переліків, затверджених Міністерством [13]. Крім того, цей Порядок

передбачає розроблення програм моніторингу на національному, регіональному, локальному і об'єктовому рівнях, установлення референтних показників, застосування уніфікованих наукових методів збору та аналізу даних, а також коротко- і довгострокове прогнозування змін стану біорізноманіття.

Отже, на нормативному рівні в Україні вже сформовано основу для переходу від епізодичних спостережень до системного науково обґрунтованого управління інвазіями.

Водночас саме для територій ПЗФ зберігається низка принципових науково-практичних прогалин. По-перше, в українській практиці ще недостатньо опрацьовані порівняльні підходи до вибору методів контролю залежно від стадії інвазійного процесу, типу оселища, режиму заповідності та рівня антропогенної трансформації прилеглих ландшафтів. По-друге, потребує поглиблення методологія оцінки ефективності різних напрямів втручання – від механічного, агротехнічного і біотехнічного контролю до фітоценотичної реставрації та керування бар'єрним потенціалом природних угруповань. По-третє, для заповідних екосистем особливо важливим є критерій екологічної допустимості заходів: не кожен ефективний у господарських ландшафтах метод є прийнятним у заповідному режимі, де пріоритетом виступає мінімізація побічного впливу на аборигенну флору, фауну і структуру оселищ. Саме тому порівняльна характеристика напрямів і методів контролю заносних видів у межах ПЗФ має не лише описове, а й безпосереднє прикладне значення для розроблення диференційованих схем управління інвазіями [14, 15].

У наших дослідженнях такими напрямками і методами контролю інвазійних заносних видів є декілька.

Система контролю заносних видів на територіях ПЗФ є багаторівневою та інтегрованою, що відображає сучасну еволюцію підходів – від локальних реагувальних заходів до комплексного екосистемного управління. Ключовою її ланкою виступає моніторинг і раннє виявлення, який формує емпіричну основу для всіх подальших управлінських рішень. Саме завдяки поєднанню геоботанічних обстежень, GIS-аналізу та дистанційного зондування забезпечується перехід до превентивної моделі реагування.

Превентивні заходи, у свою чергу, демонструють найвищу економічну та екологічну ефективність, оскільки спрямовані на блокування шляхів інтродукції. Вони забезпечують зниження пропагувального тиску і є основою біобезпекового підходу, що відповідає міжнародним практикам (CBD, ЄС). Водночас в Україні їх реалізація ще обмежена недостатньою інституційною узгодженістю.

Біологічні методи контролю є перспективними з точки зору мінімізації хімічного навантаження, проте їх застосування вимагає жорсткої наукової верифікації через ризик нецільових ефектів. Тому вони не можуть

розглядатися як універсальний інструмент, а лише як компонент інтегрованого управління.

Особливе значення має екологічна реабілітація, яка забезпечує довготривалу стабілізацію результатів контролю. Без відновлення фітоценотичної структури екосистеми видалення інвазійного виду має лише тимчасовий ефект, оскільки екологічна ніша залишається відкритою для повторної інвазії.

Нормативно-правові механізми та інституційна координація формують управлінський каркас системи. Порівняно з ЄС, де функціонує повний цикл регулювання (від превенції до управління поширеними видами), українська модель перебуває на стадії формування, хоча вже демонструє тенденцію до систематизації.

Додаткові методи – просторове стримування, санітарні заходи, агротехнічні прийоми, управління гідрологією та ґрунтовим банком насіння – розширюють інструментарій контролю і дозволяють адаптувати його до конкретних екосистемних умов.

Порівняльний аналіз показує, що для територій ПЗФ найбільш результативним є не ізольоване застосування окремих методів, а ієрархічно організована інтегрована система, у якій моніторинг і раннє виявлення забезпечують інформаційну основу, превентивні заходи формують біобезпековий бар'єр, біологічний контроль виконує роль екологічно ощадного інструмента для окремих видів, екологічна реабілітація відновлює стійкість фітоценозів, а нормативно-правові та координаційні механізми створюють інституційну рамку всього процесу. Саме така логіка лежить в основі сучасної європейської моделі управління інвазійними чужорідними видами.

### Перелік посилань

1. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services.. Thematic assessment report on invasive alien species and their control. Bonn: IPBES Secretariat, 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7430682>.
2. Pyšek P., Hulme P.E., Simberloff D., Bacher S., Blackburn T.M., Carlton J.T., Dawson W., Essl F., Foxcroft L.C., Genovesi P., Jeschke J.M., Kühn I., Liebhold A.M., Mandrak N.E., Meyerson L.A., Pauchard A., Pergl J., Roy H.E., Seebens H., Richardson D.M. Scientists' warning on invasive alien species. *Biological Reviews*. 2020. No 95 (6). P. 1511 – 1534. <https://doi.org/10.1111/brv.12627>.
3. Vilà M., Hulme P.E. (Eds.). Impact of biological invasions on ecosystem services. Berlin: Springer, 2017. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-45121-3>.
4. Simberloff D. Invasive species: What everyone needs to know. Oxford: Oxford University Press, 2013. <https://doi.org/10.1093/wentk/9780199922015.001.0001>.
5. Convention on Biological Diversity. Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework. Montreal: CBD Secretariat, 2022. URL: <https://www.cbd.int/gbf>.
6. Convention on Biological Diversity. Guiding principles for the prevention, introduction and mitigation of impacts of alien species that threaten ecosystems, habitats or species (Decision VI/23). Montreal: CBD Secretariat, 2002. URL: <https://www.cbd.int/decision/cop/?id=7197>.

7. European Parliament & Council of the European Union. Regulation (EU) No 1143/2014 on the prevention and management of the introduction and spread of invasive alien species. *Official Journal of the European Union*. 2014. L317. P. 35–55. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/1143/oj>.
8. Foxcroft L.C., Pyšek P., Richardson D.M., Genovesi P. (Eds.). Plant invasions in protected areas. Dordrecht: Springer, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7750-7>.
9. Richardson D.M., Pyšek P. Plant invasions: merging the concepts of species invasiveness and community invasibility. *Progress in Physical Geography*. 2006. No 30 (3). P. 409 – 431. <https://doi.org/10.1191/0309133306pp490pr>.
10. Lockwood J.L., Hoopes M.F., Marchetti M.P. Invasion ecology (2nd ed.). Oxford: Wiley-Blackwell, 2013. <https://doi.org/10.1002/9781118570829>.
11. Hulme P.E. Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization. *Journal of Applied Ecology*. 2009. No 46(1). P. 10 – 18. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01600.x>.
12. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Методичні рекомендації щодо оцінки наявного і потенційного впливу (ризиків) інвазійних чужорідних видів (Наказ № 290 від 15.03.2024). Київ, 2024.
13. Кабінет Міністрів України. Про затвердження Порядку здійснення моніторингу біологічного та ландшафтного різноманіття (Постанова № 45 від 17.01.2025). *Офіційний вісник України*. 2025. № 9. С. 112 – 128.
14. Council of Europe. Guidelines for protected areas managers on invasive alien species management. Strasbourg: Council of Europe Publishing, 2018. <https://rm.coe.int/16808b6a0b>.
15. McNeely J.A., Mooney H.A., Neville L.E., Schei P., Waage J.K. A global strategy on invasive alien species. Gland: IUCN, 2001. <https://portals.iucn.org/library/node/7615>.

## **ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РЕКРЕАЦІЙНІ РЕСУРСИ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ**

**С.П. Нагасєва, к.геогр.н., доц.**

*Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м.Одеса, Україна*  
angelsvet715@gmail.com

Рекреаційно-туристичний комплекс Миколаївської області є унікальним поєднанням морських, лиманних, річкових, степових та заповідних ландшафтів. Приморські зони Коблеве-Очаків, долина Південного Бугу, території Національного природного парку «Бузький Гард», заповідні об'єкти Степового Побужжя та узбережжя Чорного моря формують значний природно-рекреаційний потенціал для відпочинку, оздоровлення та туризму.

Проте інтенсивна промислово-транспортна діяльність в Миколаївській області, сільськогосподарське навантаження на центральні її райони, деградація природних екосистем внаслідок бойових дій, починаючи з 2022 р., а також нерівномірність інфраструктурного розвитку істотно впливають на екологічний стан території та рекреаційну цінність регіону.

Раціональне використання та управління рекреаційними ресурсами потребує визначення рівня техногенного навантаження та його просторової

неоднорідності. Це дає змогу оцінити екологічну стійкість природних комплексів, ідентифікувати території підвищеного ризику і визначити пріоритетні напрями екологічної політики у сфері сталого розвитку туризму та рекреації.

Оцінка техногенного впливу на стан довкілля та на рекреаційні ресурси Миколаївської області виконувалась за бальною методикою О.О. Бейдика [1].

Для оцінки техногенного навантаження на рекреаційні ресурси Миколаївської області використані показники, які найбільш повно відображають стан атмосферного повітря, водних ресурсів, структуру відходів, демографічного тиску для збереженості ландшафтів, а саме:

- щільність викидів забруднюючих речовин в атмосферу від стаціонарних та пересувних джерел по містах і районах області (т на 1 км<sup>2</sup>);
- обсяг забруднюючих речовин, що скидаються в річки, т/рік;
- кількість відходів, т;
- щільність населення на 1 км<sup>2</sup>.

У роботі використані матеріали «Регіональної доповіді про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області» та «Екологічного паспорту» за 2024 рік для чотирьох районів області [2, 3].

Для формування інтегральної оцінки стану атмосферного повітря для районів було застосовано бальну систему, яка ґрунтується на показнику щільності викидів забруднюючих речовин (т/км<sup>2</sup>). Чим вища щільність викидів, тим більший рівень техногенного навантаження та екологічних ризиків для довкілля та рекреаційних ресурсів.

У табл.1 представлена бальна оцінка техногенного навантаження на атмосферне повітря районів Миколаївської області.

Таблиця 1 – Бальна оцінка техногенного навантаження на атмосферне повітря районів Миколаївської області

| Район         | Щільність викидів, т/км <sup>2</sup> | Бали | Рівень навантаження |
|---------------|--------------------------------------|------|---------------------|
| Миколаївський | 0,6                                  | 4    | високий             |
| Первомайський | 0,38                                 | 3    | помірний            |
| Вознесенський | 0,1                                  | 2    | низький             |
| Баштанський   | 0,065                                | 1    | дуже низький        |

Так, у Миколаївському районі зареєстровані найбільші викиди в атмосферу та найвища їх щільність – 0,6 т/км<sup>2</sup>, що відповідає високому рівню техногенного навантаження. Найнижчі показники забруднення зареєстровано у Баштанському районі, де відсутні великі промислові об'єкти, а переважним видом господарської діяльності є сільське господарство. Територія зберігає природний характер, що забезпечує



порівняно низькі обсяги викидів. Рівень техногенного навантаження на атмосферне повітря є дуже низьким.

Водні ресурси Миколаївської області перебувають під значним антропогенним впливом, що створюється комунально-побутовими та промисловими стоками у межах міських агломерацій.

Скидання неочищених та недостатньо очищених стічних вод є одним із основних джерел техногенного навантаження на водні екосистеми Миколаївської області. Через недостатню ефективність очисних споруд, аварійні скиди та перевантаження комунальних систем у водні об'єкти області щороку потрапляють значні обсяги стоків з високим вмістом забруднюючих речовин.

У табл. 2 представлена бальна оцінка рівня техногенного навантаження на водні об'єкти Миколаївської області за 2024 р.

Таблиця 2 – Бальна оцінка рівня техногенного навантаження на водні об'єкти Миколаївської області за 2024 р.

| Водний об'єкт      | Середній обсяг скидів, тис. м <sup>3</sup> | Рівень навантаження | Бал |
|--------------------|--------------------------------------------|---------------------|-----|
| р.Південний Буг    | 1211,9                                     | Дуже високий        | 5   |
| р.Інгул            | 496,2                                      | Високий             | 4   |
| р.Інгулець         | 175                                        | Помірний            | 3   |
| Бузький лиман      | 65,3                                       | Помірний            | 3   |
| Березанський лиман | 39,5                                       | Низький             | 2   |
| Ягорлицька затока  | 30,8                                       | Низький             | 2   |
| Бейкушська затока  | 25,6                                       | Дуже низький        | 1   |

Проведена оцінка техногенного навантаження на водні ресурси Миколаївської області дає змогу встановити чіткі територіальні відмінності між районами, що визначають рівень екологічної напруженості та чутливості водних екосистем.

У Миколаївському районі найвищі рівні техногенного навантаження на водні об'єкти. Це пояснюється концентрацією великих обсягів комунально-побутових і промислових стічних вод, які скидаються у річки Південний Буг та Інгул, а також інтенсивним рекреаційним і транспортним навантаженням на Бузький лиман.

Найбільші екологічні ризики геологічному середовищу створюють фільтрації в підземні води.

Щільність населення є одним із вагомих інтегральних індикаторів антропогенного впливу на природне середовище та, відповідно, на рекреаційні ресурси.

Дослідження показали, що Миколаївський район відповідає категорії високого навантаження (4 бали), щільність населення перевищує 67 осіб/км<sup>2</sup>. Вознесенський та Первомайський райони відповідають

категорії помірного навантаження (2 бали), характеризуються щільністю 27 – 36 осіб/км<sup>2</sup>.

В останні роки геологічне середовище Миколаївської області зазнає значного техногенного навантаження, основними чинниками якого є утворення та накопичення промислових, побутових і будівельних відходів (табл. 3). У Миколаївському районі обсяги утворення відходів наближаються до 70 тис. т. Вплив на геологічне середовище проявляється у зростанні ризиків засмічення ґрунтів, формуванні техногенних відвалів.

Таблиця 3 – Оцінка техногенного навантаження на геологічне середовище за обсягами утворення відходів в районах Миколаївської області

| Район                                                         | Стан геологічного середовища                                              | Оцінка, обсяг утворення відходів, тис. т/рік | Рівень навантаження |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------|
| Баштанський (19,4 тис.т/рік), Вознесенський (28,0 тис. т/рік) | Локальні зміни, слабка техногенна трансформація                           | 2 бали - 16 – 30                             | низький             |
| Первомайський (33 тис. т/рік)                                 | Відчутні зміни у структурі ґрунтів та потенційні ризики для підземних вод | 3 бали - 31 – 60                             | помірний            |
| Миколаївський (66,4 тис. т/рік)                               | Стійкі техногенні зміни, ризики деградації та забруднення підземних вод   | 4 бали - 61 – 120                            | високий             |

Узагальнення результатів виконаних досліджень показало просторову неоднорідність розподілу техногенного навантаження на компоненти довкілля та, відповідно, на рекреаційні ресурси Миколаївської області.

*Баштанському району* відповідають найнижчі показники техногенного навантаження (5 балів). Обсяг викидів в атмосферне повітря та обсяги скидів забруднених вод у водні об'єкти є мінімальним, що обумовлено переважно аграрною спеціалізацією району, відсутністю великих промислових підприємств і низькою щільністю населення.

Сучасний стан довкілля дозволяє віднести район до категорії слабо забруднених територій, де природні ландшафти зберігають стійкість і здатність до самовідновлення. Рекреаційні ресурси району зберегли високий природний потенціал, що робить територію перспективною для екологічного туризму, агротуризму та природоохоронних проектів.

Для *Первомайського району* характерний змішаний тип навантаження (10 балів) – поєднання аграрного використання, комунально-побутових джерел та окремих промислових об'єктів. Стан атмосферного повітря та водних ресурсів у межах району переважно стабільний, проте окремі показники свідчать про поступове збільшення навантаження у межах

населених пунктів та на сільськогосподарських ділянках. Рівень утворення відходів відповідає середнім значенням по області.

За сукупністю цих характеристик відноситься до помірно забруднених районів зі стабільними, але чутливими до перевантаження природними комплексами.

*Вознесенський район* характеризується середнім рівнем техногенного навантаження (11 балів). Наявність промислових підприємств, а також зосередження комунальних стічних вод у межах густонаселених громад сприяє збільшенню загального рівня техногенного впливу. Район має вищі за середні показники скиду забруднених стічних вод у водні об'єкти та утворення відходів. При цьому щільність населення залишається помірною, що дещо зменшує загальний бал.

За сукупністю показників відноситься до середньо забруднених районів з необхідністю впровадження природоохоронних заходів.

*Миколаївський район* характеризується максимальним техногенним навантаженням на довкілля (17 балів). Це найбільш урбанізована та індустріально розвинена частина області. Саме тут сконцентровані: потужні промислові комплекси; морські та річкові порти; розгалужені транспортні магістралі; густонаселені території; паливно-енергетичні і машинобудівні підприємства. Це обумовлює найвищі по області показники викидів в атмосферне повітря, обсяги утворення відходів і скидів забруднених вод у водні об'єкти. Особливо важливим чинником є висока щільність населення, що є додатковим навантаженням на рекреаційні ресурси та інженерну інфраструктуру.

Таким чином, район відноситься до категорії територій із сильним техногенним навантаженням, де стан довкілля потребує постійного моніторингу та реалізації комплексних природоохоронних програм.

Виявлена просторово-функціональна диференціація зумовлює необхідність регіональної екологічної політики, яка повина враховувати специфіку кожного району. В районах з підвищеним антропогенним навантаженням пріоритетними напрямами є: зменшення обсягів промислових та транспортних викидів; модернізація систем очищення стічних вод; удосконалення управління промисловими та побутовими відходами; заходи щодо відновлення деградованих природних територій.

Отримані результати є основою для прийняття управлінських рішень, спрямованих на зменшення техногенного навантаження, збереження природних рекреаційних ресурсів та підвищення рекреаційної цінності та привабливості Миколаївської області в цілому.

### **Перелік посилань**

1. Бейдик О.О. Рекреаційно-туристичні ресурси України: методологія та методика аналізу, термінологія, районування. Монографія. Київ, 2001. 395 с.
2. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Миколаївській області у 2024 році. Департамент екології та природних ресурсів

- Миколаївської ОВА. Миколаїв, 2025. 229 с. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/store/files/1758180655.pdf>. (дата звернення: 22.03.2025).
3. Екологічний паспорт Миколаївської області за 2024 рік. Миколаївська обласна державна адміністрація. Миколаїв, 2025. 172 с. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/store/files/1758179681.pdf> (дата звернення: 12.05.2025).

## **РОЗРОБКА ГІДРОЛОГІЧНОЇ МОДЕЛІ БАСЕЙНУ РІЧКИ СИНЮХА ДЛЯ ОЦІНКИ ВОДНИХ РЕСУРСІВ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН ТА ВОЄННИХ ВИКЛИКІВ**

***Ю.О. Наконечна, PhD***

*Технічний Університет Берліну (TU-Berlin), Німеччина  
nakonechnayulya25@gmail.com*

**Вступ.** В умовах сучасних глобальних змін проблема забезпечення водної безпеки набуває особливої актуальності для України. Просторово нерівномірний розподіл водних ресурсів, характерний для території країни, у поєднанні з кліматичними змінами та антропогенним навантаженням формує передумови для виникнення дефіциту води, особливо у південних регіонах. Додатково ситуація ускладнюється наслідками повномасштабної війни, що спричинила порушення гідрологічного режиму, руйнування водогосподарської інфраструктури та обмеження доступу до даних спостережень.

У контексті євроінтеграційних процесів, зокрема імплементації положень Водної рамкової директиви Європейського Союзу, виникає потреба у застосуванні сучасних підходів до оцінки стану водних ресурсів. Одним із ключових інструментів є гідрологічне моделювання, яке дозволяє відтворювати просторово-часову динаміку стоку за умов обмеженої інформації.

Метою даного дослідження є розробка та первинна оцінка гідрологічної моделі басейну р. Синюха (рис. 1) з використанням програмного комплексу STORM.pro, а також визначення основних параметрів, що впливають на результати моделювання.

**Матеріали та методи дослідження.** У рамках дослідження було реалізовано детерміністичну, концептуальну та напіврозподілену гідрологічну модель. Основу моделі складають просторові дані, що характеризують фізико-географічні умови басейну, зокрема:

- цифрова модель рельєфу;
- річкова мережа з морфометричними характеристиками;
- структура суббасейнів;
- ґрунтовий покрив;
- типи землекористування.

Гідравлічні процеси в русловій мережі описано за допомогою моделі Калініна-Мілюкова, яка дозволяє врахувати трансформацію паводкових

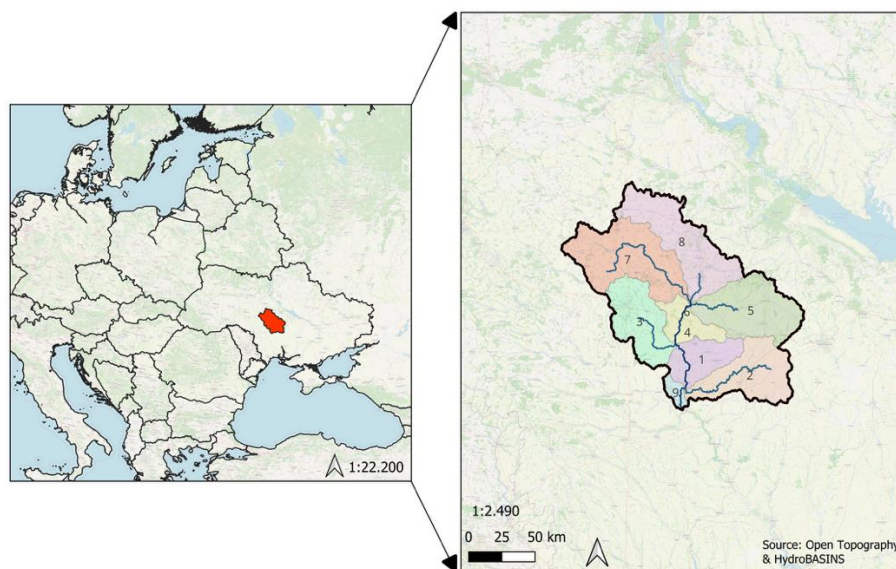


Рисунок 1 – Басейн р. Синюха

хвиль у руслі. Для моделювання формування стоку на водозборі використано комбінацію функцій відгуку басейну, зокрема:

- лінійну резервуарну модель для опису природних поверхонь;
- модель Неша для непроникних поверхонь;
- функцію «час-площа» для врахування просторового розподілу стоку.

Вхідні метеорологічні дані включали добові значення опадів, температури повітря та потенційної евапотранспірації за 2023 – 2024 роки.

Для оцінки працездатності моделі було проведено два типи чисельних експериментів:

1. безперервне моделювання стоку за 2024 рік;
2. моделювання екстремальної гідрометеорологічної події – інтенсивного дощу 1 серпня 2023 року.

Оцінка достовірності результатів здійснювалася шляхом порівняння з:

- довідковими значеннями середньорічного стоку;
- результатами моделювання за допомогою LISFLOOD;
- гідрографами річок-аналогів (Тетерів та Самара).

Окремим етапом дослідження став аналіз чутливості параметрів моделі, спрямований на визначення найбільш впливових факторів калібрування.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Результати моделювання свідчать про загальну здатність розробленої моделі адекватно відтворювати гідрологічний режим басейну р. Синюха. Середньорічне значення витрати води, отримане за результатами моделювання ( $57,13 \text{ м}^3/\text{с}$ ), перевищує довідкове значення ( $29,4 \text{ м}^3/\text{с}$ ), що вказує на систематичну переоцінку стоку.

Водночас модель демонструє задовільне відтворення сезонної мінливості стоку. Зокрема, коректно відображено:

- підвищення витрат води у зимово-весняний період;
- поступове зменшення стоку в літній період;
- характерні особливості маловодних фаз.

Порівняння з результатами моделі LISFLOOD показало, що розроблена модель краще відображає сезонні коливання, однак поступається у точності абсолютних значень витрат (рис. 2).

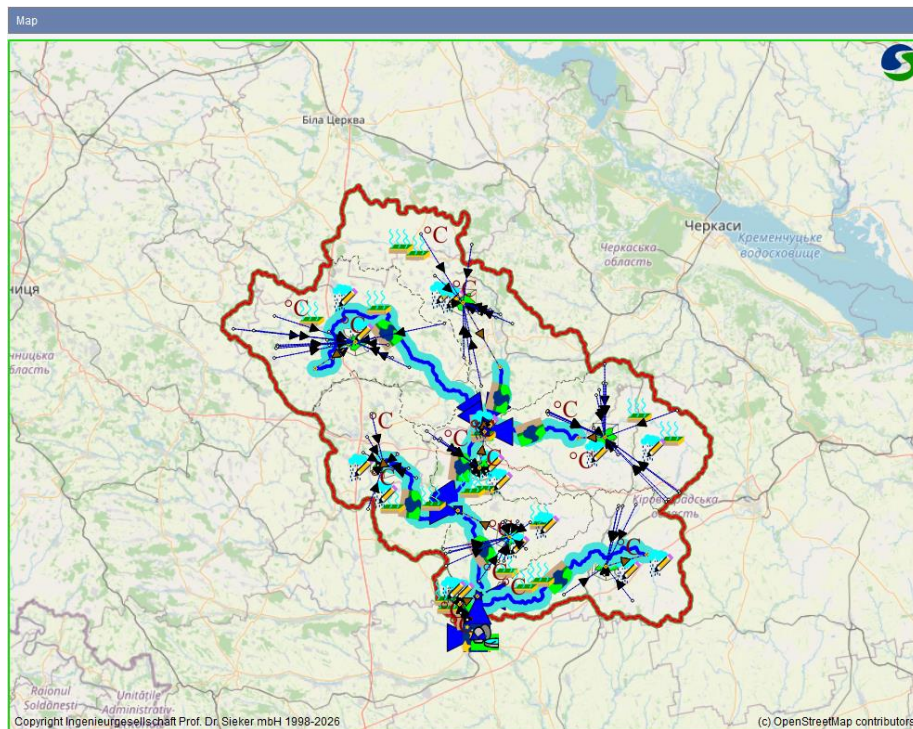


Рисунок 2 – Створення русел річок та сполучних каналів

Виявлені розбіжності пояснюються низкою обмежень моделі, серед яких:

- неврахування процесів накопичення та танення снігу;
- відсутність моделювання взаємодії з підземними водами;
- ігнорування впливу водогосподарських та гідротехнічних споруд;
- спрощене представлення деяких функцій відгуку.

Результати аналізу чутливості показали, що найбільший вплив на результати моделювання мають:

- кількість резервуарів у моделі Калініна-Мілюкова;
- коефіцієнти акумуляції (storage constants) для різних компонентів стоку (базового, міжшарового, поверхневого);
- параметри перехоплення опадів рослинністю.

Менш значущими виявилися параметри, пов'язані з моделлю Неша для непроникних поверхонь.



**Висновки та перспективи подальших досліджень.** У результаті виконаного дослідження розроблено первинну гідрологічну модель басейну р. Синюха, яка забезпечує відтворення основних закономірностей формування стоку та може бути використана як основа для подальшого вдосконалення.

Попри наявність систематичної переоцінки витрат води, модель демонструє адекватне відображення сезонної динаміки та реакції на гідрометеорологічні події, що свідчить про її потенційну придатність для практичного застосування.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на:

- удосконалення структури моделі шляхом включення снігових процесів та підземного стоку;
- уточнення параметрів функцій відгуку басейну;
- проведення повноцінного калібрування та валідації за наявності спостережних даних;
- оцінку впливу змін клімату та антропогенних факторів на водні ресурси басейну.

Таким чином, запропонований підхід створює наукове підґрунтя для подальших досліджень, спрямованих на забезпечення водної безпеки та розробку адаптаційних заходів в умовах зростаючих кліматичних і соціально-економічних викликів.

## **USING MACHINE LEARNING APPROACHES TO INVESTIGATE AND PREDICT THE FINE PARTICULATE MATTER (PM<sub>2.5</sub>) IN MONCTON CITY, NEW BRUNSWICK, CANADA**

***Nhi Nguyen Hoang Tuyet*<sup>1,2</sup>, *Tri Nguyen-Quang*<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*University of Technology (HCMUT), National University Ho Chi Minh City, Vietnam*

<sup>2</sup>*Dalhousie University, Canada.  
tri.nguyen-quang@dal.ca*

**Introduction.** Clean air is essential for healthy life, which makes air quality a growing concern worldwide, a critical environmental issue that has been gaining well-deserved spotlight in the last few years: PM<sub>2.5</sub> – Particulate matter of a diameter smaller than 2.5 significantly determines air quality [1]. This project aims to estimate and forecast PM<sub>2.5</sub> concentration in Moncton of New Brunswick (NB) by machine learning (ML) models with multi-source remote sensing data. From the ML results, the root causes and the spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> can be identified as well as health risks and regional impacts, which will provide a scientific foundation for local governments to implement targeted air-quality management and community health strategies. In Canada, PM<sub>2.5</sub> pollution is estimated to contribute to 10,000 premature deaths in 2016 and 110 in NB. The

total monetary value of health outcomes associated with air pollution is approximately 120 billion CAD per year [2].

The project aims to estimate and model PM<sub>2.5</sub> concentrations by integrating remote sensing data (MODIS), ground-based air-quality measurements, and meteorological parameters including air temperature (temp), relative humidity (rh), wind direction (wd), wind speed (ws), surface pressure (press), and visibility – as well as population. By combining these variables through ML models including Decision Tree (DT), Random Forest (RF), Gradient Boosting (GB) and Artificial Neural Network (ANN), the study aims to accurately estimate ground-level PM<sub>2.5</sub> concentrations and analyze their spatial-temporal variations.

### **Methodology.**

**Study area.** The study focuses on the city of Moncton (Figure 1a), one of the major urban centers in NB, Canada. However, to ensure sufficient spatial coverage and improve the robustness of model training and validation, the analysis is conducted over the entire province of NB. Using a province-wide grid allows the integration of data from multiple monitoring stations, thereby enhancing the representativeness and generalization capability of the ML models. According to hourly monitoring data from the Air Quality Data Portal of the Department of Environment and Local Government (DELG) [3], PM<sub>2.5</sub> concentrations in NB average 3.77 µg/m<sup>3</sup> during fire-free periods, ranging from 1.92 to 8.82 µg/m<sup>3</sup>. However, during the wildfire season from June to October 2025, PM<sub>2.5</sub> levels increased significantly, with an average concentration of 6.2 µg/m<sup>3</sup> (ranging from 2.3 to 12.72 µg/m<sup>3</sup>). Several days recorded substantial increases in daily (24-hour) mean PM<sub>2.5</sub> concentrations, frequently exceeding 40 µg/m<sup>3</sup>.

**Data collection and procedure research.** The study follows an integrated methodological framework (Figure 1b) that combines satellite remote sensing data and in-situ observations to estimate PM<sub>2.5</sub> concentrations. The workflow involves data collection, preprocessing and feature selection, followed by the development and validation of machine learning models. The resulting estimates are then used to generate spatial distributions of PM<sub>2.5</sub> concentrations across the study area. The accompanying map presents the distribution of air quality monitoring stations and population across New Brunswick (NB), with a particular focus on Moncton as the primary study area.

### **Results and Discussion.**

**Analysis PM<sub>2.5</sub> concentration data in NB in 2025:** PM<sub>2.5</sub> concentrations in NB remained low during most of the year, generally below the WHO 24-hour guideline (15 µg/m<sup>3</sup>). A clear seasonal pattern is observed, with pronounced increases during summer, particularly from June to August. Several short-term peaks exceeded 25 – 40 µg/m<sup>3</sup> across all air zones. Spatially, the Northern Air Zone experienced the highest and most abrupt PM<sub>2.5</sub> spikes, the Central and Southern Air Zones showed moderate exceedances.



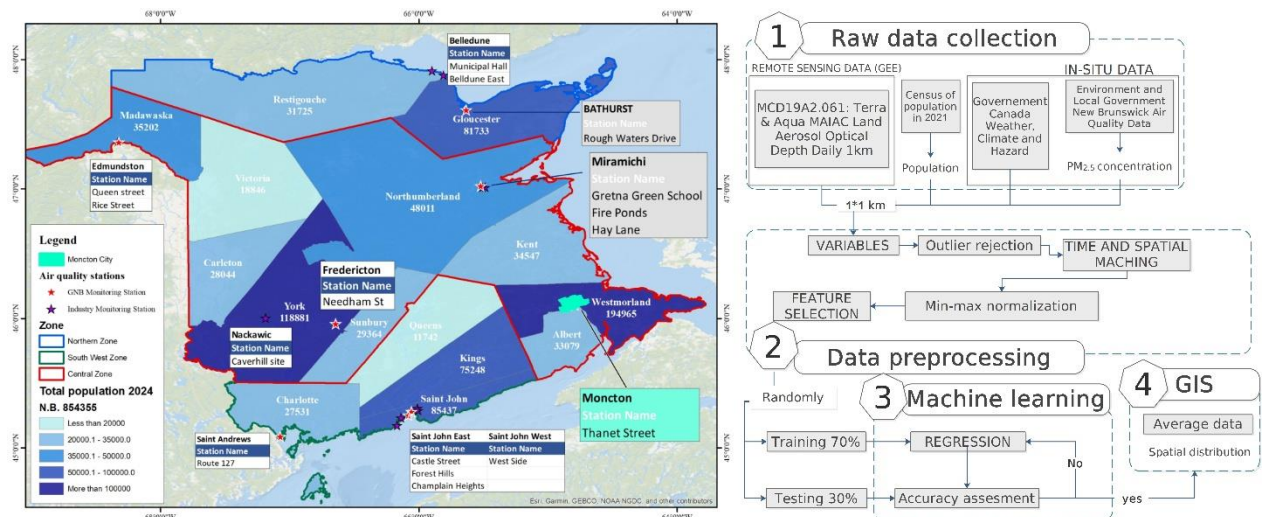


Figure 1 – (a) Study area; (b) The flowchart of the approach to estimate  $PM_{2.5}$

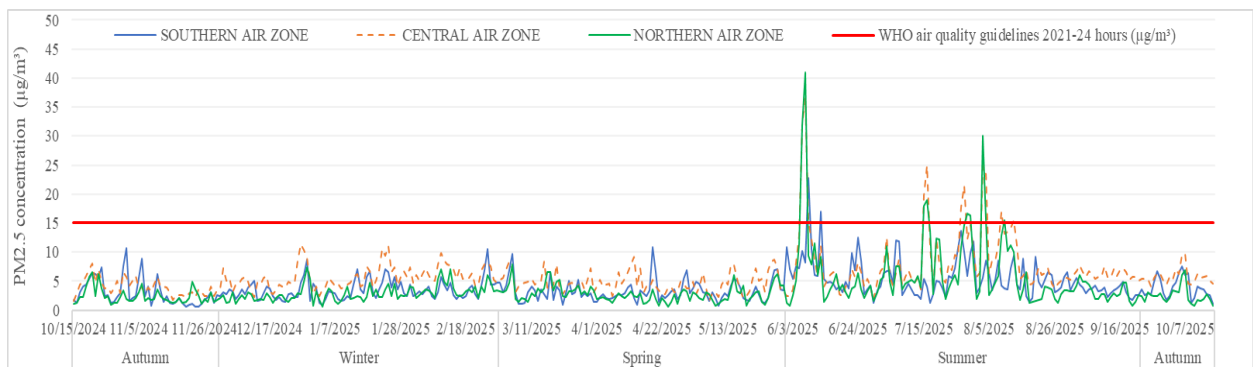


Figure 2 – Daily  $PM_{2.5}$  concentrations across the Northern, Central, and Southern Air Zones of New Brunswick (October 2024 – October 2025)

**Model  $PM_{2.5}$  concentration comparison.** The performance of four ML models (DT, RF, GB, and ANN) was evaluated for  $PM_{2.5}$  prediction. DT model showed limited generalization, with  $R^2$  decreasing from 0.635 (training) to 0.394 (testing), indicating overfitting. RF model improved performance, achieving  $R^2$  values of 0.731 (training) and 0.546 (testing). Although the GB model achieved a high training  $R^2$  of 0.88, its test performance dropped to 0.47, suggesting sensitivity to noise and overfitting. In contrast, ANN model demonstrated the most stable performance and achieved the highest predictive accuracy, with an independent validation  $R^2$  of 0.6981 and lower error metrics, confirming its suitability for  $PM_{2.5}$  estimation in this study. ANN was trained using **stochastic gradient descent (SGD)** with a learning rate of **0.003** and a batch size of **32**, optimizing the **mean squared error (MSE)** loss function. Model training was performed iteratively up to **45,000 epochs**.

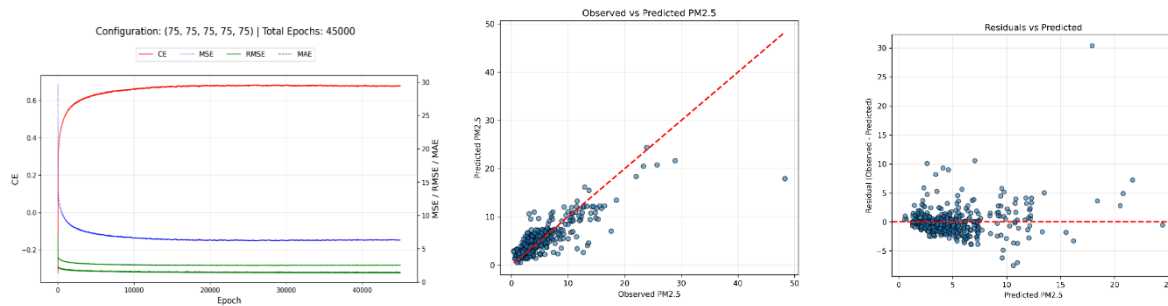


Figure 3 – Performance of the ANN model for PM<sub>2.5</sub> estimation on **TEST data**: a) The cost function (CE) and error metrics (MSE, RMSE, and MAE) over 45,000 epochs; (b) comparison between observed and predicted PM<sub>2.5</sub> concentrations, and (c) residuals predicted PM<sub>2.5</sub> concentrations

**Spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> concentration in 2025.** The annual mean PM<sub>2.5</sub> concentration in Moncton was estimated at 3.19 µg/m<sup>3</sup>, with values ranging from 0 to 6.39 µg/m<sup>3</sup>. Although the annual mean remains below the World Health Organization (WHO) guideline of 5 µg/m<sup>3</sup>, the maximum value exceeds this threshold, indicating that certain periods experience higher pollution levels than recommended. This suggests that while overall air quality is generally acceptable, there are episodic conditions that may pose potential health risks.

At the monthly scale, higher PM<sub>2.5</sub> concentrations were observed in May and from June to October, with peak values frequently exceeding 10 µg/m<sup>3</sup>. These increases are likely associated with summer conditions and the influence of wildfire events, which significantly contribute to short-term air pollution. In contrast, the remaining months showed relatively low PM<sub>2.5</sub> concentrations, typically ranging from 0 to 3 µg/m<sup>3</sup>, reflecting cleaner atmospheric conditions during non-fire seasons.

**Conclusion.** This study demonstrates the effectiveness of ML, particularly ANN model, in estimating and predicting PM<sub>2.5</sub> concentrations in Moncton revealing critical seasonal and spatial patterns linked to wildfire events and meteorological conditions.

### Acknowledgements

The authors acknowledge the program of Canada-ASEAN Scholarships and Educational Exchanges for Development (SEED) for their support.

### References

1. Health Canada, “Infographic: What is fine particulate matter (PM2.5).” Accessed: Oct. 27, 2025. [Online]. Available: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/infographic-fine-particulate-matter.html>
2. Health Canada, “Health Impacts of Air Pollution in Canada: Estimates of morbidity and premature mortality outcomes – 2021 Report,” Fredericton, NB, 2021.
3. Environment and Local Government New Brunswick, “Air Quality Station Locations - Air Quality Data Portal,” New Brunswick. Accessed: Nov. 03, 2025. [Online]. Available: <https://www.elgegl.gnb.ca/AirNB/en/SamplingLocation/Index>

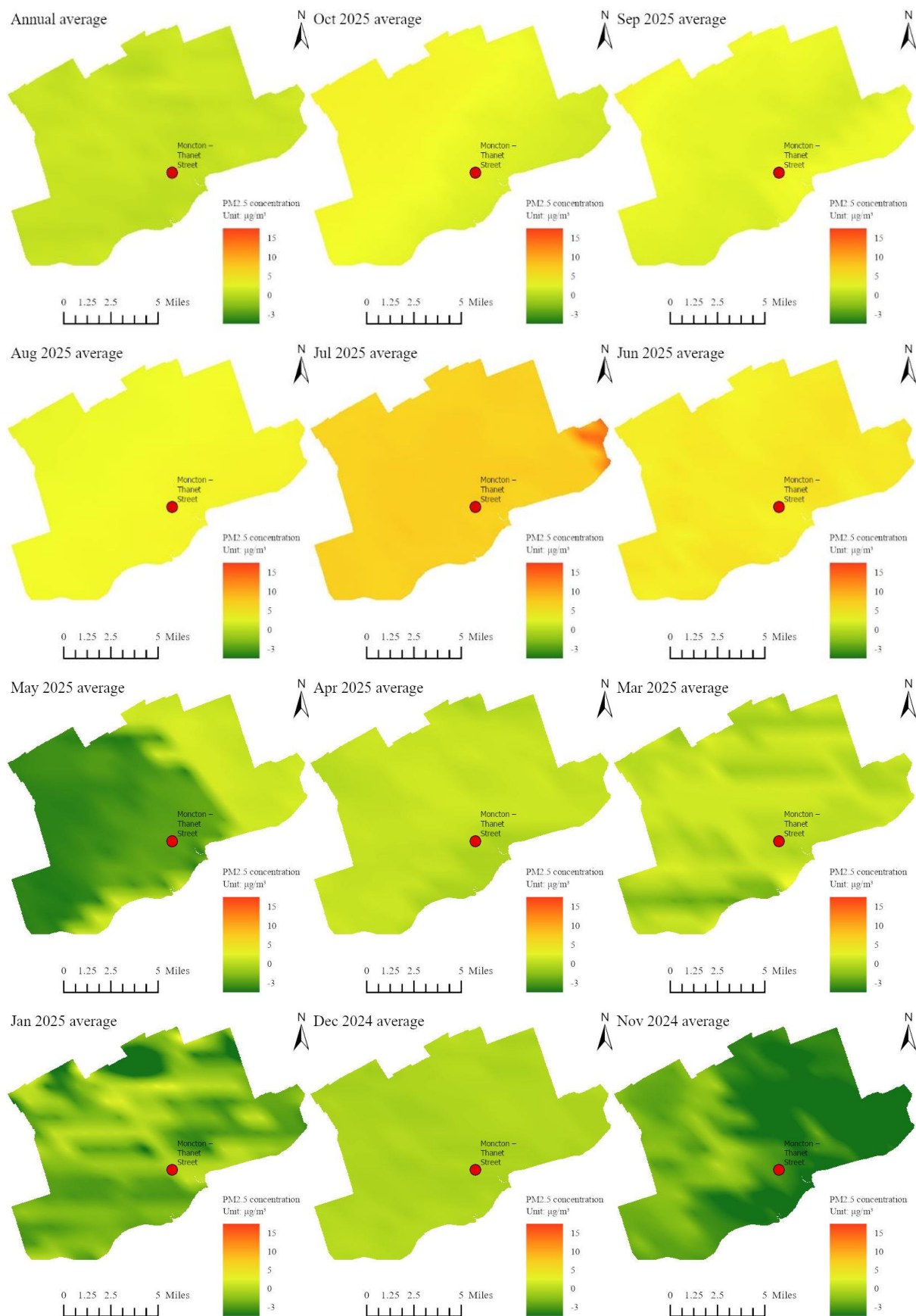


Figure 4 – Spatial distribution of annual and monthly mean  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations in Moncton

## ОСОБЛИВОСТІ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ ПЛАСТИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ В ОДЕСЬКІЙ ОБЛАСТІ

*Т.І. Полушкін, асп., Т.А. Сафранов, д.г.-м.н., проф.*

*Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса,*

*Україна*

*polushkin.timur@gmail.com*

Одним з факторів прогресуючого техногенного навантаження на довкілля регіонів України є зростаючі обсяги утворення та накопичення твердих побутових відходів (ТПВ), що простежується протягом останніх двадцяти років, незважаючи на скорочення населення в регіонах країни. Це створює загрозу екологічній безпеці та здоров'ю населення України. Домінуючим способом поводження з ТПВ залишається їх вивезення та захоронення на полігонах і чисельних сміттєзвалищах (наприклад, у 2011 році це становило 92,4 % від загальної маси). Тому доцільним є необхідність зменшення частки захоронення ТПВ до 30 %, а також впровадження обліку відходів на всіх етапах: від утворення до переробки, утилізації та захоронення [1]. Збільшення обсягів накопичення ТПВ негативно впливає на стан природних складових довкілля, зокрема на геологічне середовище, ґрунтовий покрив, поверхневі водні об'єкти, повітряний басейн, біоту, а також стан здоров'я населення регіонів. З іншого боку, ТПВ мають значний потенціал як джерело вторинних матеріальних і енергетичних ресурсів. Досвід розвинених країн світу показує, що при належному сортуванні ТПВ можна отримати до 20 % вторинних матеріальних ресурсів, придатних для промислової переробки, а також до 35 % органічної складової цих відходів, які можна переробити в компост та отримати біогаз.

Проблема утилізації ресурсоцінних компонентів ТПВ в Одеському регіоні стає все більш актуальною, оскільки обсяги ТПВ постійно зростають, а рівень їх утилізації поки що залишається на низькому рівні. Тому розробка та впровадження ефективної системи управління та поводження з ресурсоцінними компонентами ТПВ є ключовою основою для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку регіонів України, зокрема Одеського регіону.

Проблема поводження з відходами пластикових матеріалів (ВПМ) є актуальною для поліфункціональної території Одеської області, де накопичуються їх значні обсяги. Основними джерелами утворення ВПМ є: 1) відходи житлово-комунального господарства (пластикові пляшки з поліетилентерефталат, поліетиленові пакети і плівка, одноразовий посуд, упаковка від продуктів тощо); 2) супермаркети, ринки, кафе, ресторани, готелі (пластикові упаковка, пляшки, плівка, контейнери від продуктів тощо); 3) об'єкти харчової, хімічної та інших галузей промисловості

(обрізки, тара, плівка), а також підприємства виробництва гумових та пластикових виробів); 4) будівельні об'єкти (плівка, пластикові вироби тощо).

Основна частка ВПМ потрапляє на полігони та чисельні звалища ТПВ (у т.ч. на несанкціоновані звалища).

Система збору ВПМ в Одесі і Одеській області змішана, що ускладнює їх переробку. Значна частка ВПМ в Одесі потрапляє в контейнери ТПВ, які вивозять на полігон «Дальницькі кар'єри». Роздільний збір ТПВ здійснюється лише в окремих районах міста, де компанією «Вторма» розміщені контейнери (у т.ч. жовтого кольору для ВПМ). З ініціативи об'єднань співвласників багатоквартирних будинків (ОСББ), громадських організацій здійснюється збір кришок (HDPE № 2), а окремі компанії («Вторресурси», «Ecolos») здійснюють вивіз ВПМ. Значну частку ВПМ збирають пункти прийому вторинної сировини та волонтери. У 2025 р. Одеська міська рада запустила пілотний проєкт з роздільного збору. В цілому система сортування та збору ВПМ функціонує недостатньо ефективно.

Переробка та утилізація ВПМ в Одеському регіоні існує, але можливості обмежені з урахуванням обсягів утворення та накопичення. В основному переробляються: PETE-пляшки, HDPE, LDPE, PP (пакети, каністри, кришечки). Поводження з ними здійснюється за схемою: сортування → подрібнення → миття → сушіння → гранулювання або виробництво флексів (флаксів). Приватні компанії (ТОВ «ЕкоГрінТрейд», «Вторма» в Одесі) приймають лом пластику, флакони, каністри, а компанія «Ecolos» здійснює прийом по всій області. Невелика майстерня «Precious Plastic Ukraine» в Одесі переробляє кришечки і тару в корисні вироби (друга майстерня такого типу в Україні). Існуюча інфраструктура представлена сміттесортувальними лініями, але їх потужність низька, а об'єкти переробки вторинної сировини переважно приватні.

Перероблені ВПМ (флекси, гранули, флакс) реалізуються на внутрішньому ринку для виробництва нових виробів (пакети, труби, тара, будівельні матеріали), а також експортується в ЄС (особливо ПЕТ-флекси). Деякі компанії-переробники («ЕкоГрінТрейд») купують сировину за ринковими цінами та реалізують готову продукцію.

Основні проблеми поводження з ВПМ в регіоні: 1) низький рівень сортування та збирання; 2) недостатня кількість контейнерів для роздільного збору відходів; 3) недостатні можливості сортувальних ліній; 4) висока вартість сучасного обладнання, низька рентабельність без державної підтримки; 5) військовий стан та регіональні особливості (вплив на логістику, хоча Одеса продовжує розвивати систему поводження); 6) недостатній рівень виконання вимог нормативно-законодавчих



документів; 7) лише мала частина пластикової упаковки переробляється (наприклад, у 2019 – 6,1 %, у 2024 ще нижче).

Територія Одеської області, яка характеризується високим рівнем антропогенного навантаження, стикається з накопиченням значних обсягів ВПМ, які утворюються в житлово-комунальному комплексі, на об'єктах промислового, аграрного та будівельного комплексів, а також за рахунок використаної тари та упаковки. Значна частка утворення ВПМ припадає на ТПВ житлово-господарського комплексу Одеської області.

За даними «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року» [2] на території Одеської області щороку утворюється 724467,05 т ТПВ, які нерівномірно розподілені по окреслених кластерах поводження з ТПВ: *I кластер* (північні райони області) – 6498,89; *II кластер* (північно-східні райони області) – 57484,87 т; *III кластер* (райони, що прилеглі до Одеської промислово-міської агломерації) – 473885,38 т; *IV кластер* (західні райони області) – 69771,17 т; *V кластер* (південно-західні райони області) – 70312,46 т (табл. 1).

Таблиця 1 – Обсяги утворення відходів пластикових матеріалів на території Одеської області, т/рік [2]

| Кластер | Відходи пластикових матеріалів |                        |                       |                           |
|---------|--------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|
|         | Всього                         | РЕТЕ (тара для напоїв) | LDPE (плівка, пакети) | Інші види (PEHD, PVC, PS) |
| I       | 6498,89                        | 2277,76                | 2341,80               | 1879,33                   |
| II      | 5507,01                        | 1924,12                | 2020,06               | 1562,85                   |
| III     | 60356,33                       | 18509,17               | 22572,27              | 19301,65                  |
| IV      | 2562,45                        | 2562,45                | 2682,48               | 2085,94                   |
| V       | 8367,25                        | 2937,77                | 2984,31               | 230822,10                 |
| Всього  | 83291,93                       | 28211,27               | 32600,9247            | 24911,87                  |

Як бачимо, основна частка утворення ТПВ припадає на III кластер, який охоплює територію Одеської промислово-міської агломерації та прилеглі райони, де зосереджена основна частка населення.

Після ухвалення «Регіонального плану управління відходами в Одеській області до 2030 року» [2] очікується модернізація поводження з ТПВ, зокрема з ВПМ.

### Перелік посилань

1. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>.
2. Регіональний план управління відходами в Одеській області до 2030 року. URL: <https://ecology.od.gov.ua/regionalnyj-plan-upravlinnya-vidhodamy-v-odeskij-oblasti-do-2030-roku/>.

## ГІДРОЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ БУРШТИНСЬКОЇ ТЕС

**Т.Л. Ричак, асп.**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
м. Івано-Франківськ, Україна  
taras\_rychak@ukr.net*

Сучасний етап розвитку енергетики України визначається глибокими трансформаційними процесами, серед яких домінують регіоналізація та інтенсифікація ресурсокористування. У зонах безпосереднього впливу енергетичних підприємств спостерігається системна техногенна трансформація екологічного стану, що супроводжується певним відхиленням показників середовища від екологічного оптимуму. Тривале домінування галузевого підходу до планування природокористування без належного екологічного обґрунтування зумовило формування територій зі стійким техногенним навантаженням. Бурштинська ТЕС, як один із ключових вузлів енергосистеми України, потребує стратегічної трансформації: переходу від економічної моделі до еколого-орієнтованої парадигми розвитку в межах концепції сталого розвитку.

Практична реалізація такого переходу потребує аудиту стану водних ресурсів підприємства. Бурштинське водосховище, як складний природно-техногенний об'єкт у басейні р. Гнила Липа, демонструє специфічну динаміку трансформації якості води, що була підтверджена статистичним аналізом за останні 30 років. Результати попереднього просторово-часового аналізу природно-техногенної системи «ТЕС – водосховище – р. Гнила Липа» свідчать про вибірковий характер накопичення поллютантів. Встановлено, що попри атмосферне навантаження, концентрації *Zn*, *Co*, *Mn* та *Cr* у водній фазі залишаються на рівні слідових значень, увагу привертає динаміка вмісту *Fe* та *Cd*, рівні яких досягають 0,5 – 1,0 ГДК [1]. Такий стан системи є екологічно значущим з огляду на різні механізми їхнього впливу

Воєнні дії 2022 – 2025 рр. додали новий, катастрофічний вектор впливу на довкілля. Обстріли енергетичної інфраструктури призвели до прямого потрапляння паливно-мастильних матеріалів та уламків ракет у Бурштинське водосховище. Серед основних наслідків ракетних ударів слід відмітити вуглеводневе забруднення. Рівень нафтопродуктів у воді після однієї атаки перевищив нормативи у 54,5 разів. У водах водосховища виявлено значний вміст кадмію та заліза, що потрапили у воду разом із мастильними матеріалами [2].

Результати досліджень стану донних відкладів гідросистеми «р. Гнила Липа – Бурштинське водосховище – р. Дністер» (2025 р.) засвідчили специфічний характер розподілу важких металів у системі «вода – донні відклади». Встановлено, що тривале гідрохімічне навантаження зумовило

стійку трансформацію якості водного середовища. Донні відклади демонструють високу акумуляційну здатність щодо токсикантів, виступаючи репрезентативним індикатором кумулятивного екологічного ризику. На це вказують отримані результати, які інтерпретовані у роботі [3]. При зіставленні показників якості поверхневих вод та відкладів підтверджено, що при відносно низьких концентраціях металів у воді донні відклади активно депонують *Fe* та *Cd*, досягаючи низьких та частково помірних рівнів накопичення. Функція донних відкладів зумовлює необхідність інтегрованого оцінювання стану седиментів та водної фази для прогнозування екологічних ризиків у гідросистемі.

Для верифікації реальної небезпеки накопичених токсикантів було проведено поглиблене вивчення екологічної складової гідрологічних змін. Програма досліджень охоплювала визначення еколого-токсикологічних та мікробіологічних показників. Результати біотестування у водоймі-охолоджувачі із використанням тест-об'єкта *Ceriodaphnia affinis* засвідчили наявність хронічної токсичності у 50 % відібраних проб і продемонстрували хронічну токсичність та низькі показники якості (2-й клас якості, «слабко забруднена»), зафіксовані біля правого берега водосховища; відносно якісна вода (1-й клас) спостерігається на лівому березі та в місці впадіння р. Гнила Липа у водосховище [3]. Різниця в показниках якості води в різних частинах водойми підтверджує нерівномірність техногенного тиску та необхідність збільшення кількості контрольних створів для постійного моніторингу.

Оцінка мікробного забруднення є критично важливою для визначення безпеки рекреаційного водокористування та збереження біорізноманіття систем. В результаті проведеного дослідження були отримані результати, інтерпретацію яких детально надано у [5]. Аналіз гідрологічних наслідків виявив і екологічні ризики: висока концентрація коліформних бактерій у зоні впливу ТЕС є сигналом порушення процесів природного самоочищення водойми, що може бути спричинено комплексною дією техногенних чинників (теплого забруднення, зміни гідрологічного режиму).

Комплексний аналіз та інтерпретація отриманих даних щодо впливу Бурштинської ТЕС на стан гідроекосистем дали підстави для наступних узагальнень:

1. Багаторічний моніторинг (понад 30 років) свідчить про формування стійкої динамічної рівноваги у системі «р. Гнила Липа – водосховище – р. Дністер». Високий природний потенціал до саморегуляції забезпечує ефективне розсіювання техногенних речовин, що зумовлює низьку швидкість змін якісних показників води.

2. Результати біотестування та мікробіологічного аналізу виявили виражену локалізацію техногенного пресингу. Лівобережна частина водосховища та гирло р. Гнила Липа стабільно зберігають статус «чистих вод» (I клас якості), тоді як зони з вищим навантаженням (правий берег) відповідають категорії «слабко забруднених» (II клас).



3. Встановлено, що донні відклади виступають ефективним сорбційним бар'єром, який депонує важкі метали. Це знижує токсичне навантаження на водну фазу, забезпечуючи сприятливі умови для функціонування гідробіонтів. Поступове зниження ІЗД (до 0,3 – 0,9) у напрямку р. Дністер підтверджує інтенсивність процесів природного самоочищення.

4. Дослідження наслідків подій 2022 – 2025 рр. підтвердило екосистемну адаптивність до екстремальних навантажень. Попри значні одноразові скиди вуглеводнів, висока кратність розбавлення та відновлювальний потенціал екосистеми дозволили нівелювати пікові навантаження та повернути показники до фонових значень.

5. Поточний стан гідроекосистеми характеризується як контрольований та стабільний. Це створює надійне підґрунтя для переходу від кризового менеджменту до планової оптимізації в межах еколого-економічної моделі сталого розвитку промислового вузла.

### Перелік посилань

1. Rychak T., Arkhypova L., Kizilova N., Vnukova N., Rychak N. Patterns of changes in hydrochemical parameters of surface water massifs in the area of influence of a thermoelectric power station. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2025. 26 (8). P. 187 – 202. DOI: [10.12912/27197050/207533](https://doi.org/10.12912/27197050/207533).
2. Rychak T., Arkhypova L. Environmental assessment of the impact of hydrocarbon pollution on the condition of cooling ponds. *Ecological Safety and Balanced Use of Resources*. 2025. 16 (1). P. 9 – 18. DOI: [10.63341/esbur/1.2025.09](https://doi.org/10.63341/esbur/1.2025.09).
3. Ричак Т.Л., Архипова Л.М. Донні відклади як інформаційний показник потенційного екологічного ризику техногенного навантаження на водний об'єкт. *Молодіжний екогеофорум – 2025: матер. регіон. конф.* Івано-Франківськ: Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу., 2025. С. 69 – 71.
4. Ричак Т.Л., Архипова Л.М. Еколого-токсикологічна оцінка якості води водойми-охолоджувача Бурштинської ТЕС. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2024. Вип. 30. С. 91 – 104. DOI: [10.26565/1992-4259-2024-30-07](https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-07).
5. Ричак Т.Л. Практичні аспекти оцінки якості водних об'єктів за мікробіологічними показниками. *Зб. наук. пр. Міжнародної Карпатської Школи: осіння сесія (25 вересня 2025 р): друге видання*. Яремче-Косів: Наукове товариство імені Шевченка, 2025. С. 147 – 150.

## **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ ЗА РАХУНОК ПЕРЕМІШУВАННЯ РАДІАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ РЕЧОВИН**

***Я.В. Романько, к.т.н доц., А.Г. Мєшкова, ст. викл.***

*Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро,  
Україна*

*yaroslav.romanko2014@gmail.com*

У процесі виробничої діяльності на об'єктах ядерної енергетики, виведення їх з експлуатації та при аваріях на них має місце забруднення радіонуклідами речовин, з яких складаються всі об'єкти навколишнього середовища. Зокрема, при аваріях на АЕС з викидом в навколишнє середовище радіонуклідів створюються зони, в яких знаходиться велика кількість забруднених радіонуклідами житлових, адміністративних та промислових будівель і споруд, транспортних засобів, технологічного обладнання і техніки, які використовувались при ліквідації наслідків аварій, тощо.

Для того, щоб повернути в господарський обіг забруднені радіонуклідами речовини, необхідно створити умови, при яких люди будуть захищені від шкідливих наслідків впливу цих зовнішніх джерел іонізуючого випромінювання.

Одним із основних принципів побудови радіаційної безпеки та протирадіаційного захисту, зокрема, в умовах пізньої фази комунальної радіаційної аварії, згідно з [1] є застосування протирадіаційних заходів для обмеження індивідуальної дози опромінювання. Одним з базових контрзаходів є дезактивація територій, будівель та споруд шляхом видалення радіонуклідів, що забруднюють їх поверхню.

Потрібно мати на увазі, що наявність радіоактивного ізотопу в середовищі перебування людей не завжди означає наявність небезпеки для них. Радіонукліди відрізняються один від одного видами іонізуючого випромінювання та рівнями його енергії. Крім того, однакова активність різних радіоактивних елементів не означає один і той же рівень їхньої небезпеки.

Відомі методи знезараження забруднених радіонуклідами речовин характеризуються невисокою ефективністю.

Взагалі проводити дезактиваційні роботи не завжди доцільно і можливо. При цьому не має ніякого сенсу виводити із зони перебування людей радіонукліди, які при будь-яких умовах не спричинять загрози здоров'ю людей. До того ж, дезактивація є складним та економічно затратним заходом, при виконанні якого створюються нові радіоактивні відходи.

Співробітниками УДУНТ пропонується підхід, який дозволяє повернути в промислове виробництво в якості вторинної сировини

речовини, з яких складаються забруднені радіонуклідами техногенні об'єкти.

Основою підходу, який викладений у [2], є властивість природи до внутрішнього протирадіаційного самозахисту, оскільки закони, яким підпорядковується її існування, усувають вплив на людину такого небезпечного фактору як іонізуюча радіація. Зокрема, використовуються такі природні явища як перемішування речовин, з яких складається середовище перебування людини та поглинання іонізуючого випромінювання при його поширенні в цьому середовищі.

Наочною ілюстрацією здатності природи до самозахисту є сам факт існування життя на Землі, в усіх сферах якої (літосфері, гідросфері, атмосфері та біосфері) міститься велика кількість радіонуклідів. Якби не було поглинання гамма-випромінювання в їхній речовині та її перемішування, то під дією критично високого рівня радіації, створеного всіма цими елементарними випромінювачами, людина, що знаходиться на земній поверхні, не змогла б вижити.

Повернення в господарський обіг речовин, з яких створені будівлі та споруди, із забрудненою радіонуклідами поверхнею, можливе шляхом їх демонтажу з подальшим подрібненням їх матеріалів до розмірів щебню та перемішуванням. Принципова можливість реалізації такого способу забезпечується перетворенням поверхневого забруднення цих об'єктів в об'ємне з рівномірним розподілом радіонуклідів по всьому об'єму створеного при подрібненні матеріалу. Таким самим залишається цей розподіл і у виробах, виготовлених з цієї сировини.

Радіонукліди, що знаходяться в об'ємі отриманої продукції, представляють собою елементарні ізотропні джерела іонізуючого випромінювання різних видів. Альфа і бета-випромінювання практично повністю поглинаються в її об'ємі. За межі виробів, виготовлених з цієї сировини, виходить гамма-випромінювання лише тих радіонуклідів, які знаходяться в поверхневому шарі перемішаної речовини товщиною декілька сантиметрів. В результаті істотно зменшується рівень іонізуючого випромінювання з поверхні виготовленої продукції в порівнянні з тим, яким він був до перемішування.

Для забезпечення радіаційної безпеки вихідної продукції кількість гамма-випромінюючих радіонуклідів, яка може бути в об'ємі готової продукції, не повинна перевищувати допустимого значення. Вона визначається заздалегідь і розраховується за методикою, що розроблена в рамках виконаних авторами досліджень.

У багатьох випадках вибір граничного значення потужності ефективної дози, за яким оцінюється радіаційна обстановка, що склалася, залежить від конкретної ситуації існуючого опромінення. Наприклад, в Україні, а також у багатьох інших країнах допустимий рівень потужності поглиненої дози в приміщеннях житлових та промислових будівель встановлюється

відповідно на рівнях 0,26 мкЗв/год. та 0,44 мкЗв/год. з урахуванням природного фону [1]. Директивою 2013/59 EURATOM [3] визначено, що для обладнання, яке має у своєму складі закрите джерело, цей рівень дорівнює 1 мкЗв/год. на відстані 0,1 м від найближчої поверхні. В «Основних санітарних правилах України» [4] встановлено, що тверді матеріали з невідомим радіонуклідним складом та невідомою питомою активністю не відносяться до радіоактивних відходів, якщо потужність поглиненої дози, виміряна на відстані 0,1 м від їхньої поверхні, не перевищує значення 1 мкГр/год.

Вплив виду розподілу забруднюючих об'єктів радіонуклідами на величину потужності дози випромінювання з його поверхні та відповідні розрахунки наведені у [5].

Таким чином забезпечити радіаційну безпечність джерела іонізуючого випромінювання, що знаходиться за межами організму опромінюваної ним людини, можна не тільки зменшенням кількості радіонуклідів на його поверхні, а й зміною умов поширення до людини іонізуючого випромінювання шляхом перемішування речовини. Оскільки кінцевим результатом цих дій є зменшення потужності ефективної дози опромінення людини, то обидва ці види впливу об'єднуються одним поняттям: «дезактивація».

За своїми наслідками поглинання випромінювання радіонуклідів еквівалентне зменшенню кількості радіонуклідів на випромінюючій поверхні об'єкта, що призводить до зменшення рівня створюваного ним випромінювання та, відповідно, зменшення рівня його небезпеки. Застосування у широкому сенсі єдиного поняття «дезактивація» дозволяє використовувати його з метою отримання єдиної об'єктивної оцінки кількісного внеску різних факторів у сумарну потужність дози зовнішнього опромінення людини, створеної окремим джерелом.

Явище поглинання іонізуючого випромінювання в матеріалі джерела може бути ефективно використано для отримання з об'єктів та матеріалів із забрудненою радіонуклідами поверхнею безпечної у радіаційному відношенні сировини. Для цього достатньо знижувати рівень випромінювання із забрудненою радіонуклідами поверхні об'єкта до рівня природного радіаційного фону.

Отримана маса, що радіаційно безпечна, може бути використана для виготовлення бетонних блоків, проведення бетонних робіт безпосередньо на будівельних майданчиках, греблях, автомобільних та залізничних магістралях.

Найбільш прийнятним способом руйнування будівель і споруд є використання спрямованого вибуху. Досвід застосування цього способу в сучасному будівництві в наш час значний, його застосування досить просте, не вимагає значних матеріальних витрат, використання спеціального складного обладнання, техніки та інструменту. На практиці подрібнення та

перемішування отриманих фрагментів зруйнованих будівель та споруд здійснюється за допомогою спеціальних пересувних млинів, подрібнювачів каменю або стаціонарного аналогічного устаткування.

Застосування такого підходу може бути прикладом успішного повернення великих територій та матеріалів в екологічно безпечний стан, що сприятиме підвищенню довіри суспільства до ядерних технологій. Також необхідно врахувати, що бетонні вироби, виготовлені з роздібнених фрагментів радіоактивно забруднених об'єктів, є джерелами закритого типу. Пояснюється це тим, що радіонукліди в їх масі знаходяться у зв'язаному жорстко фіксованому стані та не можуть природним шляхом мігрувати в навколишнє середовище, що могло б привести до його додаткового забруднення, й стати в подальшому можливою причиною внутрішнього ураження людей.

### **Перелік посилань**

1. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). Державні гігієнічні нормативи. Київ, 1998. 135 с.
2. Машиністов В.Є., Балакін В.Ф., Коверя А.С. Вирішення проблеми утилізації радіоактивно забруднених об'єктів на основі ефекту самодезактивації. *Екологічні науки*. 2020. № 1 (28). С. 173 – 181.
3. Директива Ради 2013/59/EURATOM від 5 грудня 2013 року про встановлення основних норм безпеки для захисту від загроз, зумовлених впливом іонізуючого випромінювання. Європейська комісія, Брюссель. 2013. 89 с.
4. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України № 54 від 02.02.2005.
5. Mashinistov V., Balakin V., Meshkova A., Petukhova O. Ensuring Radiation Safety of Substances Contaminated by Radionuclides by Mixing them. *Key Engineering Materials*. 2024. Vol. 1002.

## **БАР'ЄРИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУВ УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ В УКРАЇНІ**

***А.Є. Рябоконт, асп.***

*Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса,  
Україна  
riabokon.a@onu.edu.ua*

Система екологічного менеджменту (СЕМ) є визнаним міжнародним інструментом забезпечення сталого розвитку підприємств і регіонів. В умовах євроінтеграційного курсу України та зростаючих вимог ESG-стандартів впровадження СЕМ набуває стратегічного значення. Разом із тим повномасштабне військове вторгнення російської федерації, що розпочалося у лютому 2022 року, створило безпрецедентні перешкоди для реалізації екологічної політики на всіх рівнях управління. Вивчення цих

перешкод є необхідною умовою для розробки адаптованих механізмів відновлення та розвитку СЕМ в Україні [1, 8].

Метою роботи є систематизація та класифікація бар'єрів впровадження системи екологічного менеджменту в умовах воєнного часу, а також окреслення потенційних «вікон можливостей» для відновлення екологічної управлінської спроможності регіонів України.

Збройна агресія завдала колосальної шкоди довкіллю та управлінській інфраструктурі України. За оцінками екологічних інспекцій, загальна сума збитків навколишньому середовищу перевищила €52,4 млрд., з яких €27 млрд. становить шкода атмосферному повітрю, €23,6 млрд. – збитки від забруднення відходами, €1,5 млрд. – водним ресурсам [2]. Відповідно до даних Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, близько 30 % природно-заповідного фонду (понад 1,2 млн. га) зазнали бомбардувань, пожеж або інших пошкоджень внаслідок воєнних дій [4].

Руйнування Каховської ГЕС у червні 2023 року стало найбільшою екологічною катастрофою в Європі з часів Чорнобилю, затоплено тисячі гектарів земель, знищено природні оселища, у р. Дніпро потрапило понад 150 т машинного мастила та токсичних речовин [2]. Наслідком катастрофи стало повне руйнування регіональних систем екологічного моніторингу та управління на значних територіях. За даними Чугай А.В., Чернякової О.І. та Клімова І.О., військова діяльність спричинила формування нетипових патернів забруднення атмосферного повітря, що суттєво ускладнює реалізацію стандартних процедур екологічного менеджменту [9].

На основі аналізу наявних досліджень та офіційних даних пропонується класифікація бар'єрів за чотирма блоками.

**1. Інституційно-правові бар'єри.** Воєнний стан суттєво обмежив функціонування регіональних органів екологічного управління, частина з них діє в умовах окупації або евакуації. Нормативна база охорони навколишнього середовища виявилася непристосованою до реалій збройного конфлікту, зокрема не врегульовано відповідальність за екологічні злочини, вчинені під час вторгнення [8]. Доступ до екологічної інформації в умовах воєнного стану також суттєво обмежено з міркувань безпеки, що унеможливорює повноцінний моніторинг та аудит, що є ключовими складовими СЕМ відповідно зі стандартом ISO 14001 [1].

**2. Економічно-фінансові бар'єри.** Переорієнтація державних і корпоративних бюджетів на потреби оборони різко скоротила фінансування екологічних програм. Загальна сума прямих задокументованих збитків інфраструктурі перевищила \$147,5 млрд. [6], що фактично паралізувало інвестиційну активність у «зелених» проєктах. Незважаючи на це, окремі фінансові установи продовжують підтримку екологічних ініціатив: за 2022 – 2023 роки в рамках ESG-засад було профінансовано близько 270 проєктів на суму 3,4 млрд. грн. [10]. Водночас системний брак фінансування, відсутність чітких регуляторних стандартів та обмежений

доступ до капіталу залишаються критичними бар'єрами для розвитку СЕМ [10].

**3. Кадрові бар'єри.** Масштабна міграція населення та мобілізація призвели до критичного дефіциту фахівців у сфері екологічного менеджменту. Руйнування університетської та наукової інфраструктури, зокрема, об'єктів НАН України у Харкові, Сумах, Миколаєві перервало освітні та дослідницькі ланцюги підготовки управлінських кадрів. Відповідно до методологічних підходів моделі CapSEM, управлінська компетентність є ключовою передумовою для переходу між рівнями екологічної зрілості підприємства; її втрата фактично відкидає організації на перший, реактивний рівень моделі [1, 7].

**4. Інфраструктурні та фізичні бар'єри.** Руйнування промислових об'єктів, систем водопостачання та енергетичної інфраструктури унеможлиблює функціонування базових елементів СЕМ. Станом на липень 2023 року задокументовано знищення 724 гідротехнічних споруд, 71 насосних станцій та 23 очисних споруд [6]. Окупація близько 2000 природоохоронних об'єктів [5] та замінування майже 300 тис. км<sup>2</sup> території [10] унеможлиблюють проведення польових екологічних досліджень і моніторингу – невід'ємних компонентів будь-якої ефективної СЕМ.

Воєнний стан породжує унікальний екологічний парадокс. З одного боку, руйнування промислових і енергетичних об'єктів призвело до скорочення викидів парникових газів на 23 – 26 % у 2022 році порівняно з 2021 роком. З іншого боку, виникли принципово нові джерела забруднення, пов'язані з воєнними операціями, які за перші 18 місяців вторгнення сформували 77 млн. т CO<sub>2</sub>-еквіваленту [3]. Загалом за час повномасштабної війни викиди забруднюючих речовин перевищили 105 млн. т, що у понад 47 разів перевищує довоєнний річний показник [10]. Цей феномен свідчить про те, що традиційні індикатори результативності СЕМ, зокрема показники GRI та EPE, потребують суттєвого перегляду в умовах збройного конфлікту.

Попри масштаб руйнувань, воєнний та повоєнний контекст відкриває стратегічні можливості для системного перезапуску екологічної політики. Відповідно до концепції «зеленого відновлення», що активно просувається міжнародними партнерами України, реконструкція може стати точкою переходу до якісно нової моделі управління довкіллям [4]. ПРООН у партнерстві зі Швецією інвестує \$6,7 млн. у 2023 – 2025 роках на створення Координаційного центру оцінки екологічних збитків [4], що формує інституційну основу для майбутньої СЕМ.

Методологічна рамка для цього переходу вже існує: модель CapSEM, апробована у міжнародній практиці, пропонує чотирирівневий шлях від реактивних екологічних заходів до системного мислення та інтеграції принципів сталого розвитку у бізнес-модель [1, 7]. Адаптація моделі до українських реалій – CapSEM-UA може стати дієвим інструментом відновлення екологічної управлінської спроможності регіонів. Паралельно

з 2016 року Укргазбанк профінансував понад тисячу «зелених» проєктів на суму близько \$1,1 млрд., що підтверджує існування фінансового попиту на екологічні рішення навіть в умовах кризи [10].

Проведений аналіз дозволяє зробити такі висновки:

- по-перше, воєнний контекст суттєво поглибив наявні бар'єри впровадження СЕМ та додав принципово нові, сформувавши чотири взаємопов'язані групи перешкод: інституційно-правові, економічно-фінансові, кадрові та інфраструктурні. Їх комплексний характер унеможливорює точкові рішення і вимагає системного підходу до відновлення екологічного управління;
- по-друге, феномен «воєнної екології» – одночасного скорочення одних видів забруднення і появи нових токсичних джерел є унікальним явищем, яке потребує розширення теоретичного апарату СЕМ і перегляду стандартних систем індикаторів результативності [3, 9];
- по-третє, процес повоєнної реконструкції є стратегічним «вікном можливостей» для інтеграції принципів сталого розвитку в регіональне управління. Застосування методологічної бази CapSEM у форматі CapSEM-UA, підкріплене міжнародною фінансовою підтримкою та адаптованою нормативною базою, здатне забезпечити якісний перехід від реактивної до системної моделі екологічного менеджменту в Україні [1, 5, 6].

Таким чином, досвід України свідчить про те, що збройний конфлікт є не тільки руйнівним чинником для довкілля, а й каталізатором переосмислення підходів до екологічного управління. Традиційні моделі СЕМ, розроблені для умов стабільного інституційного середовища, виявляються недостатніми в умовах системної кризи. Це актуалізує потребу у формуванні адаптивних механізмів екологічного менеджменту, здатних функціонувати в умовах невизначеності, фрагментованого управління та обмежених ресурсів. Перехід від реактивної до проактивної логіки екологічного управління, від «наздоганяючої реакції» до стратегічного передбачення, є не лише науковим завданням, а й практичною необхідністю для повоєнного відновлення України. Подальші дослідження у цьому напрямі мають бути зосереджені на розробці адаптованих індикаторів результативності СЕМ для уражених війною територій, формуванні регіональних механізмів координації екологічної політики та інтеграції міжнародного досвіду «зеленого відновлення» в українську управлінську практику [1, 3, 5]

### Перелік посилань

1. Fet A. M. (Ed.) Business Transitions: A Path to Sustainability. The CapSEM Model. Springer Nature Switzerland AG, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-22245-0.
2. European Parliament Research Service. Russia's war on Ukraine: High environmental toll. Brussels: European Parliament, 2023. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/751427/EPRS\\_ATA\(2023\)751427\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/ATAG/2023/751427/EPRS_ATA(2023)751427_EN.pdf).



3. Joint Research Centre. War worsens climate and environmental challenges in Ukraine. European Commission, 2025. URL: [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11_en).
4. UNDP Ukraine. New coordination center to assess environmental impacts of the war on Ukraine. Kyiv: UNDP, 2023. URL: <https://www.undp.org/ukraine/press-releases/new-coordination-center-assess-environmental-impacts-war-ukraine>.
5. Conflicts and Environment Observatory (CEOBS). The environmental consequences of the war against Ukraine: Preliminary 12-month assessment. 2023. URL: <https://ceobs.org/the-environmental-consequences-of-the-war-against-ukraine-preliminary-12-month-assessment-summary-and-recommendations/>.
6. Chukurna O., Nitsenko V., Tyukhtenko N., Lomonosova O., Zhartay Z., Dobrovolskyi V. Substantiation of the green approach in the formation of a sustainable system of ecological logistics. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. № 1. P. 76–82. DOI: 10.33271/nvngu/2022-1/076.
7. Тяхтенко Н.А., Рябоконь А.Є. Модель CapSEM як інструмент стратегії екологічного менеджменту підприємства у контексті переходу до сталого розвитку. *Стратегічне управління бізнесом на зламі епох: тенденції та виклики: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*. Київ: Видавництво Ліра-К, 2025. С. 87 – 90.
8. Електронний ресурс. URL: <https://econom.knu.ua/wp-content/uploads/2025/12/Conference-MBA-Dep-2025-1-1.pdf>
9. Електронний ресурс. URL: <http://doi.org/10.35668/2025-10-23.211>.
10. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року. Київ: КМУ, 2021. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-shvalennya-strategiyi-ekologichno-a1363r>.
11. Чугай А.В., Чернякова О.І., Клімов І.О. Аналіз впливу військової діяльності в Україні на стан атмосферного повітря. *Екологічні науки*. 2023. № 4(49).
12. Національний інститут стратегічних досліджень. Пріоритети забезпечення екологічної безпеки України в умовах російської воєнної агресії: аналітична доповідь. Київ: НІСД, 2024. URL: <https://niss.gov.ua/publikatsiyi/analitichni-dopovidi/priorytety-zabezpechennya-ekologichnoyi-bezpeky-ukrayiny-v>.

## **РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ СУМІШЕЙ В ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВКАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**

***Т.М. Серга, асп.***

*Національний університет «Полтавська політехніка  
імені Юрія Кондратюка», м. Полтава, Україна  
tetjanaserga@gmail.com*

Технологія перероблення побутових відходів із отриманням композиційних сумішей базується на комплексному підході до використання ресурсного та енергетичного потенціалу останніх [1]. Основною метою впровадження такої технології є зменшення обсягів захоронення відходів, вилучення вторинної сировини та отримання

альтернативного палива зі стабільними фізико-хімічними характеристиками. Екологічними аспектами даних сумішей є оброблення та/або відновлення значної частки побутових відходів, зменшення потреби у викопному паливі (вугілля, мазут), зниження об'єму захоронення відходів, можливість використання регіональних ресурсів (наприклад, торфовища Полтавщини).

Запропонована технологія передбачає послідовне виконання етапів, що забезпечують підготовлення побутових відходів і торфу до використання як паливного ресурсу. Загальна технологічна схема включає такі основні етапи:

- на першому етапі здійснюється попереднє сортування відходів з метою вилучення великогабаритних предметів, небезпечних компонентів та вторинної сировини (скло, метали, пластик). Це дозволяє зменшити навантаження на подальші технологічні операції та підвищити ефективність перероблення;

- другий етап передбачає механічне розділення відходів за допомогою спеціалізованого обладнання. Зокрема, застосовуються магнітні сепаратори для вилучення чорних металів та вихроструменеві сепаратори для відокремлення кольорових металів;

- на третьому етапі відбувається подрібнення горючої фракції побутових відходів до однорідного розміру, що забезпечує покращення умов подальшого оброблення. Після цього здійснюється сушіння матеріалу до оптимальної вологості (10 – 15 %), що є необхідною умовою для ефективного горіння та формування якісних композиційних сумішей;

- четвертий етап полягає у формуванні композиційних сумішей. Введення торфу сприяє стабілізації процесу горіння та покращенню структури композиційної суміші [2, 3];

- заключним етапом є гранулювання або брикетування підготовленої суміші. У результаті цього процесу отримують паливні гранули, які характеризуються підвищеною щільністю, однорідністю та зручністю транспортування і зберігання. Отримане паливо може використовуватися як заміник традиційних видів палива для об'єктів малої теплоенергетики.

Таким чином, запропонована технологія забезпечує комплексне перероблення побутових відходів із максимальним використанням їх ресурсного потенціалу та мінімізацією негативного впливу на навколишнє середовище (рис. 1).

Для розвитку об'єктів малої теплоенергетики в умовах сьогодення доцільно використовувати альтернативні види палива, зокрема, композиційні суміші на основі побутових відходів і торфу. Однак особливої актуальності набуває питання екологічної безпеки процесів їх термічного перероблення. Одним із ключових показників екологічності є рівень концентрацій шкідливих речовин, серед яких важливе місце займає монооксид вуглецю ( $CO$ ) – продукт неповного згоряння палива.



Рисунок 1 – Технологічна схема перероблення побутових відходів

Підвищені концентрації монооксиду вуглецю свідчать про неефективність процесів горіння, недосконалість технологічних режимів або конструктивних рішень теплогенеруючих установок. Це не лише знижує енергетичну ефективність, але й створює значні екологічні та санітарно-гігієнічні ризики.

У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення та впровадження комплексу технологічних і організаційних заходів, спрямованих на зменшення утворення та концентрацій монооксиду вуглецю під час спалювання композиційних сумішей.

Для зниження концентрації монооксиду вуглецю доцільно застосовувати комплексні технічні та організаційні заходи:

1) *забезпечення повного згоряння палива*. Надлишок кисню у топці сприяє повному окисненню  $CO$  до  $CO_2$ . Контроль і регулювання співвідношення «паливо-повітря» дозволяють уникнути дефіциту кисню;

2) *контроль температурного режиму*. Недостатня температура горіння призводить до збільшення  $CO$ . Підігрів повітря, рекуперація тепла та використання сучасних пальників дозволяють підтримувати необхідну температуру;

3) *каталітичне допалювання*. Використання каталізаторів (наприклад, паладієвих) сприяє окисненню  $CO$  навіть при відносно низьких температурах, що підвищує ефективність допалювання.

4) *автоматизація процесів горіння*. Автоматичні системи контролю параметрів горіння в режимі реального часу забезпечують стабільну роботу обладнання та мінімізацію шкідливих викидів.

Обґрунтовано доцільність застосування композиційних палив у котельнях малої потужності за умови попередньої підготовки палива

(сортування, подрібнення, сушіння та гранулювання), що забезпечує однорідність складу та підвищує ефективність спалювання. Рекомендовано використання сучасних технічних рішень для теплогенеруючих установок, зокрема автоматизованих систем подачі палива, багатоступеневих систем подачі повітря та засобів очищення димових газів, що забезпечує підвищення коефіцієнту корисної дії та зменшення негативного впливу на довкілля.

Таким чином, впровадження запропонованих рекомендацій сприятиме підвищенню енергоефективності об'єктів малої теплоенергетики, раціональному використанню регіональних ресурсів та зменшенню екологічного навантаження, що є особливо актуальним для територіальних громад.

### **Перелік посилань**

1. Голік Ю.С., Серга Т.М. Експериментальне дослідження теплотворної здатності побутових відходів і торфу як твердого палива. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2025. Вип. 3. С. 219 – 224.
2. Голік Ю.С., Серга Т.М. Застосування торфу з родовищ Полтавщини як компоненту композиційного палива на основі горючих фракцій побутових відходів. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 4. С. 19 – 23.
3. Коніщук В.В., Шумигай І.В., Душко П.М., Мартиненко В.В. Моніторинг сучасного стану торфовищ Західного Полісся. *Збалансоване природокористування*. 2024. № 3. С. 53 – 62.

## **ПРОСТОРОВО-ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ТУРИСТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЕРИТОРІАЛЬНІ ГРОМАДИ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ (НА ПРИКЛАДІ ІВАНО-ФРАНКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)**

***І.Є. Смик, асп., Л.М. Архипова, д.т.н., проф.***

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
м. Івано-Франківськ, Україна  
iryna.smyk-a10122@nung.edu.ua*

Туризм у Карпатському регіоні належить до провідних чинників територіального розвитку, але одночасно формує зростаюче навантаження на природні системи, інженерну інфраструктуру та ресурси територіальних громад. Для Івано-Франківської області проблема набуває особливої актуальності з огляду на поєднання високої туристичної привабливості, значної частки гірських і передгірських територій, наявності природоохоронних об'єктів та вираженої сезонної концентрації відвідувань. За таких умов важливо враховувати не лише економічне значення туризму,

а й просторове розміщення туристичних об'єктів та екологічне навантаження, яке вони створюють у межах територіальних громад.

Методологічним підґрунтям для оцінювання ролі туризму в регіональній системі господарювання слугує підхід Tourism Satellite Account, розроблений під егідою UNWTO, OECD, Євростату та Статистичної комісії ООН [1 – 3]. У поєднанні з класифікацією видів економічної діяльності КВЕД-2010, гармонізованою з NACE Rev.2 [3], зазначений підхід дозволяє ідентифікувати туристичні та суміжні види діяльності, простежити їхнє територіальне розміщення і сформувати основу для подальшого зіставлення з екологічними індикаторами. Наукові підходи до регіональної адаптації TSA та виділення туристичної індустрії у міжгалузевому розрізі розкрито у працях І.Я. Кулиняка та Ю.Б. Забалдіної зі співавторами [4 – 5].

За даними Єдиного державного реєстру юридичних осіб, фізичних осіб-підприємців та громадських формувань, станом на початок 2025 року в Івано-Франківській області обліковувалося 6510 суб'єктів господарювання з основним кодом КВЕД, що належить до туристичної сфери, з них 1641 юридична особа та 4869 фізичних осіб-підприємців [6]. Окремо в суміжних до туристичної індустрії видах економічної діяльності зареєстровано 6605 суб'єктів, з них 1046 юридичних осіб і 5559 фізичних осіб-підприємців. За офіційним місцем реєстрації найбільша концентрація суб'єктів туристичної діяльності спостерігається в Івано-Франківській міській громаді (2812), Коломийській (501), Калуській (392), Яремчанській (296) та Долинській (151). Однак юридична концентрація бізнесу не відображає повною мірою територій фактичного природокористування, оскільки значна частина реального туристичного навантаження локалізується у гірських громадах рекреаційного профілю – Яремчанській, Ворохтянській, Поляницькій, Верховинській, Косівській та інших.

З позицій екологічного аналізу визначальне значення має не лише кількість зареєстрованих суб'єктів, а, передусім, просторова концентрація туристичних об'єктів у межах громад, оскільки саме вона відображає локалізацію потенційного антропогенного тиску на довкілля. Картографування туристичних об'єктів у розрізі територіальних громад Івано-Франківської області засвідчило різку територіальну нерівномірність їх розподілу: окремі громади формують висококонцентровані ядра туристичної активності, тоді як більшість територій характеризується низькою інтенсивністю туристичного освоєння (рис. 1).

Відповідно до рис. 1, розподіл туристичних об'єктів у межах Івано-Франківської області характеризується значною територіальною нерівномірністю. У структурі регіону виділяються окремі територіальні громади з високою концентрацією туристичних об'єктів, де їх кількість перевищує 700 – 800 одиниць, тоді як у більшості громад показники залишаються істотно нижчими. Подібний характер розміщення

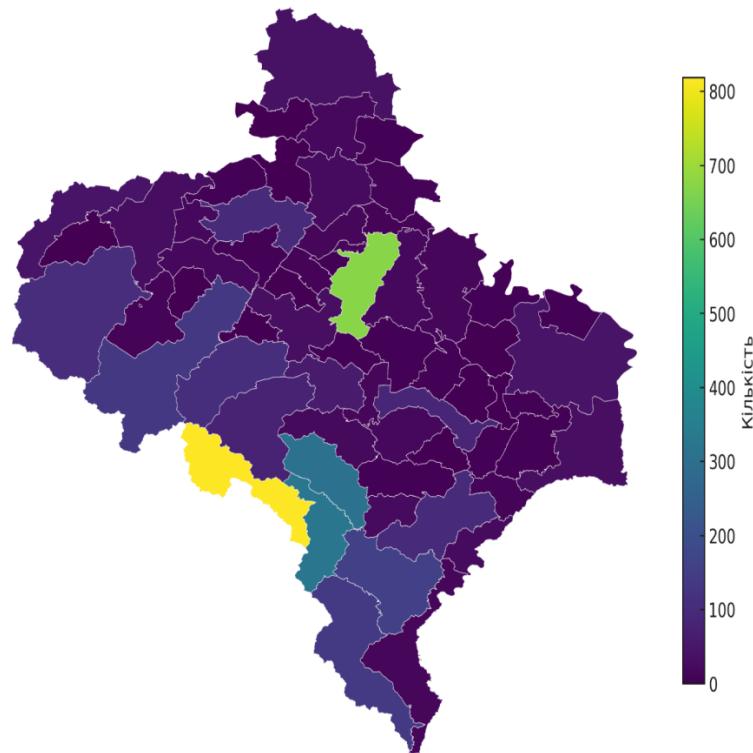


Рисунок 1 – Просторовий розподіл та концентрація туристичних об'єктів у межах територіальних громад

засвідчує поляризацію туристичного освоєння області та зосередження основного екологічного навантаження в межах обмеженого кола громад. За таких просторових умов антропогенний тиск на природне середовище формується нерівномірно й концентрується, насамперед, у громадах, що виконують роль основних туристичних центрів.

Для більш коректного просторового порівняння використано також показник щільності туристичних об'єктів на 1 км<sup>2</sup>. За даними OpenStreetMap, найвищі значення щільності туристичної інфраструктури характерні для Ворохтянської селищної громади – 1,244 об'єкта на км<sup>2</sup>, Яремчанської міської – 1,198, Поляницької сільської – 1,197, Івано-Франківської міської – 0,768, Зеленської сільської – 0,415, Верховинської селищної – 0,396. До десятки громад із найвищою щільністю також входять Угринівська, Солотвинська, Космацька та Перегінська громади. Наведені показники відображають високу інтенсивність туристичного освоєння окремих територій і в екологічному аспекті вказують на зростання локального навантаження на ландшафти, водні ресурси, транспортні коридори та системи життєзабезпечення.

Екологічний зміст виявленої просторової диференціації полягає в тому, що зростання кількості та щільності туристичних об'єктів супроводжується зростанням ресурсоемності туристичної діяльності. У громадах із високою

концентрацією туристичної інфраструктури підвищується споживання води, зростає навантаження на системи водовідведення та очищення стічних вод, збільшується обсяг твердих побутових відходів, посилюється транспортний тиск на гірські та долинні території. Для громад додаткову загрозу становлять ерозійні процеси на рекреаційних маршрутах, витоптування рослинного покриву, фрагментація природних ландшафтів, локальне засмічення та перевантаження прибережних зон малих річок. У поєднанні з природною вразливістю гірських екосистем такі процеси формують стійкі осередки екологічного ризику.

Принципово важливо, що просторове ядро туристичного розвитку в Івано-Франківській області не завжди збігається з ядром адміністративної реєстрації бізнесу. Івано-Франківська міська громада виступає центром реєстрації підприємств і сервісно-логістичним вузлом, однак фактичне екологічне навантаження значною мірою зміщується до гірських рекреаційних громад, де туристичні потоки безпосередньо взаємодіють із природним середовищем. Саме тому для екологічно орієнтованого моніторингу доцільно враховувати не лише дані реєстру підприємств, а й картографування туристичних об'єктів, щільність інфраструктури, туристодоби та агреговані екологічні показники у розрізі територіальних громад.

Науково-прикладне значення просторово-екологічної оцінки полягає у можливості типологізації територіальних громад за рівнем туристичного навантаження та екологічного ризику. До групи підвищеного ризику належать громади з найбільшою щільністю та концентрацією туристичних об'єктів, передусім Ворохтянська, Яремчанська, Поляницька, Верховинська та частково Івано-Франківська. До групи помірного ризику належать громади зі збалансованішим співвідношенням площі та кількості туристичних локацій. Громади з низькою щільністю об'єктів характеризуються слабшим поточним навантаженням, однак можуть розглядатися як території потенційного розвитку за умови дотримання екологічних обмежень і планувальних вимог.

Отже, просторовий аналіз туристичних об'єктів у межах територіальних громад Івано-Франківської області підтверджує наявність вираженої поляризації туристичного освоєння та концентрації екологічних ризиків у гірських і передгірських громадах Карпатського регіону. Дані про кількість суб'єктів туристичної діяльності, щільність туристичної інфраструктури та картографічна візуалізація їх розміщення формують аналітичну основу для подальшого зіставлення з показниками використання води, викидів, скидів і утворення відходів, що дозволяє перейти від опису туристичного потенціалу до системної оцінки екологічного навантаження й обґрунтування управлінських рішень у сфері сталого розвитку територіальних громад.

### Перелік посилань

1. United Nations Statistics Division. International Recommendations for Tourism Statistics 2008. United Nations, 2010.
3. Tourism Satellite Account: Recommended Methodological Framework 2008. URL: [https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesf/seriesf\\_80rev1e.pdf](https://unstats.un.org/unsd/publication/seriesf/seriesf_80rev1e.pdf).
2. Kласyfikatsiia vydiv ekonomichnoi diialnosti. Classification of types of economic activity. DK 009:2010. National Classifier of Ukraine. Kyiv, 2020. URL: <https://surl.li/odvqsf>.
3. Кулиняк І. Класифікація видів туризму відповідно до галузей економіки (видів економічної діяльності). *Development Service Industry Management*. 2024. № 8 (33). С. 207 – 213.
4. Забалдіна Ю.Б., Роскладка Н., Передерко В. Визначення частки туризму в регіональній економіці з використанням методики допоміжного (сателітного) рахунку туризму на прикладі Івано-франківської області. *Інфраструктура ринку*. 2021. № 60.
5. YouControl. URL: <https://youcontrol.com.ua/>.

### ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М. ЧЕРКАСИ ТА АНАЛІЗ НЕКАНЦЕРОГЕННИХ РИЗИКІВ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я НАСЕЛЕННЯ

*О.М. Хоменко, к.х.н., доц., М.В. Перцьовий, маг.*

*Черкаський державний технологічний університет, м. Черкаси, Україна  
o.khomenko@chdtu.edu.ua*

Місто Черкаси належить до населених пунктів, де основними джерелами забруднення атмосферного повітря виступають підприємства автомобільного транспорту, промислового сектору та енергетики. Моніторинг якості атмосферного повітря міста є однією з провідних складових системи екологічного спостереження. Наявні на сьогодні дані дозволяють об'єктивно оцінити ступінь забруднення атмосферного повітря, який має безпосередній вплив на стан здоров'я населення.

З метою дослідження вмісту токсичних речовин в атмосферному повітрі на території міста було організовано відбір проб у 14 контрольних точках, розташованих з урахуванням переважних напрямків вітру. Результати досліджень, що проведені на базі лабораторії ДУ «Черкаський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України», наведено в табл. 1.

Результати аналізу засвідчили перевищення максимально разових концентрацій забруднюючих речовин, зокрема формальдегіду, бензину, а також у окремих випадках оксидів нітрогену. Концентрації оксиду карбону перебувають на рівні гранично допустимих значень (ГДК). Водночас встановлено, що середньодобові концентрації перевищують нормативно допустимі показники, зокрема бензину, формальдегіду ( $CH_2O$ ), оксиду нітрогену ( $NO_2$ ) та оксиду карбону ( $CO$ ). Встановлені рівні концентрацій



свідчать про їх потенційну небезпеку для навколишнього середовища та здоров'я населення.

Таблиця 1 – Визначені показники концентрацій забруднень в атмосфері міста Черкаси

| Найменування точок відбору проб (перехрестя вулиць) | Інгредієнт        | ГДК <sub>мр</sub> , мг/м <sup>3</sup> | Результати дослідження шкідливих речовин, мг/м <sup>3</sup> |                         |                          |
|-----------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|
|                                                     |                   |                                       | Середня концентрація                                        | Мінімальна концентрація | Максимальна концентрація |
| Проспект хіміків – Чорновола                        | Оксид карбону     | 5,0                                   | 3,0                                                         | 2,0                     | 5,0                      |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,03                                                        | 0,025                   | 0,035                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,010                                                       | 0,08                    | 0,12                     |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 6,0                                                         | 3,0                     | 8,0                      |
| Бульвар Шевченка – Чорновола                        | Оксид карбону     | 5,0                                   | 4,00                                                        | 1,10                    | 7,00                     |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,03                                                        | 0,026                   | 0,039                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,10                                                        | 0,085                   | 0,12                     |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 4,00                                                        | 1,09                    | 7,0                      |
| Площа 700-річчя –бульвар Шевченка                   | Оксид карбону     | 5,0                                   | 4,0                                                         | 1,09                    | 8,0                      |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,03                                                        | 0,025                   | 0,041                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,10                                                        | 0,08                    | 0,12                     |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 4,0                                                         | 1,09                    | 7,0                      |
| Смілянська – бульвар Шевченка                       | Оксид карбону     | 5,0                                   | 3,00                                                        | 1,1                     | 7,0                      |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,032                                                       | 0,024                   | 0,038                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,09                                                        | 0,06                    | 0,011                    |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 4,0                                                         | 1,09                    | 7,00                     |
| Смілянська – Вернигори                              | Оксид карбону     | 5,0                                   | 2,0                                                         | 1,12                    | 5,00                     |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,03                                                        | 0,022                   | 0,043                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,03                                                        | 0,08                    | 0,12                     |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 3,00                                                        | 1,08                    | 7,00                     |
| Смілянська – Благовісна                             | Оксид карбону     | 5,0                                   | 4,00                                                        | 1,11                    | 8,00                     |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,032                                                       | 0,026                   | 0,039                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,09                                                        | 0,07                    | 0,12                     |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 4,00                                                        | 1,11                    | 8,00                     |
| Вулиця Сумгайтська 124/126                          | Оксид карбону     | 5,0                                   | 1,0                                                         | 1,12                    | 5,00                     |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,03                                                        | 0,023                   | 0,042                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,09                                                        | 0,07                    | 0,11                     |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 3,00                                                        | 1,08                    | 7,00                     |
| Перша міська лікарня – Дахнівська                   | Оксид карбону     | 5,0                                   | 1,0                                                         | 1,11                    | 5,00                     |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,03                                                        | 0,023                   | 0,042                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,09                                                        | 0,07                    | 0,11                     |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 3,00                                                        | 1,08                    | 7,00                     |
| Надпільна – Пастерівська                            | Оксид карбону     | 5,0                                   | 5,0                                                         | 2,12                    | 5,00                     |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,032                                                       | 0,024                   | 0,039                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,09                                                        | 0,07                    | 0,11                     |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 3,00                                                        | 2,00                    | 7,00                     |
| Припортова – Амброса                                | Оксид карбону     | 5,0                                   | 2,0                                                         | 1,08                    | 6,00                     |
|                                                     | Формальдегід      | 0,035                                 | 0,033                                                       | 0,022                   | 0,035                    |
|                                                     | Діоксид нітрогену | 0,20                                  | 0,07                                                        | 0,05                    | 0,11                     |
|                                                     | Бензин            | 5,0                                   | 3,00                                                        | 1,08                    | 6,00                     |

З огляду на це, важливим є прогнозування можливих наслідків впливу шляхом оцінювання неканцерогенного ризику для здоров'я населення, зумовленого хімічним забрудненням атмосферного повітря [1, 2]. Розраховані значення індексу небезпеки розвитку неканцерогенних ефектів (*HI*) для групи речовин односпрямованої дії наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Розрахунок сумарного неканцерогенного ризику впливу сполук (*HI*) на критичні органи та системи організму

| Речовина                      | <i>C</i> , мг/м <sup>3</sup> | <i>RfC</i> , мг/м <sup>3</sup> | <i>HQ</i> | Критичні органи                |
|-------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------|--------------------------------|
| Оксид нітрогену (IV)          | 0,09                         | 0,04                           | 3,75      | органи дихання                 |
| Оксид карбону (II)            | 4,0                          | 3,0                            | 1,03      | Кров, нервова система          |
| Бензин                        | 4,0                          | 1,5                            | 2,02      | печінка                        |
| Формальдегід                  | 0,03                         | 0,003                          | 9,6       | Органи дихання, імунна система |
| Сумарні неканцерогенні ризики |                              |                                |           | Рівень ризику                  |
|                               | HI загальне                  |                                |           | Високий                        |
|                               | HI кров, нервова система     |                                |           | Допустимий                     |
|                               | HI органи дихання            |                                |           | Високий                        |
|                               | HI печінка                   |                                |           | Насторожуючий                  |

Аналіз даних табл. 2 свідчить, що населення, яке перебуває в зоні впливу накопичених токсичних і шкідливих речовин, зокрема діоксиду нітрогену (*NO<sub>2</sub>*), зазнає як прямих, так і опосередкованих негативних ефектів для здоров'я. Це пояснюється тим, що при інгаляційному надходженні дана сполука легко проникає в організм і до 90 % абсорбується кров'ю, створюючи потенційну загрозу для функціонування різних систем організму. Вплив формальдегіду, у свою чергу, негативно позначається на імунній системі та органах дихання людини.

Отримані результати дослідження можуть слугувати підґрунтям для розроблення природоохоронних заходів, спрямованих на зниження обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря міста, передусім від пересувних джерел.

### Перелік посилань

1. Методичні рекомендації «Оцінка канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря». Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 18 жовтня 2023 року № 1811. 11 с.
2. Жицька Л.І., Хоменко О.М., Папач В.В., Видра Н.М. Екологічна оцінка забруднень атмосфери та кумулятивних ризиків для здоров'я населення міста Черкаси. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 1 (58). С.49 – 57.

## ОЦІНКА ЗАБРУДНЕНOSTІ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ҐРУНТІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ УГІДЬ СТЕПОВОЇ ЗОНИ УКРАЇНИ

*Д.В. Шелінговський, маг., Т.А. Сафранов, д.г.-м.н., проф.*  
*Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса,*  
*Україна*  
*d.v.shelinhovskyi@ukr.net*

Забруднення важкими металами (ВМ) ґрунтового покриву сільськогосподарських угідь здійснюється від різних джерел, які можна поділити на антропогенні (господарська діяльність людини) та природні (геогенні). Основними антропогенними джерелами ВМ в ґрунтах сільськогосподарських угідь є мінеральні добрива, які часто вмістять деякі ВМ (*Pb*, *Cd*, *Hg*, *As*, *Zn*, *Cu*, *Ni* тощо). Крім того, пестициди, зокрема які містять *Cu* та *Hg*, накопичуються в ґрунтах. При вапнуванні ґрунтів також можуть накопичуватися окремі ВМ. Органічні добрива, що отримуються зі стічних вод та мулів, можуть містити ВМ. На забруднення ґрунтів ВМ впливають викиди об'єктів промисловості та теплоенергетики, а також викиди автомобільного та залізничного транспорту. Природними джерелами ВМ можуть бути материнські гірські породи та кори вивітрювання.

Серед основних природних зон України степова зона займає близько 40 % від загальної площі території держави. Варто зазначити, що наразі типові степові екосистеми збереглися на близько 3 % площі свого первинного ареалу та характеризуються високим рівнем фрагментації ( $\approx 10000$  окремих ділянок) [1].

Станом на 1 січня 2020 року земельний фонд України становив 60,3 млн. га, сільськогосподарські угіддя – 41,3 млн. га, у тому числі рілля – 32,8 млн. га [1]. Розподіл площ сільськогосподарських угідь на території областей степової зони за даними [1 – 8] наведено у табл. 1.

Найбільша площа сільськогосподарських угідь степової зони спостерігається на території Одеської області – 2588,2 тис. га, що становить  $\approx 78$  % від загальної площі області. У Кіровоградській області зафіксовано найвищий відсоток сільськогосподарських угідь від загальної площі ( $\approx 83$  %), що свідчить про високий ступінь сільськогосподарської освоєності території цього регіону. Інтенсивна сільськогосподарська діяльність є чинником трансформації ґрунтового покриву, що супроводжується змінами фізико-хімічних властивостей ґрунту, підвищенням концентрацій забруднюючих речовин та істотним скороченням біологічного різноманіття.

Згідно з даними [9], за результатами обстежень ґрунтового покриву сільськогосподарських угідь отримано показники вмісту рухомих форм ВМ на території України. Дані щодо концентрацій рухомих форм окремих ВМ для областей, розташованих у межах степової зони, наведено у табл. 2.

Таблиця 1 – Розподіл площ сільськогосподарських угідь у межах областей степової зони України

| Область          | Загальна площа земельних ресурсів, тис. га | Площа сільськогосподарських угідь |                              |
|------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
|                  |                                            | всього, тис. га                   | % до загальної площі області |
| АР Крим          | 2608,1                                     | 1709,4                            | 65,5                         |
| Дніпропетровська | 3192,3                                     | 2512,1                            | 78,7                         |
| Донецька         | 2651,7                                     | 2041,5                            | 77,0                         |
| Запорізька       | 2718,3                                     | 2241,7                            | 82,5                         |
| Кіровоградська   | 2458,8                                     | 2031,4                            | 82,6                         |
| Луганська        | 2668,0                                     | 1956,0                            | 73,3                         |
| Миколаївська     | 2458,6                                     | 1994,7                            | 81,1                         |
| Одеська          | 3331,4                                     | 2588,2                            | 77,7                         |
| Херсонська       | 2846,1                                     | 1968,3                            | 69,2                         |

Таблиця 2 – Середньозважені показники вмісту рухомих форм окремих важких металів у ґрунтах сільськогосподарських угідь степової зони України [9]

| Область                        | Обстежена площа, тис. га | Середньозважений показник вмісту рухомих форм важких металів, мг/кг ґрунту |             |              |            |            |            |
|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------|------------|------------|------------|
|                                |                          | <i>Cu</i>                                                                  | <i>Zn</i>   | <i>Mn</i>    | <i>Co</i>  | <i>Pb</i>  | <i>Cd</i>  |
| АР Крим                        | -                        | -                                                                          | -           | -            | -          | -          | -          |
| Дніпропетровська               | 1432,5                   | 0,25                                                                       | 1,10        | 29,58        | 0,25       | 2,18       | 0,32       |
| Донецька                       | -                        | -                                                                          | -           | -            | -          | -          | -          |
| Запорізька                     | 1326,1                   | 0,38                                                                       | 0,59        | 19,90        | 0,34       | 1,93       | 0,24       |
| Кіровоградська                 | 1103,2                   | 0,11                                                                       | 0,23        | 6,40         | 0,24       | 0,98       | 0,13       |
| Луганська                      | 772,4                    | 0,26                                                                       | 1,28        | 19,70        | 0,84       | -          | -          |
| Миколаївська                   | 1473,2                   | 0,26                                                                       | 0,46        | 10,30        | 0,59       | 2,11       | 0,23       |
| Одеська                        | 1155,0                   | 0,27                                                                       | 0,43        | 25,20        | 0,47       | 2,17       | 0,20       |
| Херсонська                     | 1300,1                   | 0,36                                                                       | 0,83        | 8,77         | 0,27       | 1,36       | 0,16       |
| <b>ГДК для рухомих форм ВМ</b> |                          | <b>3,0</b>                                                                 | <b>23,0</b> | <b>140,0</b> | <b>5,0</b> | <b>6,0</b> | <b>0,7</b> |

За даними, наведеними в табл. 2, бачимо, що перевищень гранично допустимих концентрацій (ГДК) рухомих форм ВМ у ґрунтах сільськогосподарських угідь степової зони України не спостерігається. Встановлено, що найвищі значення концентрацій рухомих форм *міді* зафіксовано на території Запорізької області (у 7,9 рази менше ГДК). Для Луганської області зафіксовані найвищі значення вмісту рухомих форм *цинку* та *кобальту*. Максимальні значення концентрацій рухомих форм *марганцю*, *свинцю* та *кадмію* виявлено в ґрунтовому покриві Дніпропетровської області.

Для оцінки забруднення ґрунтового покриву ВМ використовують низку методичних підходів. За даними [9] проведено розрахунок коефіцієнта техногенного геохімічного навантаження ( $K_i$ ):

$$K_i = \frac{C_i}{C_{ГДК}}, \quad (1)$$

де  $C_i$  – концентрація хімічного елемента;

$C_{ГДК}$  – ГДК певного хімічного елемента [10].

У разі багатокомпонентного техногенного забруднення також доречно розрахувати комплексний показник забруднення ( $KПЗ$ ), що визначається за формулою [10]:

$$KПЗ = \sum_{i=1}^n K_i, \quad (2)$$

де  $n$  – число полютантів.

У табл. 3 наведено результати розрахунків коефіцієнта техногенного геохімічного навантаження ( $K_i$ ) та  $KПЗ$  для ґрунтів сільськогосподарських угідь степової зони України.

Таблиця 3 – Розрахункові значення  $K_i$  та  $KПЗ$  для ґрунтового покриву сільськогосподарських угідь степової зони України

| Область          | Коефіцієнт техногенного геохімічного навантаження ( $K_i$ ) |      |      |      |      |      | $KПЗ$ |
|------------------|-------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|
|                  | $Cu$                                                        | $Zn$ | $Mn$ | $Co$ | $Pb$ | $Cd$ |       |
| Дніпропетровська | 0,08                                                        | 0,05 | 0,21 | 0,05 | 0,36 | 0,46 | 1,21  |
| Запорізька       | 0,13                                                        | 0,03 | 0,14 | 0,07 | 0,32 | 0,34 | 1,03  |
| Кіровоградська   | 0,04                                                        | 0,01 | 0,05 | 0,05 | 0,16 | 0,19 | 0,50  |
| Луганська        | 0,09                                                        | 0,06 | 0,14 | 0,17 | -    | -    | 0,46  |
| Миколаївська     | 0,09                                                        | 0,02 | 0,07 | 0,12 | 0,35 | 0,33 | 0,98  |
| Одеська          | 0,09                                                        | 0,02 | 0,18 | 0,09 | 0,36 | 0,29 | 1,03  |
| Херсонська       | 0,12                                                        | 0,04 | 0,06 | 0,05 | 0,23 | 0,23 | 0,73  |

За результатами аналізу даних, наведених у табл. 3, встановлено, що найвище розрахункове значення  $K_i$  зафіксовано для *кадмію* на території сільськогосподарських угідь Дніпропетровської області (0,46), а для *свинцю* максимальні значення спостерігаються у ґрунтах Дніпропетровської та Одеської областей (0,36).

Варто зазначити, що розрахунки значень  $K_i$  та  $KПЗ$  не виконувалися для ґрунтів сільськогосподарських угідь Автономної Республіки Крим та Донецької області через відсутність вихідних даних.

Найвищі значення  $KПЗ$  отримано для ґрунтів Дніпропетровської області (1,21). Відповідно до орієнтовної шкали еколого-геохімічної оцінки забруднення родючих ґрунтів за значенням  $KПЗ$  [10], отриманий результат можна класифікувати як «незначний», оскільки для ґрунтів сільськогосподарських угідь всіх областей степової зони України значення

*КПЗ* не перевищує порогу помірного рівня (табл. 4).

Таблиця 4 – Орієнтована шкала оцінки небезпеки забруднення ґрунтів за значенням *КПЗ*

| Величина <i>КПЗ</i> | Рівень забруднення ґрунтів |
|---------------------|----------------------------|
| $n < КПЗ < 3n$      | Помірний                   |
| $3n < КПЗ < 10n$    | Високий                    |
| $КПЗ > 10n$         | Надзвичайно високий        |

Одним із показників, що використовуються для оцінки якості ґрунтового покриву, є індекс забруднення ґрунтів (*ІЗГ*) [10], що розраховується за формулою:

$$ІЗГ = \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{C_{ГДК}} \right) / n. \quad (3)$$

За значенням *ІЗГ* виокремлюють такі категорії якості ґрунтів: *ІЗГ* < 0,75 – чисті ґрунти; *ІЗГ* = 0,75 – 1,0 – проблемні ґрунти; *ІЗГ* > 1,0 – забруднені ґрунти. Результати оцінки якості ґрунтів сільськогосподарських угідь степової зони України за значенням *ІЗГ* наведено в табл. 5.

Аналіз отриманих результатів демонструє, що усі значення *ІЗГ* для ґрунтового покриву сільськогосподарських угідь степової зони України не перевищують 0,75, підтверджуючи низький рівень вмісту рухомих форм ВМ. Попри те, що досліджувані території (особливо Дніпропетровська та Запорізька області) є осередками промислового виробництва, розраховані дані свідчать, що поточний стан ґрунтів сільськогосподарських угідь степової зони України належить до категорії «чисті», також це підтверджується розрахунками *КПЗ*.

Таблиця 5 – Оцінка якості ґрунтового покриву сільськогосподарських угідь степової зони України за значенням *ІЗГ*

| Територіальна одиниця | Значення <i>ІЗГ</i> | Категорія якості ґрунту за значенням <i>ІЗГ</i> |
|-----------------------|---------------------|-------------------------------------------------|
| Дніпропетровська обл. | 0,20                | чисті ґрунти                                    |
| Запорізька обл.       | 0,17                |                                                 |
| Кіровоградська обл.   | 0,08                |                                                 |
| Луганська обл.        | 0,11                |                                                 |
| Миколаївська обл.     | 0,16                |                                                 |
| Одеська обл.          | 0,17                |                                                 |
| Херсонська обл.       | 0,12                |                                                 |

### Перелік посилань

1. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2019 році. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (дата звернення: 18.03.2026).
2. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Дніпропетровської області у 2024 році. URL: <https://adm.dp.gov.ua/pro-oblast/ekologiya-pro-oblast/ekologiya> (дата звернення: 19.03.2026).
3. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Донецької області у 2023 році. URL: <https://surl.li/mtisrx> (дата звернення: 19.03.2026).
4. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Запорізької області у 2023 році. URL: <https://lnk.ua/VPBnGI84S> (дата звернення: 19.03.2026).
5. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Кіровоградської області у 2024 році. URL: <https://ekolog.kr-admin.gov.ua/index.php/diyalnist/stan-dovkillia> (дата звернення: 21.03.2026).
6. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Луганської області у 2024 році. URL: [https://eco-lugansk.gov.ua/images/docs/regionalna\\_dopovid\\_2024.pdf](https://eco-lugansk.gov.ua/images/docs/regionalna_dopovid_2024.pdf) (дата звернення: 21.03.2026).
7. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Миколаївської області у 2024 році. URL: <https://ecolog.mk.gov.ua/ua/ecoreports/regonalreport/> (дата звернення: 21.03.2026).
8. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Одеської області у 2024 році. URL: <https://ecology.od.gov.ua/wp-content/uploads/2025/09/shhd-stan-nps-2024.pdf> (дата звернення: 22.03.2026).
9. Періодична доповідь про стан ґрунтів на землях сільськогосподарського призначення України у 2020 році. URL: <https://www.old.iogu.gov.ua/publikaciji/stan-gruntiv/> (дата звернення: 23.03.2026).
10. Сафранов Т.А., Чепіжко О.В., Коніков Є.Г. та ін. Оцінка техногенного впливу на геологічне середовище: підручник. Одеса: «Екологія», 2012. 272 с.

### АРХІТЕКТУРА ПОТОКІВ ДАНИХ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРИ

**Шиманський Д.В., асп.**

*Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса,  
Україна*

*shymanskyi.denys@stud.onu.edu.ua*

Зростання рівня урбанізації та промислового навантаження на атмосферне повітря зумовлює необхідність впровадження автоматизованих систем моніторингу (АСМ) атмосфери, здатних забезпечити безперервний збір, передачу та аналіз даних про стан навколишнього середовища. Особливої актуальності ця проблема набуває для великих промислових центрів, зокрема м. Одеса, де концентрація підприємств хімічної промисловості, портової інфраструктури та автотранспорту формує складну картину атмосферного забруднення. Ефективність АСМ у значній мірі

визначається архітектурою потоків даних – сукупністю технічних рішень щодо збору первинних сигналів, їх передачі, обробки та зберігання.

Метою даної роботи є аналіз та обґрунтування принципів побудови архітектури потоків даних в АСМ повного циклу – від збору первинних сигналів з сенсорів до їх централізованої обробки та зберігання на власній серверній інфраструктурі. Об'єктом дослідження є автоматизована система моніторингу атмосферного повітря м. Одеса, предметом – принципи та методи організації інформаційних потоків у такій системі.

**Рівні архітектури потоків даних АСМ.** Запропонована архітектура потоків даних у системі моніторингу атмосфери включає чотири ієрархічні рівні: рівень сенсорної мережі, рівень граничних обчислень (Edge Computing), рівень передачі даних та рівень хмарної обробки.

На рівні сенсорної мережі розміщуються сенсори забруднюючих речовин ( $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$ ,  $CO$ ) та метеорологічних параметрів (температура, відносна вологість, атмосферний тиск, швидкість і напрямок вітру). Сенсори формують аналоговий або цифровий сигнал, який надходить до мікроконтролерного вузла збору даних. На цьому рівні здійснюється первинна калібрація та фільтрація аномальних значень за допомогою алгоритму ковзного середнього.

**Рівень граничних обчислень (Edge Computing)** забезпечує локальну попередню обробку даних безпосередньо на вимірювальному вузлі або регіональному шлюзі. Це дозволяє суттєво зменшити обсяги трафіку, що передаються до хмарної інфраструктури, та знизити затримку реакції системи. На цьому рівні виконується стиснення часових рядів, агрегація даних за часовими вікнами (1 хв., 15 хв., 1 год.) та локальна перевірка граничних значень із формуванням тривожних сповіщень.

**Протоколи передачі даних.** Для організації потоків даних між рівнями АСМ використовуються два основних протоколи: MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) та HTTP/REST.

**Протокол MQTT** є легковаговим pub/sub-протоколом, оптимізованим для передачі даних в умовах обмеженої пропускної здатності каналу зв'язку та нестабільного з'єднання. Він реалізує асинхронну модель обміну повідомленнями через **MQTT-брокер (Eclipse Mosquitto)**: сенсори виступають у ролі видавців (publishers), публікуючи телеметрію у відповідні топіки, тоді як хмарна платформа – у ролі підписника (subscriber). Протокол HTTP/REST доцільно використовувати для передачі агрегованих даних до зовнішніх сервісів та API-інтерфейсів обміну даними з іншими підсистемами моніторингу.

Як програмну реалізацію MQTT-брoкeра для запропонованої архітектури обґрунтовано доцільність застосування Eclipse Mosquitto [1]. Порівняно з комерційними хмарними альтернативами (AWS IoT Core, Azure IoT Hub), Eclipse Mosquitto є програмним забезпеченням з відкритим кодом (ліцензія EPL/EDL), що розгортається на власній інфраструктурі замовника.



Це забезпечує повний суверенітет над даними моніторингу: вся інформація зберігається виключно на серверах державної установи та не передається на сервери іноземних корпорацій. Для системи державного екологічного моніторингу це є принциповою вимогою з точки зору інформаційної безпеки та відповідності вітчизняному законодавству про захист даних. Додатково, Eclipse Mosquitto є зрілим проєктом під егідою Eclipse Foundation (з 2009 р.), характеризується мінімальними системними вимогами, що дозволяє розгорнути брокер на наявній серверній інфраструктурі без додаткових капіталовкладень.

**Централізоване зберігання та обробка даних.** На рівні централізованої платформи, розгорнутої на власній серверній інфраструктурі державної установи, пропонується реалізувати функції довгострокового зберігання, масштабованої обробки та аналізу накопичених масивів даних моніторингу.

**Для зберігання телеметричних даних обґрунтовано вибір СКБД TimescaleDB [2].** Порівняльний аналіз трьох основних кандидатів засвідчив таке. InfluxDB є спеціалізованою часовою базою даних з високою швидкістю запису, проте обмеженою підтримкою складних реляційних запитів та відсутністю повноцінного SQL-інтерфейсу у безкоштовній версії. PostgreSQL забезпечує потужні реляційні можливості, однак не оптимізований для роботи з часовими рядами великого обсягу без додаткових розширень. TimescaleDB є розширенням PostgreSQL, яке поєднує переваги обох підходів: зберігає повну сумісність із стандартом SQL та екосистемою PostgreSQL, водночас забезпечуючи автоматичне партиціонування даних за часом (гіпертаблиці), що, за даними бенчмарків розробника, прискорює часові запити від 20х до понад 14000х порівняно зі стандартним PostgreSQL залежно від обсягу та типу запиту [3]. Додатково, TimescaleDB є програмним забезпеченням з відкритим вихідним кодом, що відповідає вимозі розгортання на власній інфраструктурі без ліцензійних відрахувань.

Окремої уваги потребує обґрунтування алгоритмів автоматичного заповнення прогалин у часових рядах, що неминуче виникають внаслідок тимчасових відмов сенсорів або втрат пакетів при передачі. Розглядаються три підходи. Метод лінійної інтерполяції є найпростішим і обчислювально дешевим: значення прогалини визначається як лінійна функція між двома сусідніми відомими значеннями. Він виправданий для коротких прогалин (до 15 – 30 хв.) за умови відносно стаціонарного стану атмосфери. Метод інтерполяції за просторово суміжними станціями передбачає використання зважених значень сусідніх вимірювальних вузлів мережі (ваги визначаються оберненою відстанню – метод IDW). Цей підхід є кращим за наявності різких локальних змін концентрацій, характерних для промислових районів міста. Для тривалих прогалин (понад 1 год.) доцільне застосування методу сезонної декомпозиції (STL-decomposition), який враховує добову та

тижневу циклічність забруднення атмосферного повітря. Запропонована ієрархія методів передбачає автоматичний вибір алгоритму залежно від тривалості прогалини та наявності даних суміжних станцій.

**Висновки.** Запропонована чотирирівнева архітектура потоків даних – сенсорна мережа, рівень граничних обчислень (Edge Computing), протокольний рівень передачі (MQTT/HTTP) та централізована платформа зберігання – забезпечує ефективну організацію інформаційних потоків в АСМ атмосфери від первинного виміру до довгострокового зберігання на власній інфраструктурі.

Застосування протоколу MQTT дозволяє мінімізувати навантаження на канали зв'язку та забезпечити надійну доставку телеметрії навіть за нестабільного з'єднання, характерного для розподілених міських мереж. Впровадження Edge Computing на рівні вимірювального вузла, за даними наукових досліджень, здатне знизити обсяг переданих даних у середньому на 50 % порівняно з передачею необроблених сигналів безпосередньо до центрального сховища. Обґрунтований вибір TimescaleDB як СКБД та ієрархія алгоритмів заповнення прогалин (лінійна інтерполяція, IDW, STL-декомпозиція) забезпечують цілісність і достовірність накопиченого архіву вимірювань. Запропоноване архітектурне рішення є масштабованим і може бути розширене для охоплення всієї агломерації м. Одеса без зміни структури центральної платформи.

### Перелік посилань

1. Eclipse Mosquitto Documentation. Eclipse Foundation. URL: <https://mosquitto.org/documentation/> (дата звернення: 01.05.2025).
2. TimescaleDB Documentation. Tiger Data (Timescale Inc.). URL: <https://www.tigerdata.com/docs> (дата звернення: 01.05.2025).
3. Booz R. PostgreSQL + TimescaleDB: 1,000x Faster Queries, 90 % Data Compression, and Much More. Tiger Data Blog. 2022. URL: <https://www.tigerdata.com/blog/postgresql-timescaledb-1000x-faster-queries-90-data-compression-and-much-more> (дата звернення: 01.05.2025).
4. Roostaei J., Wager Y.Z., Shi W., Dittrich T., Miller C., Gopalakrishnan K. IoT-based edge computing (IoTEC) for improved environmental monitoring. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2023. Vol. 39. Article 100870. DOI: 10.1016/j.suscom.2023.100870.

*Наукове видання*

**Регіональні проблеми охорони довкілля та  
збалансованого природокористування**  
Матеріали Міжнародної наукової конференції

Одеса, Україна, 16–17 квітня 2026 року

*Електронне видання мережевого використання  
(українською та англійською мовами)  
В авторській редакції*

Затв. авт. 10.07.2026. Шрифт Times New Roman  
Системні вимоги: операційна система сумісна з програмним  
забезпеченням для читання файлів формату PDF.  
Обсяг 4,1 МБ. Зам. №3230

**Видавець:**

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова  
вул. Змієнка Всеволода, буд. 2, м. Одеса, 65001, Україна  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 8592 від 23.03.2026 р.  
Тел.: (048) 723 28 39, e-mail: [druk@onu.edu.ua](mailto:druk@onu.edu.ua)