

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ





ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

№6/1, 2024

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у 2019 році

Виходить 2 рази на рік

Редакційна колегія:

Головний редактор

Улицький Олег Андрійович

Доктор геологічних наук

Науковий редактор

Машков Олег Альбертович

Доктор технічних наук

Редакційна колегія:

Гудков Д. І.

Доктор біологічних наук

Дудар Т. В.

Доктор технічних наук

Єрмаков В. М.

Доктор технічних наук

Ісаєнко В. М.

Доктор біологічних наук

Кватернюк С. М.

Доктор технічних наук

Ліханов А. Ф.

Доктор біологічних наук

Лукашов Д. В.

Доктор біологічних наук

Луньова О. В.

Доктор технічних наук

Мадж С. М.

Доктор технічних наук

Маркіна Л. М.

Доктор технічних наук

Міхеев О. М.

Доктор біологічних наук

Ольховик Ю. О.

Доктор технічних наук

Павличенко А. В.

Доктор технічних наук

Петрук В. Г.

Доктор технічних наук

Петрук Р. В.

Доктор технічних наук

Проскурнін О. А.

Доктор технічних наук

Риженко Н. О.

Доктор біологічних наук

Степова О. В.

Доктор технічних наук

Фролов В. Ф.

Доктор технічних наук

Шматков Г. Г.

Доктор біологічних наук

Літературний редактор (англійська мова)

Іващенко Катерина Тарасівна

Відповідальний редактор, науковий співробітник

Гуленко Олена Борисівна

ЗАСНОВНИК:

Корпорація «Науково-виробниче об'єднання
«Технології захисту довкілля»»

Науковий парк «ЧОРНОБИЛЬ»

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу
масової інформації КВ № 23757-13597Р від 20.02.2019 р.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань
України категорії «Б» (Галузь науки біологічні, технічні.
Спеціальність 101, 183) наказ МОН України №894 від
10.10.2022 р.

ISSN: 2707-7993

**Метою видання наукового журналу є висвітлення
питань екологічної безпеки, технологій захисту довкілля,
екологічного менеджменту та аудиту, біологічної безпеки
та охорони навколишнього природного середовища.**

Рекомендовано до друку науково-технічною радою
Корпорації «Науково-виробниче об'єднання «Технології
захисту довкілля»». Підписано до друку 20.12.2024 р.

Адреса редакції:

Вул. Вознесенський узвіз 10а, прим. 602. м. Київ, 04055

Тел: +380980625787

(контактна особа-Печений Володимир)

Електронна скринька: Corporation_office@ukr.net

Веб-сайт: <https://corpecotech.com.ua>

Видавництво ТОВ «Основа»

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи

до Державного реєстру видавців

ДК №1981 від 21.10.2004 р.

01032, м. Київ-32, вул. Жилянська, 87/30.

Тел.: (044) 584-38-97, 584-38-95(96).

Формат 60x84/8

Наклад 100 прим.

Відповідальність за достовірність фактів, цитат, власних імен, географічних назв, назв підприємств, організацій, установ та іншої інформації
несуть автори статей.

Висловлені в статтях думки можуть не збігатися з точкою зору редакційної колегії і не покладають на неї жодних зобов'язань.

Відповідальність за добір і викладення фактів несуть автори.

У разі передрукування матеріалів письмовий дозвіл автора та редакції є обов'язковим.

ЗМІСТ

ДИЧКО А.О.	АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ВПЛИВУ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА ВОДНІ ОБ'ЄКТИ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО СТАНУ	4
КОПАНИЦЯ О. Б.	ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЦЕЛЮЛОЗНО-ПАПЕРОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В КОНТЕКСТІ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ	10
НЕКОС А. Н.	АНТРОПОГЕННЕ ЗАБРУДНЕННЯ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ ВОДИ І СТАН ЕКОСИСТЕМ У КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ	21
МАШКОВ О.А., АНДРІЙЧУК Ю.М., ПРИСЯЖНИЙ В.І., ОВОДЕНКО Т.С., РОМАСЕВИЧ І.П.	ЗАСТОСУВАННЯ АЕРОКОСМІЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ЕКОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОЦІНКИ МІЖКОРДОННИХ ЕКОЛОГІЧНИХ КОНФЛІКТІВ	29
МОРОЗОВА Т.В.	ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ СКРИНІНГ ПАЛИНОТОКСИЧНОСТІ АВТОТРАНСПОРТНИХ ВИКИДІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БІОІНДИКАТОРІВ І ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ	41
ЗАРІЦЬКИЙ В. Б., КОЦЮБИНСЬКИЙ А. О., ЛИННИК Д. О., УТРИНОВСЬКИЙ І. Т., КАЛИН Т. І., ТУРЧИН О. Р.	ФІЗИКО-ХІМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БУРОВИХ ШЛАМІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА КОМПОНЕНТИ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА	49
РОМАСЕВИЧ Д.Я, РОМАСЕВИЧ І.П	АНАЛІЗ ЗАКОНОДАВЧО-НОРМАТИВНОЇ БАЗИ У СФЕРІ КЛІМАТУ. АДАПТАЦІЯ ЗАКОНОДАВСТВА ДО ЗМІН КЛІМАТУ (ЄВРОПА ТА УКРАЇНА)	57
КОЦЮБИНСЬКИЙ А. О., ЛИННИК Д. О., МАРИЧ Т. М., ГРИЦУЛЯК Г. М., ДОВГАЛЮК О. В., МЕДВІДЬ М. М	ГЕОХІМІЧНА ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ В ЗОНІ ВПЛИВУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ	69
ПОКШЕВНИЦЬКА Т.В.	ПРОБЛЕМИ РОЗПОДІЛУ ВПЛИВУ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА ВОДНІ ОБ'ЄКТИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ МІЛІТАРИЗАЦІЇ	78
МАРКІНА ЛЮДМИЛА, КОВАЛЕНКО ДАНИІЛ	ГАЗИФІКАЦІЯ ВІДХОДІВ ЯК ТЕРМОХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ	89
ГРИЦУЛЯК Г. М., КОЦЮБИНСЬКИЙ А. О., ЛЯСКОВСЬКА М. Р., ЛИННИК Д. О., КАЛИН Т. І., МЕДВІДЬ М. М.	ДОСЛІДЖЕННЯ СИНЕРГЕТИЧНОГО ЕФЕКТУ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ (RGO) ТА ЕВТЕКТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ НІТРАТУ АМОНІЮ ПРИ ТЕРМІЧНОМУ РОЗКЛАДІ	100
ВЛАСЕНКО О. КОВАЛЕНКО Д. КОВТУНОВ О.	ТЕРМІЧНА ДЕСТРУКЦІЯ ВІДХОДІВ У СИСТЕМІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ ТА КЛІМАТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ	105
ВАДИМ ГОНЧАРУК, ВАСИЛЬ ПЕТРУК	СУЧАСНА СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ ЕМІСІЄЮ ТВЕРДИХ МІКРОЧАСТИНОК: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА НОРМАТИВНОЇ БАЗИ	122

УДК 504/502

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-01>

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ВПЛИВУ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА ВОДНІ ОБ'ЄКТИ В УМОВАХ ВІЙСЬКОВОГО СТАНУ

Дичко А.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського
вул. Джона Маккейна, 33, м. Київ, 01042

Анотація. У статті здійснено аналіз підходів до оцінки впливу антропогенного забруднення на водні об'єкти України в умовах дії військового стану, коли традиційні механізми екологічного управління та контролю за станом довкілля функціонують в умовах обмежених ресурсів, часу та безпекових ризиків. Обґрунтовано, що повномасштабні бойові дії призвели до суттєвої трансформації характеру антропогенного навантаження на водні ресурси, зумовленої руйнуванням промислових підприємств, об'єктів критичної інфраструктури, систем водовідведення та очисних споруд, а також забрудненням територій продуктами військової діяльності.

Систематизовано основні джерела забруднення водних об'єктів у воєнний період, серед яких неконтрольовані скиди неочищених стічних вод, потрапляння нафтопродуктів, важких металів, токсичних і вибухонебезпечних речовин, а також зростання мікробіологічного забруднення внаслідок порушення роботи каналізаційних систем. Проаналізовано особливості проведення процедури оцінки впливу з урахуванням нормативно-правових змін, запроваджених у період військового стану, та обґрунтовано необхідність адаптації класичних підходів ОВД до умов надзвичайних ситуацій.

У роботі розглянуто вітчизняні та міжнародні підходи до вибору технічних альтернатив зменшення негативного впливу на водні екосистеми. Запропоновано напрями адаптації

критеріїв оцінки технологічних рішень, що передбачають поєднання екологічної ефективності, економічної доцільності, швидкості впровадження та надійності експлуатації в умовах військового стану. Отримані результати можуть бути використані при плануванні заходів з відновлення та захисту водних ресурсів у воєнний і післявоєнний періоди.

Ключові слова: водні об'єкти, антропогенне забруднення, оцінка впливу на довкілля, технічні альтернативи, критерії оцінки, умови військового стану.

Analysis of approaches to assessing the impact of anthropogenic pollution on water bodies under martial law conditions.

Dychko A. O. The article analyzes approaches to assessing the impact of anthropogenic pollution on water bodies of Ukraine under martial law, when traditional mechanisms of environmental management and environmental control operate under conditions of limited resources, time constraints, and increased security risks. It is substantiated that full-scale hostilities have led to a significant transformation in the nature of anthropogenic pressure on water resources, caused by the destruction of industrial enterprises, critical infrastructure facilities, wastewater collection systems, and treatment plants, as well as contamination of territories with products of military activities.

The main sources of pollution of water bodies during the wartime period are systematized, including uncontrolled discharges of untreated wastewater, contamination by petroleum products, heavy

metals, toxic and explosive substances, as well as increased microbiological pollution resulting from the disruption of sewerage systems. The specific features of conducting impact assessment procedures are analyzed with regard to regulatory and legal changes introduced during martial law, and the necessity of adapting classical environmental impact assessment approaches to emergency conditions is substantiated.

The paper examines domestic and international approaches to the selection of technical alternatives aimed at reducing negative impacts on aquatic ecosystems. Directions for adapting the criteria for evaluating technological solutions are proposed, which involve a combination of environmental efficiency, economic feasibility, implementation speed, and operational reliability under martial law conditions. The obtained results can be used in planning measures for the restoration and protection of water resources during wartime and post-war periods.

Keywords: water bodies, anthropogenic pollution, environmental impact assessment, technical alternatives, evaluation criteria, martial law conditions.

Постановка проблеми: Водні ресурси відіграють ключову роль у забезпеченні життєдіяльності населення та функціонування економіки України. Однак, водні об'єкти зазнають постійного антропогенного навантаження від промислових, комунальних та сільськогосподарських джерел.

Умови повномасштабного військового вторгнення створили додаткові загрози для водних екосистем. Руйнування промислової та комунальної інфраструктури, пошкодження очисних споруд, забруднення території продуктами військової діяльності призводять до надходження значних обсягів забруднюючих речовин у водні об'єкти. За оцінками вітчизняних та міжнародних експертів, значна частина території України зазнала потенційного екологічного забруднення внаслідок бойових дій.

Процедура оцінки впливу на довкілля (ОВД), передбачена Законом України «Про оцінку впливу на довкілля», набуває особливого значення при плануванні заходів з відновлення водогосподарської інфраструктури. Водночас військовий стан вимагає адаптації існуючих методологічних підходів до умов обмежених ресурсів, скорочених термінів та підвищених ризиків.

Актуальність дослідження зумовлена зростанням антропогенного навантаження на водні об'єкти України в умовах військового стану, що супроводжується руйнуванням водогосподарської інфраструктури, порушенням роботи очисних споруд та підвищенням ризиків екологічного забруднення. Необхідність адаптації існуючих підходів до оцінки впливу на довкілля та вибору технічних рішень до умов надзвичайних ситуацій визначає практичну й наукову значущість проведеного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика оцінки впливу антропогенних факторів на водні об'єкти широко висвітлена у вітчизняній та зарубіжній науковій літературі. Фундаментальні дослідження якості води та екологічного стану водних екосистем України представлені в роботах Романенка В. Д., Хільчевського В. К., Осадчого В. І. Автори досліджують динаміку гідрохімічних показників, процеси евтрофікації, вплив точкових та дифузних джерел забруднення.

Методологічні аспекти проведення ОВД для об'єктів водного господарства розглянуті в публікаціях Мокіна В. Б., Васенка О. Г., Сташука В. А. Зокрема, розроблені підходи до оцінки впливу на поверхневі та підземні води, визначення рівня екологічного ризику, обґрунтування компенсаційних заходів.

Міжнародний досвід оцінки екологічних наслідків збройних конфліктів узагальнено в звітах UNEP (Програма ООН з навколишнього середовища), OSCE та інших організацій. Проаналізовано наслідки військових дій

на Балканах, Близькому Сході, в Афганістані. Експерти відзначають, що забруднення водних ресурсів є одним з найбільш довготривалих негативних наслідків збройних конфліктів.

Питання вибору технологічних рішень для очищення стічних вод розглянуті в працях Запольського А. К., Душкіна С. С., Гвоздяка П. І. Автори аналізують різні методи біологічного, фізико-хімічного та комбінованого очищення, їх ефективність, економічні та експлуатаційні характеристики.

Водночас у науковій літературі недостатньо висвітлені питання адаптації процедур ОВД та критеріїв вибору технічних рішень до умов військового стану. Відсутні комплексні дослідження, що враховують специфіку воєнного часу: обмеженість ресурсів, необхідність швидкого впровадження, підвищені вимоги до надійності та безпеки систем.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями полягає у розвитку та узагальненні підходів до оцінки впливу антропогенного забруднення на водні об'єкти з урахуванням специфіки умов військового стану. Отримані результати можуть бути використані при вдосконаленні методології оцінки впливу на довкілля, обґрунтуванні вибору технічних альтернатив для відновлення водогосподарських об'єктів, а також у практиці прийняття управлінських рішень у сфері охорони та відновлення водних ресурсів.

Мета роботи полягає в аналізі існуючих підходів до оцінки впливу антропогенного забруднення на водні об'єкти та визначенні напрямів адаптації методології вибору технічних альтернатив для умов військового стану.

Матеріали і методи дослідження. У дослідженні використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів. Застосовано метод системного аналізу для вивчення взаємозв'язків між факторами впливу на водні об'єкти та можливими технічними рішеннями. Метод порівняльного аналізу використано для

дослідження вітчизняного та міжнародного досвіду проведення екологічної оцінки в конфліктних зонах.

Інформаційною базою дослідження стали дані Державного агентства водних ресурсів України, матеріали звітів про ОВД, розміщені у Єдиному реєстрі з оцінки впливу на довкілля, звіти міжнародних організацій (UNEP, OSCE, WHO) щодо екологічних наслідків збройних конфліктів, а також наукові публікації з проблематики управління водними ресурсами та технологій водоочищення.

Аналіз нормативно-правової бази включав вивчення Закону України «Про оцінку впливу на довкілля», Водного кодексу України, постанов Кабінету Міністрів України щодо спрощення процедур ОВД в умовах воєнного стану, державних будівельних норм та санітарних правил у сфері водопостачання та водовідведення.

Результати дослідження. Дослідження впливу збройних конфліктів на водні ресурси демонструють, що механізми забруднення включають як прямі наслідки бойових дій (пошкодження інфраструктури, потрапляння вибухових залишків у водні об'єкти), так і непрямі ефекти, що виникають унаслідок руйнування очисних споруд та систем водовідведення [1-3].

До первинних джерел належать:

- вибухові речовини та продукти їх детонації, що потрапляють у водні об'єкти внаслідок бойових дій;

- важкі метали з боєприпасів та військової техніки;

- паливно-мастильні матеріали від пошкодженої військової та цивільної техніки;

- забруднення від руйнування об'єктів подвійного призначення.

Вторинні джерела включають:

- неочищені стічні води через пошкодження або неналежну роботу очисних споруд;

- промислові забруднюючі речовини від зруйнованих підприємств;

- забруднення від пошкоджених сховищ небезпечних відходів;

- аварійні скиди з водосховищ та гідротехнічних споруд;
- мікробіологічне забруднення через порушення систем каналізації.

За даними моніторингових та наукових досліджень, у водних об'єктах постраждалих регіонів України зафіксовано багаторазові перевищення гранично допустимих концентрацій окремих забруднюючих речовин, зокрема важких металів, нафтопродуктів і сполук азоту [1, 3].

Процедура оцінки впливу на довкілля, встановлена Законом України від 23.05.2017 № 2059-VIII, передбачає детальний аналіз можливих наслідків планованої діяльності для довкілля [4]. Однак умови військового стану вносять суттєві корективи в цю процедуру.

Відповідно до постанов Кабінету Міністрів України, прийнятих у 2022-2024 роках, для об'єктів критичної інфраструктури та проектів швидкого відновлення передбачено спрощену процедуру ОВД. Скорочено терміни підготовки звітів, зменшено вимоги до обсягу документації, дозволено використання дистанційних методів обстеження територій [5-7].

Водночас залишаються обов'язковими ключові елементи оцінки: аналіз альтернативних варіантів реалізації проекту, оцінка можливого впливу на компоненти довкілля (включаючи водні об'єкти), розробка заходів мінімізації негативного впливу, проведення громадського обговорення.

Для водогосподарських об'єктів особливо важливим є аналіз впливу на якість поверхневих та підземних вод, водні екосистеми, прибережні зони. Оцінка має враховувати як безпосередній вплив під час будівництва або реконструкції, так і довгостроковий вплив під час експлуатації.

Аналіз літератури та практичного досвіду показує, що вибір технічних рішень для захисту та управління водними об'єктами часто здійснюється на основі багатокритеріального підходу, що дозволяє порівнювати різні альтернативи з урахуванням комплексних екологічних,

економічних та технічних критеріїв. У міжнародній практиці найбільш поширеними є підходи, що базуються на концепції найкращих доступних технологій (Best Available Techniques, BAT). Ця концепція передбачає вибір рішень, що забезпечують високий рівень захисту довкілля при економічно обґрунтованих витратах [8-10].

Європейські довідники BAT для очистки стічних вод рекомендують враховувати технічну ефективність, екологічні переваги, економічну доцільність, можливість впровадження в конкретних умовах. Однак ці документи розроблені для стандартних умов експлуатації та не враховують специфіку надзвичайних ситуацій [11].

Дослідження UNEP щодо відновлення довкілля в постконфліктних зонах виділяють додаткові чинники: швидкість впровадження, надійність роботи в умовах обмеженого обслуговування, стійкість до можливих пошкоджень, доступність обладнання та матеріалів [12].

У дослідженнях, присвячених відновленню інфраструктури в постконфліктних регіонах, особливу увагу приділено питанням логістики та доступності ресурсів. Фахівці відзначають, що обмеження на постачання обладнання та матеріалів можуть стати критичним фактором, що визначає вибір технологічних рішень, незалежно від їх теоретичної ефективності.

Аналіз літератури також виявляє підхід поетапного впровадження технологій, коли системи проєктуються з можливістю модульного розширення. Такий підхід розглядається як компроміс між необхідністю швидкого запуску базового функціоналу та можливістю подальшого вдосконалення системи. Водночас, різні автори по-різному оцінюють баланс між короткостроковою та довгостроковою ефективністю таких рішень.

Проведене дослідження показало, що проблема оцінки впливу на водні об'єкти в умовах військового стану є

комплексною та потребує міждисциплінарного підходу. Існуючі методології оцінки, розроблені для стандартних умов, не повною мірою враховують специфіку надзвичайних ситуацій.

Міжнародний досвід постконфліктного відновлення (Боснія і Герцеговина, Косово, Ірак) свідчить про необхідність балансу між швидкістю впровадження рішень та їх довгостроковою ефективністю [13-15]. Надмірне спрощення процедур може призвести до вибору неоптимальних рішень, тоді як надто деталізований аналіз затримує впровадження критично необхідних заходів.

Важливим висновком є необхідність диференційованого підходу залежно від масштабу та терміновості проєкту. Для об'єктів, що потребують негайного відновлення (аварійні ситуації з загрозою епідемій), можлива реалізація тимчасових рішень з подальшою модернізацією. Для проєктів середньострокового планування доцільним є більш ретельний аналіз альтернатив.

Обмеженням дослідження є недостатність статистичних даних про фактичний стан водних об'єктів на тимчасово окупованих та деокупованих територіях. Систематичний моніторинг ускладнений через безпекову ситуацію. Це створює невизначеність при оцінці масштабів забруднення та потреби у відновлювальних заходах.

Перспективним напрямом є розробка автоматизованих систем підтримки прийняття рішень, що дозволять оперативно оцінювати альтернативні варіанти на основі актуальних даних про екологічний стан, доступність ресурсів, безпекову ситуацію.

Висновки. За результатами проведеного дослідження встановлено, що антропогенне забруднення водних об'єктів в умовах військового стану є комплексною проблемою, що поєднує екологічні, соціальні та технологічні аспекти. Воєнні дії створюють специфічні джерела забруднення та руйнують

існуючу природоохоронну інфраструктуру, що вимагає переосмислення традиційних підходів до оцінки впливу на довкілля.

Аналіз літературних джерел та міжнародного досвіду показав, що процедури оцінки впливу на довкілля в умовах надзвичайних ситуацій характеризуються необхідністю балансу між ґрунтовністю аналізу та оперативністю прийняття рішень. Вітчизняна нормативно-правова база передбачає адаптацію процедур ОВД до умов воєнного стану, зберігаючи при цьому основні принципи екологічної оцінки.

Систематизація існуючих підходів до вибору природоохоронних рішень виявила різноманітність критеріїв та методологій оцінки, запропонованих різними дослідниками. Відсутність уніфікованого підходу до врахування специфіки військового стану свідчить про необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Результати дослідження створюють теоретичне підґрунтя для розробки спеціалізованих методологій оцінки та прийняття рішень щодо захисту водних ресурсів в умовах збройних конфліктів. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою конкретних методичних підходів, адаптованих до реалій воєнного часу.

Список використаних джерел

1. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., De Meester, L., Stepanenko, S., & Gleick, P. (2023). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6(5), 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01075-4>.
2. Kuzyk, A. D., Boichuk, B. Ya., Korol, K. A., & Dyrda, R. O. (2024). The impact of military actions on water quality in rivers of Ukraine. *Bulletin of Lviv State University of Life Safety*, 30, Article 04. <https://doi.org/10.32447/20784643.30.2024.04>.

3. Schillinger, J., Özerol, G., Güven-Griemert, Ş., & Heldeweg, M. (2020). Water in war: Understanding the impacts of armed conflict on water resources and their management. *WIREs Water*, 7(6), e1480. <https://doi.org/10.1002/wat2.1480>.
 4. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017 № 2059-VIII.
 5. Кабінет Міністрів України. Постанова від 31 травня 2022 р. № 643 «Деякі питання здійснення планової діяльності в умовах воєнного стану». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/643-2022>.
 6. Кабінет Міністрів України. Постанова від 4 серпня 2023 р. № 818 «Деякі питання забезпечення функціонування об'єктів критичної інфраструктури». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/818-2023>.
 7. Верховна Рада України. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення та цифровізації процедури оцінки впливу на довкілля» від 13.07.2023 № 3227-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3227-20>.
 8. Macchiaroli, M., Dolores, L., & De Mare, G. (2023). Multicriteria decision making and water infrastructure: An application of the analytic hierarchy process for a sustainable ranking of investments. *Applied Sciences*, 13(14), 8284. <https://doi.org/10.3390/app13148284>.
 9. Armas Vargas, F. (2023). Water and environmental resources: A multi-criteria analysis of management frameworks. *Water*, 15(16), 2991. <https://doi.org/10.3390/w15162991>.
 10. Garai, T. (2022). Multi-criteria decision making of water resource management problems. *Expert Systems with Applications*, 201, 117096. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117096>.
 11. European Commission. (2018). Best Available Techniques (BAT) reference document for waste water treatment in the chemical sector. Publications Office of the European Union. <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/waste-water-treatment-chemical-sector>.
 12. United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). Environmental impact assessment in conflict-affected and fragile contexts: Guidance for rapid environmental assessment. Nairobi: UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-assessment-conflict-affected-and-fragile-context>.
 13. United Nations Environment Programme (UNEP). (2007). *After the conflict: Assessment of environmental hot spots in Iraq*. Nairobi: UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/after-conflict-assessment-environmental-hot-spots-iraq>.
 14. United Nations Environment Programme (UNEP). (2003). *Bosnia and Herzegovina post-conflict environmental assessment*. Nairobi: UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/bosnia-and-herzegovina-post-conflict-environmental-assessment>.
 15. United Nations Environment Programme (UNEP). (2001). *Post-conflict environmental assessment: Kosovo*. Nairobi: UNEP. <https://www.unep.org/resources/report/post-conflict-environmental-assessment-kosovo>.
-
-

УДК 628.31

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-02>

ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ЦЕЛЮЛОЗНО-ПАПЕРОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ В КОНТЕКСТІ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ

Копаниця Олексій Борисович

Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

Анотація. Целюлозно-паперова промисловість належить до найбільш водоемних галузей економіки та створює значне навантаження на водні ресурси через утворення великих обсягів забруднених стічних вод. Стаття присвячена аналізу сучасного стану очищення стічних вод підприємств целюлозно-паперової промисловості України та визначенню перспективних напрямів вдосконалення систем водоочищення в контексті євроінтеграційних процесів. Метою дослідження є оцінка екологічних проблем, пов'язаних із скиданням недостатньо очищених стічних вод целюлозно-паперових підприємств, та визначення шляхів імплементації сучасних технологій очищення відповідно до вимог європейського законодавства. У роботі проаналізовано характеристики забруднювачів стічних вод целюлозно-паперових підприємств, включаючи високий вміст органічних речовин, лігніну, целюлози, токсичних хімікатів та підвищене біохімічне споживання кисню. Розглянуто традиційні методи очищення (механічні, хімічні, біологічні) та сучасні технології третинного очищення, зокрема озонування, мембранну фільтрацію, адсорбцію на активованому вугіллі та комбіновані гібридні системи. Проведено порівняльний аналіз ефективності різних технологічних схем очищення з урахуванням економічних та екологічних показників. Особливу увагу приділено

аналізу нового законодавства Європейського Союзу, зокрема переглянутої Директиви 2024/3019 про очищення міських стічних вод, яка встановлює жорсткіші вимоги до видалення біогенних речовин та мікрозабруднювачів. Визначено ключові виклики для української целюлозно-паперової промисловості, включаючи застаріле обладнання очисних споруд, недостатність впровадження замкнених систем водопостачання та необхідність значних капіталовкладень у модернізацію. Запропоновано стратегічні напрями розвитку систем водоочищення на підприємствах галузі, що включають поетапне впровадження найкращих доступних технологій, створення систем повторного використання очищених стічних вод та досягнення енергетичної нейтральності очисних споруд відповідно до європейських стандартів. Результати дослідження можуть бути використані для розробки національної стратегії модернізації очисних споруд целюлозно-паперових підприємств та імплементації відповідного європейського законодавства в процесі підготовки України до вступу в Європейський Союз.

Ключові слова: целюлозно-паперова промисловість, очищення стічних вод, третинне очищення, озонування, мембранні технології, європейське екологічне законодавство, найкращі доступні технології.

PROBLEMS AND PROSPECTS OF WASTEWATER TREATMENT IN PULP AND PAPER INDUSTRY IN THE CONTEXT OF UKRAINE'S EUROPEAN INTEGRATION

Abstract. The pulp and paper industry is one of the most water-intensive sectors of the economy and creates significant pressure on water resources through the generation of large volumes of polluted wastewater. The article analyzes the current state of wastewater treatment at Ukrainian pulp and paper enterprises and identifies promising directions for improving water treatment systems in the context of European integration processes. The aim of the study is to assess environmental problems associated with the discharge of inadequately treated wastewater from pulp and paper enterprises and to determine ways of implementing modern treatment technologies in accordance with European legislation requirements. The work analyzes the characteristics of pollutants in pulp and paper wastewater, including high content of organic substances, lignin, cellulose, toxic chemicals, and increased biochemical oxygen demand. Traditional treatment methods (mechanical, chemical, biological) and modern tertiary treatment technologies, including ozonation, membrane filtration, activated carbon adsorption, and combined hybrid systems are considered. A comparative analysis of the effectiveness of different technological treatment schemes is conducted, taking into account economic and environmental indicators. Special attention is paid to the analysis of new European Union legislation, particularly the revised Directive 2024/3019 on urban wastewater treatment, which establishes stricter requirements for the removal of nutrients and micropollutants. Key challenges for the Ukrainian pulp and paper industry are identified, including outdated wastewater treatment equipment, insufficient implementation of closed water supply systems, and the need for significant investment in modernization. Strategic directions for the development of water

treatment systems at industry enterprises are proposed, including phased implementation of best available techniques, creation of treated wastewater reuse systems, and achievement of energy neutrality of treatment plants in accordance with European standards. The research results can be used to develop a national strategy for modernizing treatment facilities of pulp and paper enterprises and implementing relevant European legislation in the process of preparing Ukraine for accession to the European Union.

Keywords: pulp and paper industry, wastewater treatment, tertiary treatment, ozonation, membrane technologies, European environmental legislation, best available techniques.

Постановка проблеми.

Целюлозно-паперова промисловість є однією з найбільш водоемних галузей світової економіки та створює значне навантаження на водні екосистеми через утворення великих обсягів забруднених стічних вод. За даними міжнародних досліджень, на виробництво однієї тонни паперу витрачається від 40 до 80 м³ води, що зумовлює формування відповідних обсягів стічних вод із складом забруднювачів, які становлять загрозу для навколишнього середовища та здоров'я населення [1].

В Україні целюлозно-паперова промисловість (ЦПП) налічує близько 100 підприємств, проте розвинена недостатньо і не задовольняє потреб економіки та населення [2]. Більшість підприємств галузі експлуатують фізично та морально застаріле обладнання та очисні споруди, які не забезпечують належного рівня очищення стічних вод відповідно до сучасних екологічних вимог [3]. За результатами моніторингу водних об'єктів України, значна кількість річок

мають порушення за хімічними показниками [4]. Саме стоки ЦПП суттєво забруднюють водне середовище й важко доводяться до нормативів, тому їхній внесок у загальне промислове забруднення об'єктивно великий [5].

В контексті євроінтеграції України та підготовки до вступу в Європейський Союз актуальності набуває проблема гармонізації національного екологічного законодавства з європейськими нормами та імплементації найкращих доступних технологій (НДТ) очищення стічних вод. Новий перегляд Директиви ЄС про очищення міських стічних вод (Директива 2024/3019), прийнятий у листопаді 2024 року, встановлює ще жорсткіші вимоги до якості очищених стічних вод, включаючи необхідність видалення мікрозабруднювачів та досягнення енергетичної нейтральності очисних споруд до 2045 року [6].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо модернізації систем очищення стічних вод на підприємствах целюлозно-паперової промисловості України для досягнення відповідності європейським екологічним стандартам та забезпечення сталого розвитку галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика очищення стічних вод целюлозно-паперової промисловості є предметом активних наукових досліджень у світі. За результатами комплексного огляду проблем очищення стічних вод ЦПП встановлено, ця галузь продовжує генерувати значні обсяги стічних вод, характер забруднення яких залежить від типу сировини, технологічних процесів та кінцевої продукції [1]. Автори наголошують на важливості сталого використання та безпечної обробки стічних вод для зменшення екологічного навантаження та підвищення ефективності використання ресурсів.

Сучасні дослідження фокусуються на розробці та впровадженні передових методів очищення стічних вод. За результатами досліджень доведено високу ефективність послідовного застосування озонування та біологічного очищення для деструкції токсичних органічних сполук у стічних водах ЦПП [7]. Озонування як стадія попередньої обробки дозволяє трансформувати вихідні забруднювачі у менш токсичні сполуки з низькою молекулярною масою, ефективно руйнує лігнін та фенольні сполуки після чого стоки стають менш токсичними, а Подальше біологічне очищення забезпечує мінералізацію 80–90% для ЦПП-стоків [8].

Порівняння різних методів, таких як коагуляція-флокуляція, озонування, комбінація озонування з гранульованим активованим вугіллям (O_3+GAC) та мембранна система ультрафільтрації зі зворотним осмосом ($UF+RO$), для очищення стічних вод ЦПП довело, що комбінація O_3+GAC є найбільш привабливою з екологічної та економічної точок зору, особливо при повторному використанні очищених стічних вод [9].

Важливий внесок у розуміння специфіки очищення стічних вод целюлозно-паперової промисловості зробили дослідники, які вивчали інноваційні біологічні методи. Зокрема, застосування мембранних біореакторів (MBR) та реакторів з рухомим біоплівковим завантаженням (MBBR) демонструє високу ефективність у видаленні органічних забруднювачів та створює можливості для енергетичного відновлення та рециркуляції води [10].

Однак, попри наявність численних наукових досліджень світового рівня, в Україні бракує комплексних праць, які б аналізували стан очищення стічних вод целюлозно-паперової промисловості з урахуванням специфіки вітчизняних підприємств та

викликів євроінтеграції. Недостатньо висвітленими залишаються питання економічної доцільності впровадження сучасних технологій очищення в умовах обмежених фінансових ресурсів та необхідності поетапної модернізації виробничих потужностей.

Визначення цілей статті. Метою статті є аналіз сучасного стану систем очищення стічних вод на підприємствах целюлозно-паперової промисловості України, оцінка їх відповідності європейським екологічним стандартам та визначення пріоритетних напрямів модернізації в контексті підготовки до вступу України в Європейський Союз.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Проаналізувати характеристики забруднювачів стічних вод целюлозно-паперових підприємств та їх вплив на водні екосистеми.

2. Дослідити традиційні та сучасні технології очищення стічних вод, що застосовуються у світовій практиці.

3. Оцінити стан впровадження систем очищення стічних вод на підприємствах целюлозно-паперової промисловості України.

4. Проаналізувати вимоги нового екологічного законодавства ЄС до очищення стічних вод.

5. Визначити стратегічні напрями вдосконалення систем водоочищення для досягнення відповідності європейським стандартам.

Виклад основного матеріалу дослідження

Стічні води целюлозно-паперових підприємств характеризуються складним та різноманітним складом забруднювачів, що визначається типом використовуваної сировини, специфікою технологічних процесів, видом кінцевої продукції та режимом водокористування.

Стічні води ЦПП характеризуються складним багатоконпонентним складом забруднювачів (рис. 1).

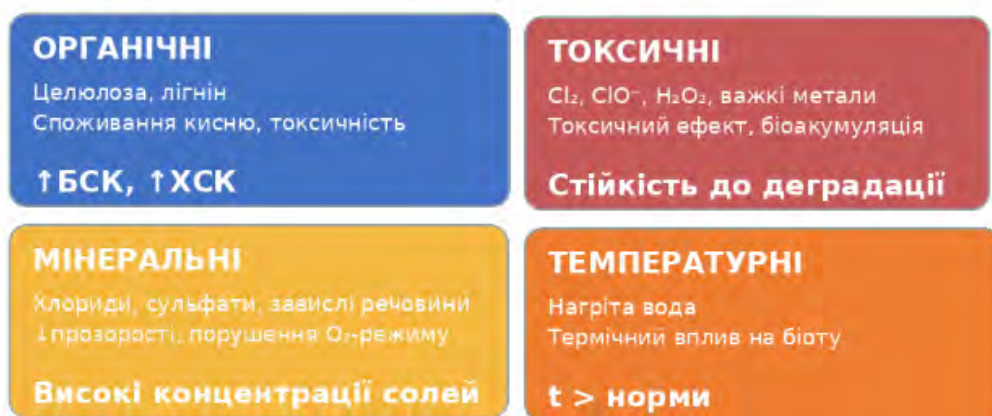


Рис. 1. Характеристика основних забруднювачів стічних вод целюлозно-паперових підприємств

Джерело: розробка автора

До основних категорій забруднювачів належать органічні речовини, представлені целюлозою, лігніном та їх похідними. Ці сполуки є причиною підвищеного біохімічного споживання кисню (БСК) та хімічного споживання кисню (ХСК) у стічних водах [5]. Лігнін та його похідні надають

стічним водам характерного коричневого забарвлення та специфічного запаху, а також чинять токсичний вплив на водні організми.

Токсичні речовини у складі стічних вод представлені хімічними реагентами, що застосовуються у виробництві: хлор, гіпохлорити,

пероксид водню, сполуки важких металів [11]. Особливу небезпеку становлять хлорорганічні сполуки, що утворюються при відбілюванні целюлози з використанням хлорвмісних реагентів. Ці речовини характеризуються високою стійкістю до біологічної деструкції та здатністю до біоаккумуляції у водних екосистемах [7].

Мінеральне забруднення стічних вод включає підвищений вміст солей (хлориди, сульфати), що порушує сольовий баланс водойм-приймачів. Високі концентрації завислих речовин (наповнювачі, волокна, барвники) спричиняють зниження прозорості води

та порушення кисневого режиму через утруднення процесів фотосинтезу та реаерації. Температурне забруднення також є характерним для ЦПП, оскільки багато технологічних процесів потребують нагрівання води, яка потім скидається у водойми з підвищеною температурою, що негативно впливає на гідробіоти [1].

Традиційні методи очищення стічних вод

Традиційна схема очищення стічних вод целюлозно-паперових підприємств включає три основні стадії: механічне, фізико-хімічне та біологічне очищення (рис. 2).



Рис. 2. Основні стадії очищення стічних вод целюлозно-паперових підприємств та їх ефективність

Джерело: розробка автора

Механічне очищення передбачає видалення завислих речовин великого розміру та волокнистих включень шляхом процідження через решітки та відстоювання у первинних відстійниках. Ця стадія дозволяє вилучити до 60-70% завислих речовин та зменшити навантаження на наступні ступені очищення.

Фізико-хімічне очищення включає процеси коагуляції та флокуляції для видалення колоїдних та дрібнодисперсних забруднювачів. Застосування коагулянтів (сульфат алюмінію, хлорид заліза) та флокулянтів (синтетичні полімери) дозволяє

агрегувати дрібні частинки у великі флокули, які легко осідають у вторинних відстійниках. Ефективність видалення завислих речовин на цій стадії може сягати 85-95%.

Біологічне очищення є основною стадією деструкції органічних забруднювачів. Найпоширенішими спорудами біологічного очищення є аеротенки з системою активного мулу. Колонія мікроорганізмів активного мулу здійснює окиснення органічних речовин у присутності кисню, який подається системою аерації. Ефективність видалення БСК₅ у правильно експлуатованих аеротенках досягає 85-

95% [10]. Однак традиційні біологічні методи мають обмежену ефективність щодо видалення стійких органічних сполук, лігніну та хлорорганічних речовин.

Для досягнення високого ступеня очищення стічних вод ЦПП та відповідності жорстким екологічним вимогам необхідне застосування третинного (глибокого) очищення. (рис. 3).



Рис. 3. Сучасні технології третинного очищення стічних вод ЦПП

Джерело: розробка автора

Озонування є одним з найефективніших методів деструкції стійких органічних сполук та знебарвлення стічних вод. Озон володіє високим окисно-відновним потенціалом (2,07 В) та здатний руйнувати складні молекулярні структури лігніну та його похідних. Встановлено, що попереднє озонування стічних вод протягом 30-60 хвилин дозволяє трансформувати токсичні органічні сполуки у низькомолекулярні органічні кислоти, які легко піддаються подальшій біологічній деструкції [7].

Комбінована система озонування з адсорбцією на гранульованому активованому вугіллі (O₃+GAC) демонструє найвищу ефективність серед досліджених технологій третинного очищення. Ця система O₃+GAC має найкращі показники як з екологічної, так і з економічної точки зору [9]. Озонування забезпечує окиснення та деструкцію органічних сполук, а наступна адсорбція на активованому вугіллі видаляє залишкові забруднювачі та продукти неповного окиснення. Така комбінація дозволяє досягти ступеня видалення ХСК до 90-95% та забезпечити високу якість

очищених стічних вод, придатних для повторного використання у виробничих процесах [12].

Мембранні технології (ультрафільтрація, нанофільтрація, зворотний осмос) забезпечують високий ступінь очищення завдяки бар'єрному механізму розділення. Система ультрафільтрації зі зворотним осмосом (UF+RO) здатна видаляти практично всі забруднювачі, включаючи розчинені мінеральні солі, та забезпечувати якість очищеної води на рівні технічної або навіть питної води. Однак високе енергоспоживання мембранних систем (пов'язане з необхідністю створення високого тиску) обмежує їх широке застосування [9].

Інноваційні біологічні системи, зокрема мембранні біореактори (MBR) та реактори з рухомим біоплівковим завантаженням (MBBR), дозволяють інтенсифікувати процеси біологічного очищення та досягти більш високих показників видалення забруднювачів при менших габаритах споруд. У MBR біологічне очищення поєднується з мембранною фільтрацією, що дозволяє

повністю утримувати активний мул у реакторі та досягти його високої концентрації (8-12 г/л проти 3-4 г/л у традиційних аеротенках), забезпечуючи тим самим більш ефективне окиснення органічних речовин [10].

В Україні ЦПП представлена близько 100 підприємствами різної потужності, серед яких найбільшими є Жидачівський целюлозно-паперовий комбінат (Львівська область), Київський картонно-паперовий комбінат в Обухові (частка у випуску продукції галузі становить близько 30%), Херсонський целюлозно-паперовий комбінат, Корюківська фабрика технічних паперів (Чернігівська область). Основні центри целюлозно-паперової промисловості розташовані в Житомирській, Хмельницькій, Львівській, Закарпатській, Київській та Чернігівській областях.

Технічний стан очисних споруд на підприємствах ЦПП України залишається незадовільним. Значна частина обладнання експлуатується понад 30-40 років без капітальної модернізації, що унеможливорює досягнення сучасних нормативів якості очищення стічних вод [3]. Результатом є хронічні порушення екологічних вимог та негативний вплив на стан водних екосистем.

Однією з ключових проблем є недостатнє впровадження замкнутих та оборотних систем водопостачання на підприємствах галузі. Більшість підприємств використовують пряме водокористування, що призводить до нераціонального використання водних ресурсів та утворення великих обсягів стічних вод. Впровадження систем повторного використання очищених стічних вод могло б суттєво зменшити водоспоживання та скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти [13].

Європейський Союз постійно посилює вимоги до якості очищених стічних вод та захисту водних ресурсів. У листопаді 2024 року Європейським Парламентом та Радою ЄС було прийнято переглянуту Директиву 2024/3019 про очищення міських стічних вод, яка набуває

чинності з 1 серпня 2027 року [6]. Ця Директива встановлює значно жорсткіші вимоги порівняно з попередньою версією 1991 року та передбачає комплексний підхід до управління стічними водами в рамках концепції Європейського зеленого курсу та плану дій щодо нульового забруднення.

Ключові положення нової Директиви включають розширення сфери застосування на агломерації від 1000 еквівалентів жителів (раніше було 2000), що означає необхідність будівництва або модернізації очисних споруд у менших населених пунктах. Встановлено обов'язок впровадження третинного очищення для видалення біогенних речовин (азоту та фосфору) до 2039 року для всіх очисних споруд потужністю понад 150 000 еквівалентів жителів, а до 2045 року – для споруд понад 10 000 еквівалентів жителів у зонах, чутливих до евтрофікації. Це особливо важливо для запобігання евтрофікації водойм, яка є серйозною екологічною проблемою для багатьох водних об'єктів України [6].

Принципово новою вимогою є необхідність впровадження систем глибокого очищення для видалення мікрозабруднювачів, зокрема залишків фармацевтичних препаратів, засобів особистої гігієни, пестицидів. Згідно з принципом «забруднювач платить», виробники продукції, що призводить до забруднення стічних вод мікрополіюантами (фармацевтична та косметична промисловість), мають покривати щонайменше 80% витрат на додаткове очищення через систему розширеної відповідальності виробника [6]. Важливою вимогою є сприяння повторному використанню очищених стічних вод, особливо у регіонах з дефіцитом водних ресурсів. Директива доповнює Регламент ЄС про повторне використання води, встановлюючи вимоги до якості та безпеки води для різних цілей використання, насамперед для зрошення в сільському господарстві. Це дозволяє зменшити забір свіжої води та сприяє циркулярній економіці [14].

Для досягнення відповідності вимогам європейського законодавства та забезпечення сталого розвитку целюлозно-паперової промисловості України необхідна комплексна модернізація систем водоочищення на підприємствах галузі. Стратегія модернізації повинна базуватися на концепції найкращих доступних технологій (НДТ) та передбачати поетапне впровадження сучасних методів очищення з урахуванням економічних можливостей підприємств.

Першочерговим завданням є модернізація існуючих споруд механічного та біологічного очищення для забезпечення їх стабільної та ефективної роботи. Це включає заміну зношеного обладнання, впровадження автоматизованих систем контролю та управління технологічними процесами, оптимізацію режимів роботи аеротенків та відстійників. Такі заходи дозволять підвищити ефективність видалення забруднювачів на 15-25% без значних капітальних вкладень.

На другому етапі необхідне впровадження систем третинного очищення для видалення стійких органічних сполук, лігніну, біогенних речовин. З урахуванням результатів міжнародних досліджень, найбільш доцільним є застосування комбінованої системи озонування з адсорбцією на гранульованому активованому вугіллі ($O_3 + GAC$) [9]. Альтернативним варіантом для невеликих підприємств може бути застосування систем на основі мембранних біореакторів, які компактні та забезпечують стабільно високу якість очищених стічних вод.

Важливим напрямом є впровадження замкнених та оборотних систем водопостачання з максимальним повторним використанням очищених стічних вод у виробничих процесах. Це дозволить суттєво зменшити споживання свіжої води (на 40-60%) та обсяги скидів у водні об'єкти. Для технічних потреб – охолодження обладнання, підготовки сировини – може застосовуватись вода після вторинного або третинного

очищення, що зменшує навантаження на природні водойми [15].

Досягнення енергетичної нейтральності очисних споруд передбачає комплекс заходів з енергозбереження та виробництва енергії з відновлюваних джерел, зокрема впровадження енергоефективного обладнання, оптимізацію режимів аерації, утилізацію біогазу з метантенків для виробництва електроенергії та тепла, встановлення сонячних панелей. Згідно з досвідом європейських країн, такі заходи дозволяють зменшити споживання електроенергії на 30-50% та досягти енергетичної незалежності очисних споруд [16].

Фінансування модернізації очисних споруд може здійснюватися за рахунок різних джерел: власних коштів підприємств, кредитів міжнародних фінансових організацій, грантів у рамках програм міжнародної технічної допомоги, коштів державного та місцевих бюджетів. В контексті підготовки до вступу в ЄС Україна може розраховувати на фінансову підтримку в рамках інструменту Ukraine Facility обсягом 50 млрд євро, частина якого може бути спрямована на модернізацію екологічної інфраструктури, включаючи очисні споруди [17].

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки щодо проблем та перспектив очищення стічних вод целюлозно-паперової промисловості України в контексті євроінтеграції:

1. Стічні води целюлозно-паперових підприємств характеризуються складним багатокомпонентним складом забруднювачів, включаючи високі концентрації органічних речовин, лігніну, целюлози, токсичних хімікатів, що зумовлює необхідність застосування комплексних систем очищення з механічними, фізико-хімічними, біологічними та третинними методами.

2. Аналіз світового досвіду свідчить про високу ефективність сучасних технологій третинного очищення, зокрема

комбінованої системи озонування з адсорбцією на гранульованому активованому вугіллі ($O_3 + GAC$), яка забезпечує найкращі показники з екологічної та економічної точок зору при можливості повторного використання очищених стічних вод.

3. Стан систем водоочищення на підприємствах целюлозно-паперової промисловості України характеризується високим ступенем зносу обладнання, недостатньою ефективністю очищення та систематичним перевищенням нормативів скидів забруднюючих речовин, що вимагає термінової модернізації очисних споруд.

4. Нова Директива ЄС 2024/3019 про очищення міських стічних вод встановлює значно жорсткіші вимоги до якості очищених стічних вод, включаючи необхідність третинного очищення для видалення біогенних речовин та мікрозабруднювачів, повторного використання води та досягнення енергетичної нейтральності очисних споруд до 2045 року.

5. Стратегія модернізації систем водоочищення на підприємствах галузі повинна передбачати поетапне впровадження найкращих доступних технологій, включаючи реконструкцію існуючих споруд, впровадження третинного очищення, створення замкнутих систем водопостачання з повторним використанням очищених стічних вод та досягнення енергетичної нейтральності.

Перспективами подальших досліджень є розробка детальних технологічних рішень та економічних моделей впровадження сучасних систем водоочищення для різних типів целюлозно-паперових підприємств з урахуванням їх потужності, асортименту продукції та фінансових можливостей; дослідження можливостей використання вітчизняних матеріалів та обладнання для зменшення капітальних витрат на модернізацію; розробка нормативно-методичного забезпечення імплементації вимог європейського законодавства у сфері водоохорони; оцінка екологічних та

економічних ефектів від впровадження систем повторного використання очищених стічних вод.

Список літератури

1. Liang X., Xu Y., Yin L., Wang R., Li P., Wang J., Liu K. Sustainable Utilization of Pulp and Paper Wastewater. *Water*. 2023. Vol. 15, No. 23. P. 4135. <https://doi.org/10.3390/w15234135/>

2. Kuzo N. Ye., Kosar N. S., Tarasenko M. V. Development Trends and Competitive Market Structure of Pulp and Paper Products in Ukraine. *Sustainable Management of Environmental and Urban Systems (SMEU)*. 2022. Vol. 4, No. 1. P. 115–126.

<https://doi.org/10.23939/smeu2022.01.115>.

3. Кузнєцова К. О., Дергачова Г. М., Байло О. О. Стратегія розвитку міжнародної діяльності підприємства целюлозно-паперової галузі України. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. 2022. № 21. <https://doi.org/10.20535/2307-5651.21.2022.254844>.

4. Dzhumelia V., Dzhumelia E. Hydrochemical analysis of surface water parameters dynamics in the Rika and Tereblia River (Ukraine). *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, No. 1. P. 26–35. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.026>.

5. Галиш В., Радовенчик Я., Гомеля М., Радовенчик В. Вивчення процесів очищення підсіткових вод для повторного використання в целюлозно-паперовій промисловості. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2022. № 5 (313). С. 128–133. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-128-133>.

6. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). *Official Journal of the European Union*. 2024. L 2024/3019.

7. Amacosta J., Poznyak T., Siles S., Chairez I. Sequential Treatment by Ozonation and Biodegradation of Pulp and Paper Industry Wastewater to Eliminate Organic Contaminants. *Toxics*. 2024. Vol. 12, No. 2.

- P. 138. <https://doi.org/10.3390/toxics12020138>.
8. Zhou C., Zhang J., Cai Y., Xiong J. Catalytic Ozonation for Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment: COD Reduction and Organic Matter Degradation Mechanism. *Separations*. 2023. Vol. 10, No. 3. P. 148. <https://doi.org/10.3390/separations10030148>.
9. Mainardis M., Ferrara C., Cantoni B., Di Marcantonio C., De Feo G., Goi D. How to choose the best tertiary treatment for pulp and paper wastewater? Life cycle assessment and economic analysis as guidance tools. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 906. P. 167598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167598>
10. Kamali M., Khodaparast Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2015. Vol. 114. P. 326-342. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.005>.
11. Gupta G. K., Sailwal M., Shukla P. Sustainable Nanotechnology Based Techniques for Mitigating the Pollutants from Pulp and Paper Industry. *ACS Omega*. 2024. Vol. 9, No. 49. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06022>.
12. Leontieff D. A., Ikehata K., Inanaga Y., Furukawa S. Ozone for Industrial Wastewater Treatment: Recent Advances and Sector Applications. *Processes*. 2025. Vol. 13, No. 8. P. 2331. <https://doi.org/10.3390/pr13082331>.
13. Treatment of wastewater in the paper and pulp industry / Condorchem Envitech. Condorchem Enviro Solutions. 2025. March 17. URL: <https://condorchem.com/en/blog/treatment-of-wastewater-from-paper-and-pulp-industry/> (дата звернення: 13.11.2025).
14. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. *Official Journal of the European Union*. 2020. L 177. P. 32–55.
15. Data Horizon Research. Global Water Reuse In Pulp/Paper Industry - Market Size, Growth, Share, & Analysis Report - 2023. 2024. URL: <https://datahorizonresearch.com/global-water-reuse-in-pulppaper-industry--market-48560> (дата звернення: 13.11.2025).
16. Jaruga M., Królikowska J., Rybicki S. M. Energy Efficiency Assessment of Wastewater Treatment Plants: Analyzing Energy Consumption and Biogas Recovery Potential. *Energies*. 2025. Vol. 18, No. 19. P. 5277. <https://doi.org/10.3390/en18195277>.
17. Ukraine Facility. Enlargement and Eastern Neighbourhood. European Commission. 2024. URL: https://enlargement.ec.europa.eu/funding-technical-assistance/ukraine-facility_en (дата звернення: 13.11.2025).

References

1. Liang, X., Xu, Y., Yin, L., Wang, R., Li, P., Wang, J., & Liu, K. (2023). Sustainable Utilization of Pulp and Paper Wastewater. *Water*, 15(23), 4135. <https://doi.org/10.3390/w15234135>
2. Kuzo, N. Ye., Kosar, N. S., & Tarasenko, M. V. (2022). Development Trends and Competitive Market Structure of Pulp and Paper Products in Ukraine. *Sustainable Management of Environmental and Urban Systems (SMEU)*, 4(1), 115–126. <https://doi.org/10.23939/smeu2022.01.115>
3. Kuznietsova, K. O., Derhachova, H. M., & Bailo, O. O. (2022). Stratehiia rozvytku mizhnarodnoi diialnosti pidpriemstva tseliulozno-paperovoi haluzi Ukrainy [Strategy for the development of international activities of the pulp and paper industry enterprise of Ukraine]. *Ekonomichnyi visnyk NTUU "Kyivskyi politekhnichnyi instytut" – Economic Bulletin of NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, 21. <https://doi.org/10.20535/2307-5651.21.2022.254844>
4. Dzhumelia, V., & Dzhumelia, E. (2025). Hydrochemical analysis of surface water parameters dynamics in the Rika and Tereblia River (Ukraine). *Journal Environmental Problems*, 10(1), 26–35. <https://doi.org/10.23939/ep2025.01.026>
5. Halysh, V., Radovenchyk, Ya., Homelia, M., & Radovenchyk, V. (2022). Vyvchennia protsesiv ochyshchennia pidsitkovykh vod dlia povtornoho

- vykorystannia v tseliulozno-paperovii promyslovosti [Study of processes for cleaning white water for reuse in the pulp and paper industry]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 5(313), 128–133. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-313-5-128-133>
6. Directive (EU) 2024/3019 of the European Parliament and of the Council of 27 November 2024 concerning urban wastewater treatment (recast). (2024). Official Journal of the European Union, L 2024/3019.
7. Amacosta, J., Poznyak, T., Siles, S., & Chairez, I. (2024). Sequential Treatment by Ozonation and Biodegradation of Pulp and Paper Industry Wastewater to Eliminate Organic Contaminants. *Toxics*, 12(2), 138. <https://doi.org/10.3390/toxics12020138>
8. Zhou, C., Zhang, J., Cai, Y., & Xiong, J. (2023). Catalytic Ozonation for Pulp and Paper Mill Wastewater Treatment: COD Reduction and Organic Matter Degradation Mechanism. *Separations*, 10(3), 148. <https://doi.org/10.3390/separations10030148>
9. Mainardis, M., Ferrara, C., Cantoni, B., Di Marcantonio, C., De Feo, G., & Goi, D. (2024). How to choose the best tertiary treatment for pulp and paper wastewater? Life cycle assessment and economic analysis as guidance tools. *Science of The Total Environment*, 906, 167598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167598>
10. Kamali, M., & Khodaparast, Z. (2015). Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 114, 326–342. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.05.005>
11. Gupta, G. K., Sailwal, M., & Shukla, P. (2024). Sustainable Nanotechnology Based Techniques for Mitigating the Pollutants from Pulp and Paper Industry. *ACS Omega*, 9(49). <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06022>
12. Leontieff, D. A., Ikehata, K., Inanaga, Y., & Furukawa, S. (2025). Ozone for Industrial Wastewater Treatment: Recent Advances and Sector Applications. *Processes*, 13(8), 2331. <https://doi.org/10.3390/pr13082331>
13. Condorchem Envitech. (2025, March 17). Treatment of wastewater in the paper and pulp industry. Condorchem Enviro Solutions. Retrieved November 13, 2025, from <https://condorchem.com/en/blog/treatment-of-wastewater-from-paper-and-pulp-industry/>
14. Regulation (EU) 2020/741 of the European Parliament and of the Council of 25 May 2020 on minimum requirements for water reuse. (2020). Official Journal of the European Union, L 177, 32–55.
15. Data Horizon Research. (2024). Global Water Reuse In Pulp/Paper Industry - Market Size, Growth, Share, & Analysis Report - 2033. Retrieved November 13, 2025, from <https://datahorizonresearch.com/global-water-reuse-in-pulppaper-industry--market-48560>
16. Jaruga, M., Królikowska, J., & Rybicki, S. M. (2025). Energy Efficiency Assessment of Wastewater Treatment Plants: Analyzing Energy Consumption and Biogas Recovery Potential. *Energies*, 18(19), 5277. <https://doi.org/10.3390/en18195277>
17. European Commission. (2024). Ukraine Facility. Enlargement and Eastern Neighbourhood. Retrieved November 13, 2025, from https://enlargement.ec.europa.eu/funding-technical-assistance/ukraine-facility_en

УДК 502/504

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-03>

АНТРОПОГЕННЕ ЗАБРУДНЕННЯ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ ВОДИ І СТАН ЕКОСИСТЕМ У КОНТЕКСТІ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Некос А. Н.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022

Анотація. У статті узагальнено сучасні наукові підходи до оцінки впливу антропогенного забруднення на якість води та структурно-функціональний стан екосистем водних об'єктів у контексті реалізації принципів сталого розвитку. Розглянуто вплив основних джерел антропогенного навантаження на гідрохімічні показники якості води, зокрема вміст розчиненого кисню, біогенних елементів, органічних речовин, важких металів і стійких органічних забруднювачів. Показано, що надмірне антропогенне навантаження спричиняє деградацію водних екосистем, порушення біогеохімічних циклів, зниження здатності водойм до самоочищення та трансформацію структури гідробіоценозів. Особливу увагу приділено процесам евтрофікації як одній з найбільш поширених форм деградації водних об'єктів, що супроводжується «цвітінням» води, дефіцитом кисню та зменшенням біорізноманіття. Визначено екологічні наслідки накопичення токсичних речовин у трофічних ланцюгах та їхній вплив на екосистемні послуги водних об'єктів. Обґрунтовано тісний взаємозв'язок між якістю води, станом водних екосистем і досягненням Цілей сталого розвитку, зокрема у сферах забезпечення доступу до безпечної питної води, охорони здоров'я населення, продовольчої безпеки та економічної стабільності. Наголошено на необхідності впровадження інтегрованого та екосистемного підходів до управління водними ресурсами, що передбачають

поєднання законодавчих, технологічних і природоорієнтованих заходів. Визначено пріоритетні напрями збереження та відновлення водних екосистем як головної умови екологічної безпеки та сталого водокористування.

Ключові слова: водні об'єкти, якість води, екосистеми, антропогенне забруднення, сталий розвиток.

Anthropogenic Pollution and Its Impact on Water Quality and Ecosystem Condition in the Context of Sustainable Development. Nekos A. The article synthesizes contemporary scientific approaches to assessing the impact of anthropogenic pollution on water quality and the structural-functional state of aquatic ecosystems within the framework of sustainable development principles. The influence of major sources of anthropogenic pressure on hydrochemical indicators of water quality is examined, including dissolved oxygen, nutrients, organic matter, heavy metals, and persistent organic pollutants. It is shown that excessive anthropogenic load leads to the degradation of aquatic ecosystems, disruption of biogeochemical cycles, a decline in the self-purification capacity of water bodies, and transformation of the structure of hydrobiocenoses. Particular attention is given to eutrophication processes as one of the most widespread forms of aquatic ecosystem degradation, accompanied by algal blooms, oxygen depletion, and reduced biodiversity. The ecological consequences of toxic substance accumulation in trophic

chains and their impact on ecosystem services of water bodies are identified. A close interrelationship between water quality, the condition of aquatic ecosystems, and the achievement of the Sustainable Development Goals is substantiated, particularly in ensuring access to safe drinking water, public health protection, food security, and economic stability. The necessity of implementing integrated and ecosystem-based approaches to water resources management is emphasized, combining legislative, technological, and nature-based measures. Priority directions for the conservation and restoration of aquatic ecosystems are identified as a key condition for environmental safety and sustainable water use.

Keywords: water bodies, water quality, ecosystems, anthropogenic pollution, sustainable development.

Постановка проблеми. Водні екосистеми забезпечують важливі екосистемні послуги: водопостачання, регулювання клімату, підтримання біорізноманіття [1]. За оцінками ООН, прісні води становлять лише 2,5% від загальних водних ресурсів планети, причому доступними для використання є менше 1% від цього обсягу [2].

Водночас зростання чисельності населення планети, інтенсифікація промислового виробництва та сільськогосподарської діяльності зумовлюють посилення антропогенного впливу на водні об'єкти. Розширення урбанізованих територій, збільшення обсягів водоспоживання та використання агрохімікатів збільшують обсяги стічних вод і забруднюючих речовин, що надходять у природні водойми. За даними ВООЗ та ООН, значну частину стічних вод скидають у водні об'єкти без належної очистки [3-5]. Така ситуація створює серйозні загрози для якості води, функціонування екосистем і здоров'я населення.

Вплив антропогенного забруднення водних об'єктів є вагомим перешкодою для досягнення Цілей сталого розвитку ООН, зокрема Цілі 6

Чиста вода та належна санітарія [6]. Водночас наявні наукові дослідження часто мають фрагментарний характер і не забезпечують цілісного уявлення про взаємозв'язок між антропогенним забрудненням, якістю води та станом екосистем у контексті сталого розвитку, що зумовлює потребу в комплексному узагальненні сучасних підходів до цієї проблеми.

Актуальність дослідження.

Сучасний стан водних об'єктів характеризується посиленням антропогенного впливу, пов'язаного зі зростанням населення, інтенсифікацією промислової та сільськогосподарської діяльності, а також збільшенням обсягів стічних вод. У результаті знижується якість поверхневих вод, порушуються природні механізми самоочищення і поступово відбувається деградація екосистем. Антропогенне забруднення водних об'єктів спричиняє розвиток евтрофікації, накопичення токсичних речовин і трансформацію структури гідробіоценозів, що негативно позначається на екосистемних функціях водойм і можливостях їх господарського використання. В умовах реалізації Цілей сталого розвитку особливої актуальності набуває необхідність інтегрованого аналізу взаємозв'язку між антропогенним забрудненням, якістю води та станом екосистем, що дозволяє обґрунтувати екосистемно орієнтовані підходи до управління водними ресурсами та збереження їх екологічної стійкості.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Результати дослідження пов'язані з актуальними науковими та практичними завданнями гідроекології, зокрема з удосконаленням підходів до оцінки впливу антропогенного забруднення на якість води та стан екосистем у контексті сталого розвитку. Узагальнені положення роботи сприяють інтеграції гідрохімічних і екосистемних підходів до аналізу водних об'єктів та можуть бути використані при

екологічній оцінці, моніторингу і плануванні природоохоронних заходів. Отримані узагальнення щодо впливу антропогенного забруднення на якість води та стан водних екосистем поглиблюють наукові уявлення про механізми трансформації гідробіоценозів і порушення екосистемних функцій водних об'єктів. Матеріали можуть бути застосовані в процесі моніторингу водних ресурсів, розроблення регіональних програм охорони довкілля та реалізації принципів інтегрованого управління водними ресурсами в контексті сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми якості води та стану водних екосистем широко представлені у вітчизняній та міжнародній науковій літературі. Алімов О. Ф., Константинов А. С. Яковлєва В. О. та Одум Ю. П. розробили методологічні основи сучасної гідроекології, фундаментальні концепції структурної організації та функціонування водних екосистем. У роботах цих дослідників аналізуються процеси, які відбуваються у водоймі під час її самоочищення, а також принципи використання реакції організмів на умови навколишнього середовища для оцінки якості води.

Вагомий внесок у вивчення гідроекологічних умов водних об'єктів України зробили Романенко В. Д., Афанасьєв С. О., Хільчевський В. К., які у своїх працях досліджували процеси евтрофікації, а також вплив точкових та дифузних джерел забруднення на якість поверхневих вод.

Проблематика антропогенного впливу на водні екосистеми в глобальному контексті висвітлена у працях Wetzel R., Dodds W., Lampert W., де розглядаються загальні механізми реакції гідробіоценозів на забруднення, трансформація трофічних зв'язків і порушення біогеохімічних циклів.

Postel S., Gleick P., Vörösmarty C., визначаючи загрози деградації водних екосистем для продовольчої безпеки, здоров'я населення та економічного

розвитку, доводять залежність між станом водних ресурсів та сталим розвитком суспільства.

Водночас, попри значний обсяг наукових досліджень, залишаються недостатньо вивченими комплексна оцінка впливу сучасних форм антропогенного забруднення на різні компоненти екосистем, а також питання інтеграції екосистемних підходів до управління водними ресурсами у практику сталого розвитку.

Мета роботи. Метою роботи є узагальнення сучасних наукових підходів до оцінки антропогенного впливу на якість води та функціональний стан екосистем і обґрунтування пріоритетних напрямів збереження та відновлення екосистем відповідно до принципів сталого розвитку.

Матеріали і методи дослідження. Матеріалами дослідження слугували наукові публікації та аналітичні звіти, у яких узагальнено результати довготривалих спостережень за станом водних ресурсів. У роботі застосовано методи аналізу і синтезу для систематизації сучасних наукових уявлень щодо джерел антропогенного забруднення та їх впливу на якість води і стан екосистем. Метод порівняльного аналізу використано для зіставлення підходів до оцінки екологічного стану водних об'єктів, а метод узагальнення – для формування концептуальних висновків і визначення пріоритетних напрямів збереження та відновлення екосистем у контексті сталого розвитку.

Результати дослідження. Антропогенне забруднення водних об'єктів формується під впливом різних видів господарської діяльності людини, інтенсивність яких зростає в сучасних умовах. Розрізняють точкові джерела забруднення (локалізовані скиди через конкретні випуски) та дифузні (розосереджені надходження з великих площ) (табл. 1).

Таблиця 1 – Джерела забруднення

Тип джерела	Основні приклади	Характер впливу	Екологічні наслідки
Точкові	Стічні води, промислові скиди	Локалізоване надходження	Токсикація, зниження кисню
Дифузні	Сільське господарство, поверхневий стік	Розосереджене надходження	Евтрофікація, забруднення біогенами

Гідрохімічні показники якості води суттєво змінюються в умовах антропогенного забруднення. Основні групи забруднювачів, які впливають на

якість води, включають органічні речовини, біогенні елементи, важкі метали, нафтопродукти, синтетичні поверхнево-активні речовини (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив основних груп забруднювачів на стан екосистем

Група забруднювачів	Основний механізм впливу	Реакція екосистем	Екологічні наслідки
Органічні речовини	Біохімічне окиснення з інтенсивним споживанням розчиненого кисню (підвищення БСК)	Порушення кисневого режиму, розвиток гіпоксії або анаеробних умов	Загибель гідробіонтів, зниження біорізноманіття, пригнічення процесів самоочищення
Біогенні елементи (N, P)	Надмірне збагачення поживними речовинами, стимуляція розвитку фітопланктону	Евтрофікація, «цвітіння» води, зменшення прозорості	Порушення трофічної рівноваги, дефіцит кисню, деградація екосистем
Важкі метали	Токсична дія на клітинному рівні, блокування ферментативних процесів, біоаккумуляція	Фізіолого-біохімічні порушення, зниження життєздатності популяцій	Токсикація трофічних ланцюгів, мутагенні ефекти, зниження екологічної стійкості
Нафтопродукти	Утворення плівки на поверхні води, токсичний вплив на гідробіонтів	Порушення газообміну, пригнічення фотосинтезу	Зниження продуктивності екосистем, загибель чутливих видів
Синтетичні поверхнево-активні речовини	Зміна фізико-хімічних властивостей води, токсичний вплив на організми	Порушення мембранних процесів, пригнічення біологічної активності	Деградація біоценозів, зниження здатності до саморегуляції

Стійкі органічні забруднювачі	Висока стабільність, кумуляція в організмах, канцерогенна дія	Хронічна токсичність, порушення репродуктивних функцій	Біомагніфікація у трофічних ланцюгах, довготривала деградація екосистем
-------------------------------	---	--	---

Органічне забруднення визначається як надходження легкоокислюваних органічних речовин, яке супроводжується зменшенням вмісту розчиненого кисню у воді. Окислення, або біохімічні процеси окиснення органічних речовин, завжди передбачають споживання кисню, що може призвести до анаеробних умов і, як наслідок, до загибелі водних організмів. Органічне забруднення оцінюють за показником біохімічного споживання кисню (БСК) [7].

Евтрофікація є одним із найпоширеніших порушень функціонування водних екосистем у сучасних умовах і пов'язана з надмірним надходженням біогенних елементів, насамперед сполук азоту та фосфору, у поверхневі води. Підвищення концентрацій поживних речовин стимулює інтенсивний розвиток фітопланктону, що проявляється у вигляді «цвітіння» води та зниження її прозорості. Масовий розвиток водоростей супроводжується підвищенням біохімічного споживання кисню і порушенням кисневого режиму, унаслідок чого формуються гіпоксичні або анаеробні умови в придонних шарах води. Наслідком таких процесів є загибель донних організмів, зниження біорізноманіття та погіршення органолептичних властивостей води, що свідчить про глибоку евтрофну деградацію водних екосистем [8].

Важкі метали високотоксичні для живих організмів і накопичуються в трофічних ланцюгах. Токсична дія цих елементів полягає у пригніченні ферментативної активності та блокуванні фізіологічних і біохімічних процесів у

клітинах, що зумовлює мутагенний ефект [9, 10].

Органічне забруднення включає небезпечні компоненти, зокрема стійкі органічні забруднювачі – поліхлоровані біфеніли, діоксини і пестициди, які відзначаються високою стабільністю, накопичуються в організмах і мають канцерогенну дію [11].

Слід зазначити, що антропогенне забруднення спричиняє глибокі структурно-функціональні зміни у водних екосистемах, що проявляються на всіх рівнях біологічної організації: від окремих організмів до екосистеми в цілому [12, 13].

Антропогенне забруднення водних екосистем призводить до каскадних змін, що проявляються на всіх рівнях біологічної організації (табл. 3).

На рівні організмів спостерігаються токсичні ефекти та порушення фізіолого-біохімічних процесів, на рівні популяцій – зниження чисельності та зміна вікової структури, на рівні угруповань – спрощення структури та зменшення видового різноманіття. Сукупна дія цих змін на екосистемному рівні зумовлює порушення біогеохімічних циклів, зниження здатності до самоочищення та втрату екосистемних послуг.

Наслідки антропогенного забруднення водних екосистем виходять за межі суто екологічної проблематики та формують системні виклики для сталого розвитку суспільства.

Якість води та стан водних екосистем визначають можливості водопостачання, функціонування екосистемних послуг і стійкість водокористування.

Таблиця 3 – Каскадні зміни екосистем під впливом антропогенного забруднення

Рівень біологічної організації	Прояв впливу	Основні екологічні ефекти	Наслідки для екосистем
Організмівий	Токсична дія забруднювачів, порушення фізіолого-біохімічних процесів	Зниження життєздатності, стресові реакції, порушення метаболізму	Підвищена смертність, зменшення адаптивної здатності
Популяційний	Зміна чисельності та вікової структури популяцій	Зниження відтворення, скорочення чисельності чутливих видів	Дестабілізація популяцій, зменшення генетичного різноманіття
Біоценотичний (угруповання)	Спрощення структури угруповань, домінування стійких видів	Зниження видового різноманіття, порушення трофічних зв'язків	Деградація біоценозів, порушення екологічної рівноваги
Екосистемний	Порушення біогеохімічних циклів і процесів саморегуляції	Зниження здатності до самоочищення, зміна продукційно-деструкційних процесів	Втрата екосистемних послуг, зниження екологічної стійкості

Від цього опосередковано залежать доступ до безпечної питної води, стан здоров'я населення та ефективність господарської діяльності. За таких умов збереження якості водних ресурсів і функціональної цілісності екосистем є необхідною передумовою досягнення Цілей сталого розвитку ООН, насамперед у сфері водної безпеки та управління водними ресурсами.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування інтегрованого та екосистемного підходів до управління водними ресурсами, які передбачають узгодження природоохоронних, управлінських і технічних рішень. Застосування цих підходів дозволяє враховувати взаємозв'язок між якістю води, станом екосистем і характером антропогенного навантаження. За таких умов збереження і відновлення екосистем розглядається як один із пріоритетних напрямів забезпечення екологічної безпеки та сталого водокористування.

Узагальнення результатів показало, що антропогенне забруднення

проявляється у комплексних змінах гідрохімічних показників, порушенні структурно-функціональної організації екосистем та зниженні їх здатності до саморегуляції. Найбільш чутливими індикаторами деградації є порушення кисневого режиму, евтрофікація та накопичення токсичних речовин, які зумовлюють трансформацію екосистемних процесів і зниження екологічної стійкості.

Обговорення результатів.

Отримані результати підтверджують, що антропогенне забруднення є одним з основних факторів, які спричиняють погіршення стану водних об'єктів, якості води та деградацію водних екосистем у сучасних умовах. Вплив господарської діяльності на гідрохімічні параметри води проявляється комплексно – насамперед у зміні кисневого режиму, підвищенні вмісту біогенних та органічних речовин і поступовому накопиченні токсичних компонентів.

За сучасними уявленнями гідроекології евтрофікація розглядається як один із основних процесів деградації

водних екосистем і є наслідком тривалого надходження біогенних елементів, зокрема сполук азоту та фосфору, з комунально-побутових стічних вод і сільськогосподарського стоку. Надлишок поживних речовин порушує трофічну рівновагу водних об'єктів, посилює продукційні процеси та зрештою призводить до формування гіпоксичних умов, що негативно впливає на структурно-функціональний стан гідробіоценозів. Такий підхід відповідає сучасним уявленням, за якими евтрофікація розглядається як багаторівневий процес, що поєднує фізичні, хімічні та біологічні механізми функціонування екосистем.

Сучасні дослідження свідчать, що біохімічне споживання кисню розглядається як інтегральний показник, який відображає інтенсивність мікробіологічного окиснення органічної речовини та екологічний стан водних екосистем. Підвищені показники БСК свідчать про зростання навантаження на кисневий режим води і відповідно зменшення здатності екосистем до самоочищення та підтримання екологічної рівноваги. Додатковий екологічний ризик формують важкі метали і стійкі органічні забруднювачі.

Важливим аспектом статті є аналіз взаємозв'язку між якістю води, функціональним станом водних екосистем і реалізацією Цілей сталого розвитку.

Узагальнення отриманих результатів підтверджує, що антропогенне забруднення є системоутворюючим чинником трансформації екосистем, який через зміну гідрохімічних параметрів, порушення трофічних зв'язків і накопичення токсичних речовин зумовлює зниження екологічної стійкості та здатності екосистем до саморегуляції. Такий інтегрований підхід дозволяє розглядати якість води і стан екосистем як взаємопов'язані компоненти єдиної соціо-еколого-економічної системи, що має принципове значення для реалізації стратегій сталого розвитку. Слід

вказати, що узагальнений характер дослідження обмежує можливість кількісної оцінки регіональних відмінностей прояву антропогенного впливу, що потребує подальших спеціалізованих досліджень.

Висновки. Антропогенне забруднення є основним фактором трансформації екосистем через зміни гідрохімічних параметрів, розвиток процесів евтрофікації та накопичення токсичних речовин, що змінює структурну та функціональну організацію, знижує здатність до саморегуляції та втрати екосистемних послуг. Отримані результати обґрунтовують необхідність інтегрованого й екосистемного підходів до управління водними ресурсами та збереження екологічної стійкості екосистем. Подальші дослідження доцільно спрямувати на регіонально орієнтовану кількісну оцінку впливу антропогенного впливу на водні об'єкти та розробку практичних механізмів збереження і відновлення екосистем у контексті сталого розвитку.

Список використаних джерел

1. Nabout, J. C., Machado, K. B., David, A. C. M., Mendonça, L. B. G., Da Silva, S. P., & Carvalho, P. (2022). Scientific literature on freshwater ecosystem services: trends, biases, and future directions. *Hydrobiologia*, 850(12–13), 2485–2499. <https://doi.org/10.1007/s10750-022-05012-6/>
2. UNESCO World Water Assessment Programme. (2022). *The United Nations world water development report 2022: Groundwater – Making the invisible visible*. Paris: UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721>.
3. World Health Organization. (2024). *Progress on the proportion of domestic and industrial wastewater flows safely treated: Global status and acceleration needs to 2030*. World Health Organization.

<https://www.who.int/publications/i/item/9789240099081>.

4. United Nations. (2024). *SDG indicator 6.3.1: Proportion of domestic wastewater safely treated*. United Nations Statistics Division. <https://sdg6data.org>.

5. UN-Water. (2024). *Progress on wastewater treatment: 2024 update*. United Nations.

<https://www.unwater.org/publications/progress-wastewater-treatment-2024-update>.

6. Goal 6: *Clean water and sanitation - The Global Goals*. (2024, January 23). The Global Goals. <https://globalgoals.org/goals/6-clean-water-and-sanitation/>.

7. Wang, F., Zhang, P., Yan, W., Jia, M., Su, X., Wang, J., & Tian, S. (2023). Riverine organic pollution source and yield from the whole Changjiang river network: Effects of urbanization under changing hydrology. *Journal of Hydrology*, 620, 129544. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129544>.

8. Akinawo, S. O. (2023). Eutrophication: Causes, consequences, physical, chemical and biological techniques for mitigation strategies. *Environmental Challenges*, 12, 100733. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100733>.

9. Jolaosho, T. L., Elegbede, I. O., Akintola, S. L., Jimoh, A. A., Ndimele, P. E., Mustapha, A. A., & Adukonu, J. D. (2024).

Bioaccumulation

dynamics, noncarcinogenic and carcinogenic risks of heavy metals in commercially valuable shellfish and finfish species from the world largest floating slum, Makoko, Nigeria. *Marine Pollution Bulletin*, 207, 116807.

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116807>.

10. Wang, Y., Noman, A., Zhang, C., Al-Bukhaiti, W. Q., & Abed, S. M. (2024). Effect of fish-heavy metals contamination on the generation of reactive oxygen species and its implications on human health: a review. *Frontiers in Marine Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1500870>.

11. United Nations Environment Programme. (2023). *Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs): Global monitoring report*. UNEP. <https://www.pops.int>

12. Hu, J., Han, G., & Zhang, Q. (2025). Impacts of environmental change and human activities on aquatic ecosystems. *Water*, 17(11), 1669. <https://doi.org/10.3390/w17111669>.

13. De Carvalho, F. G., Loyau, A., Kelly-Irving, M., & Schmeller, D. S. (2025). Aquatic ecosystem indices, linking ecosystem health to human health risks. *Biodiversity and Conservation*, 34(3), 723–767. <https://doi.org/10.1007/s10531-025-03010-3>

UDC 556.5+627.13+518.9+682.964

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-04>

ЗАСТОСУВАННЯ АЕРОКОСМІЧНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМІ ПІДТРИМКИ ЕКОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОЦІНКИ МІЖКОРДОННИХ ЕКОЛОГІЧНИХ КОНФЛІКТІВ

Машков О.А., Андрійчук Ю.М., Присяжний В.І.,
Оводенко Т.С., Ромасевич І.П.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та менеджменту,
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ
mashkov_oleg_52@ukr.net

У статті розглядається технологія використання даних аерокосмічного моніторингу для оцінки міжкордонних екологічних конфліктів. Для оцінки транскордонного впливу економічної діяльності екологічно небезпечних підприємств та можливих ризиків для довкілля рекомендується застосовувати сучасні інформаційні технології (використання матеріалів дистанційного зондування з супутників, використання геоінформаційних технологій та систем штучного інтелекту). Технології спостереження Землі в космосі використовуються для вивчення трансграничного впливу діяльності штучних об'єктів навколишнього середовища на довкілля. Було проведено інформаційну оцінку транскордонного впливу на довкілля на довкілля. Розглядається технологія використання мультиспектральних космічних зображень для оцінки стану транскордонних екологічних конфліктів. Запропонуються рекомендації щодо оцінки даних дистанційного зондування транскордонного впливу діяльності кар'єру Хатислав на стан навколишнього середовища. Згідно з даними обробки аерокосмічних досліджень із

використанням геоінформаційних технологій, було встановлено, що експлуатація техногенних і екологічно небезпечних об'єктів у прикордонній зоні може призвести до біосферного конфлікту (транскордонне забруднення) та екологічної катастрофи: збільшення потоку води в Чорне море та зменшення потоку води в Балтійське море. Це призведе до уповільнення водообміну в Шацьких озерах і, як наслідок, до збільшення кількості природних і антропогенних факторів евтрофікації озер Національного природного парку Шацьк. Проведені дослідження показують необхідність термінових заходів для організації постійного моніторингу стану підземних вод у прикордонній зоні з метою постійного контролю за їхнім станом і своєчасного вжиття необхідних заходів для запобігання можливим негативним екологічним наслідкам на території України.

Ключові слова: аерокосмічні технології, дистанційне зондування Землі, оцінка інформації, моніторинг, система штучного інтелекту, транскордонні екологічні конфлікти.

Створюю проблему.

У статті розглядається технологія використання даних аерокосмічного моніторингу для оцінки транскордонних екологічних конфліктів на прикладі піщаних і вапнякових кар'єрів Хатислава. Близькість Хатиславського піщано-вапнякового кар'єру, який розташований на території Брестської області Білорусі, всього за 25 кілометрів від Світлязя, загрожує існування Шацьких озер в Україні. Наразі цей кар'єр, який добуває найякісніший кварцовий пісок і вапно в Європі, частково розроблений до глибини до 60 метрів, а найглибша ділянка на Свяязі сягає 58 метрів. Озера карстового походження, розташовані на вододілах між Балтійським і Чорним морями. Тому відтік води з цих озер у кар'єр загрожує зробити їх мілкими і, відповідно, порушити екосистему регіону загалом. Крім того, на дні озер щодня відкладаються пилові хмари, насичені сполуками плумбуму, калію та сірки, які піднімаються з кар'єрів під час видобутку піску та вапна. Подальше будівництво та видобуток крейди могло порушити підземні водоносні горизонти та перекрити постачання до Шатських озер.

Для вивчення та вирішення екологічної проблеми Хатиславського заповідника необхідно використовувати сучасні інформаційні технології (використання матеріалів для дистанційного зондування Землі з супутників та геоінформаційних технологій).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання застосування штучного інтелекту для розв'язання проблем керування складними динамічними процесами розглядали Нільс Дж. Нільсон, Стюарт Дж. Рассел, Пітер Норвіг [8, 9]. Парадигма обробки інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки запропонована у [3-7]. Аналіз показує, що сьогодні питання Асоціація аерокосмічних інформаційних

технологій у системі підтримки екологічних рішень із використанням штучного інтелекту для оцінки транскордонних екологічних конфліктів.

Результати досліджень.

А. Передача космічних технологій для спостереження Землі у вивченні транскордонного впливу діяльності штучних об'єктів, створених навколишнім середовищем.

На нинішньому етапі, при розшифруванні космічних зображень, одним із головних завдань є виявлення ознак (прямих і непрямих) для розпізнавання об'єктів спостереження. Водночас швидкий розвиток геоінформаційних систем (ГІС) дозволив не лише аналізувати поточний стан об'єктів спостереження, а й прогнозувати екологічну ситуацію (моделювання поточних подій). Це дозволяє, за потреби, приймати обґрунтовані екологічні рішення у сфері управління [1, 2].

Сьогодні космічний моніторинг широко використовується для вивчення структури ландшафту, природних ресурсів і типів управління природою, а також для аналізу ступеня забруднення атмосфери, земельних і водних ресурсів, оцінки антропогенних і техногенних впливів на довкілля. За допомогою існуючих і нових методів оцінки стану навколишнього середовища за допомогою штучного інтелекту можна швидко розв'язувати проблеми у сфері управління природою та екологічної безпеки. Використання штучного інтелекту в системі управління навколишнім середовищем дозволяє:

□ Забезпечення об'єктивності та надійності первинної, аналітичної та прогнозової інформації про навколишнє середовище;

мають систематичні спостереження за станом навколишнього середовища та штучними небезпечними об'єктами;

підвищення ефективності отримання та надійності первинних даних шляхом використання ефективних технологій для процесів збору,

накопичення та обробки екологічної інформації на всіх рівнях державного управління (місцевий, регіональний, державний);

□ Забезпечити сумісність технічної інформації та програмного забезпечення системи управління екологічною безпекою за допомогою штучного інтелекту;

□ Покращити рівень і якість інформаційних послуг для операторів і споживачів екологічної інформації на всіх рівнях системи підтримки прийняття рішень у сфері управління навколишнім середовищем на основі мережевого доступу до розподілених офісів та інтегрованих баз даних;

забезпечення оперативного надання екологічної інформації виконавчим органам, іншим зацікавленим органам, підприємствам, організаціям та установам;

□ Мати доступ до екологічної інформації для населення.

Враховуючи певні принципи та нові підходи, розроблені під час розробки [3, 4], пропонується використання програмних, апаратних і програмних продуктів геоінформаційних систем і інструментів для автоматизованої обробки зображень дистанційного зондування Землі з метою створення карти динаміки екологічних процесів у екологічному моніторингу. Процес створення динамічних карт поділяється на кілька послідовних етапів, під час яких формуються основні частини:

1. Сцена. Підготовчий етап — формуються вимоги до створеної карти екологічного моніторингу, визначено територію спостереження, збирається та обробляється початкова інформація.

2. Сцена. Формування карти динаміки екологічних процесів здійснюється за допомогою автоматизованої обробки зображень, на основі початкових зображень формується спеціальне зображення, що відображає ймовірність того, що певна частина території зазнала змін через часове розділення просторових зображень.

3. Сцена. Формування мультиспектральної карти динаміки екологічних процесів на основі існуючих відведених спектральних характеристик карти території спостереження.

4. Сцена. Складання якісної порівняльної характеристики карти динаміки екологічних процесів.

Розглянемо можливості використання космічних технологій для моніторингу навколишнього середовища за допомогою штучного інтелекту та вивчимо транскордонний вплив діяльності екологічних штучних об'єктів на прикладі впливу розвитку кар'єру Хатислав (Білорусь) на Національний природний парк Шацк (Україна).

Тематична обробка та декодування космічних зображень здійснюється за допомогою програмного забезпечення TROAS – IMAGINE. Програмне забезпечення ESRI ArcGIS використовувалося для створення цифрових карт. Базова цифрова картографічна база даних була створена для району біля Хатиславського кар'єру у масштабі 1:50 000 і включає шари: межі регіону; межі районів; гідрографічні об'єкти (річки, озера, болота); поселення (міста, міста, села); Дороги (дороги, залізниці).

Оригінальні цифрові карти (у масштабі 1:50 000) створюються в геологічній системі координат UTM – WGS84 і передаються у форматі shp.

Під час дослідження використано орторектовані супутникові знімки прикордонної зони біля Хатиславського кар'єру, отримані в Національному центрі контролю та випробування космічних об'єктів Державного космічного агентства України.

Б. Оцінка інформації про транскордонний вплив на довкілля.

Дослідження показують, що внаслідок робіт, проведених поблизу Хатиславського кар'єру на території 95 гектарів (Білорусь), озеро Святазь (Україна) може зникнути. Враховуючи

міжнародну конвенцію про транскордонний вплив на природу, розвиток кар'єру Хатислав досі зупиняється завдяки видобутку піску. Відкритий шар крейди ще не пошкоджений, оскільки це пов'язано з подальшим поглибленням — згідно з проектом, глибина будівлі становить 43 метри, прогноз на 25 років. Згідно з дослідженнями, у озерах Шацької області, які ближче до Хатиславського кар'єру, рівень водообміну вже зменшився у 5-6 разів. Ми вже маємо чіткий сигнал, що вже є негативний вплив на довкілля України. Існує небезпека осушення території Національного заповідника Шатських озер, а також можливість сейсмологічної загрози.

На жаль, Україна та Білорусь досі не дійшли згоди щодо єдиного методу визначення екологічної шкоди, спричиненої розширенням і розширенням Хатиславського кар'єру.

Загрозу для екології Волині тепер можна уявити у другому етапі Хатиславського кар'єру. Розвиток Хатиславського кар'єру вплине на рух підземних вод до України. Від кар'єру до Волині з його унікальним озером лише 300 метрів. Тривога викликана тим, що шатські озера мають карстове походження, і ситуація нагадує бочку з водою. Якщо на дні є навіть невелика дірка, якщо виникне проблема хоча б з одним озером, це спричинить ланцюгову реакцію.

Системні екологічні проблеми транскордонного впливу діяльності кар'єру Хатислав полягають у тому, що при зменшенні рівня підземних вод деякі види флори та фауни зникають навіть на метр. А територія Шацьких озер і озер у Ратнівському, а також прикордонна зона Волині є унікальним природним місцем, це територія Національного парку. Адже можна побудувати фабрику чи викопати кар'єр, але не можна відновити втрачену природу назавжди.

Кажуть, що вода вже тече до північного сусіда, але якщо біля кордону є дірка — глибокий кар'єр — вона може туди дістатися. Ми знаємо, що ці озера

карстового походження — ці озера знаходяться у порожнечі. І якщо кар'єр забирає цю воду, а потім через ці порожнини, вода може потрапити в кар'єр і осушити озера. Озера стануть мілководними, а деякі — які зовсім не глибокі — можуть перетворитися на болота. Як поводитиметься карст, коли кар'єр досягне проектної потужності для видобутку — рекомендується моделювати ці процеси за допомогою штучного інтелекту. Такий підхід забезпечить збереження біорізноманіття, екологічного статусу та оцінку можливих екологічних ризиків.

В. Застосування мультиспектральних космічних зображень для оцінки стану транскордонних екологічних конфліктів.

При використанні мультиспектральних космічних зображень для оцінки стану транскордонного конфлікту навколишнього середовища найважливішу роль відіграють властивості розшифрування космічних зображень і точність отримання необхідної інформації.

Класифікація космічних зображень для встановлення розподілу певних класів земельного покриття загалом може стати основою для створення систем управління екологічною безпекою. Для класифікації космічних зображень ми використали програмний продукт ERDAS Imagine, який визнаний одним із світових лідерів серед програмних продуктів для подібних цілей. ERDAS Imagine широко використовується для обробки супутникової інформації у багатьох наукових і промислових центрах провідних західних країн (США, Німеччина, Франція, Італія тощо).

Використання мультиспектральних космічних зображень дозволило виявити екологічні проблеми, пов'язані з впливом кар'єру Хатислав на екологію озера Свитязь. Обробка матеріалів для досліджень включає геодезичну (географічну) довідку, усунення або врахування геометричних спотворень

зображень, їх трансформацію та декодування.

Завдання розшифрування полягає в тому, щоб отримати якомога більше інформації з аерофотознімків, необхідних для цієї мети. Отже, результати декодування залежать від інформаційної ємності аерофотознімків. Обсяг інформації залежить від розміру точок, що складають зображення, і від кількості помітних відтінків (кольорів). Декодування зображень Хатиславського кар'єру полягає в аналізі зображення (глибини, розміру) та інших об'єктів території на зображеннях з метою виділення та опису їхніх характеристик з метою розв'язання різних екологічних і екологічних проблем. Вона містить елементи як загального топографічного, так і геологічного декодування. У цьому сенсі кар'єри декодування зазвичай поділяються на схеми та оподаткування.

Контурне декодування полягає в ізоляції низки топографічних особливостей і контурів територій у кар'єрі для подальшого опису за допомогою методу наземного обстеження або повітряного оподаткування. Розшифрування податків — це найскладніший і найскладніший процес. Вона полягає у поділі кар'єру на податкові зони та визначенні геологічного складу.

Існує велика кількість сучасних пакетів обробки даних дистанційного зондування, які рекомендуються для використання в системах штучного інтелекту. Вибір матеріалів для космічних досліджень є важливим етапом класифікації для екологічного моніторингу. Орторектифіковані супутникові знімки з супутника Січ-2, отримані у 2013 році, використовувалися для тематичного декодування та створення цифрових карт прикордонних територій (рис. 1).

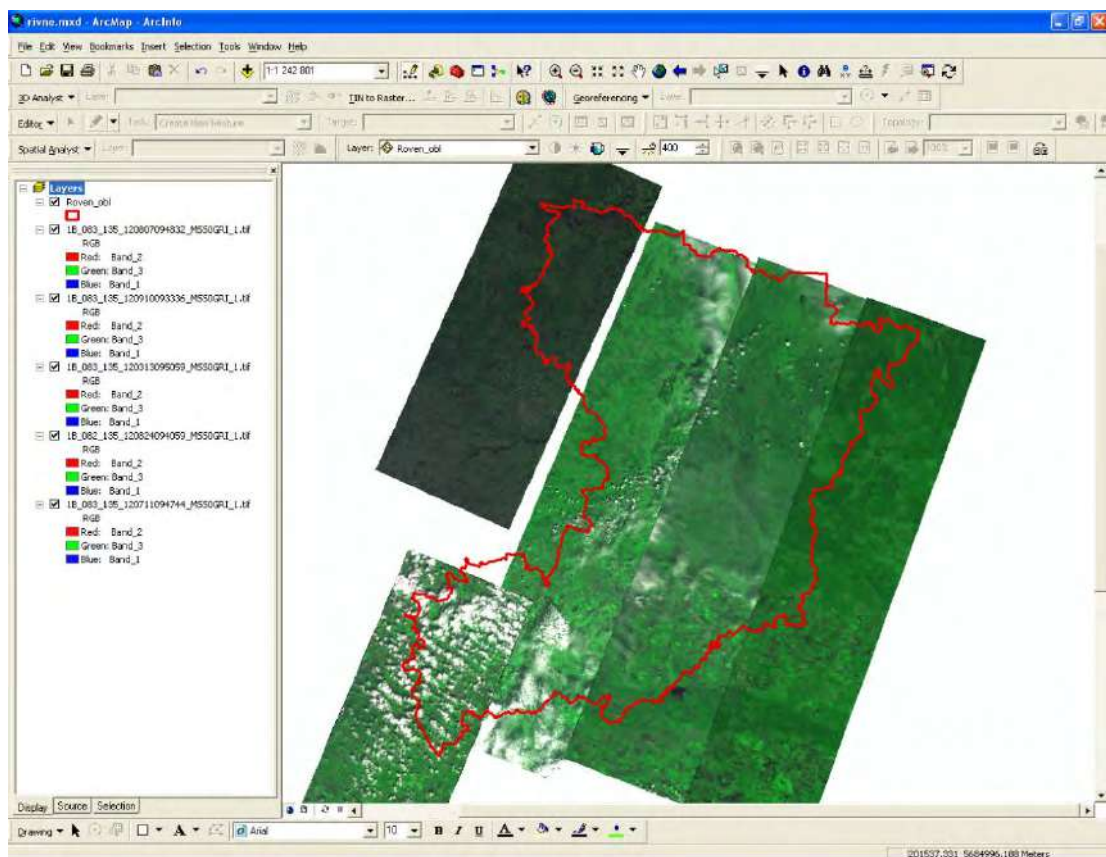


Рис.1 – Розташування супутникових знімків із супутника Січ-2 у досліджуваній зоні

Технологічно процес розшифрування за допомогою штучного інтелекту можна поділити на два основні етапи: класифікація машин; Візуальне декодування на столі.

Класифікація машин дозволяє автоматизувати процес розшифрування. Мета класифікації — витягти тематичну інформацію з зображення. У процесі класифікації в комп'ютерних системах статистичні дані отримуються за спектральними характеристиками всіх пікселів зображення. У цьому випадку

сортування базується на математичних критеріях. Існує два способи класифікації: з навчанням без нагляду; Навчання під контролем. Ми обрали другий метод розрахунку, щоб поширити його на можливі інші транскордонні екологічні конфлікти.

Ця класифікація здійснюється шляхом навчання відповідно до обраних стандартів (рис. 2) із формуванням відповідного підпису для кожного з них, який далі використовується для визначення центрів класу.

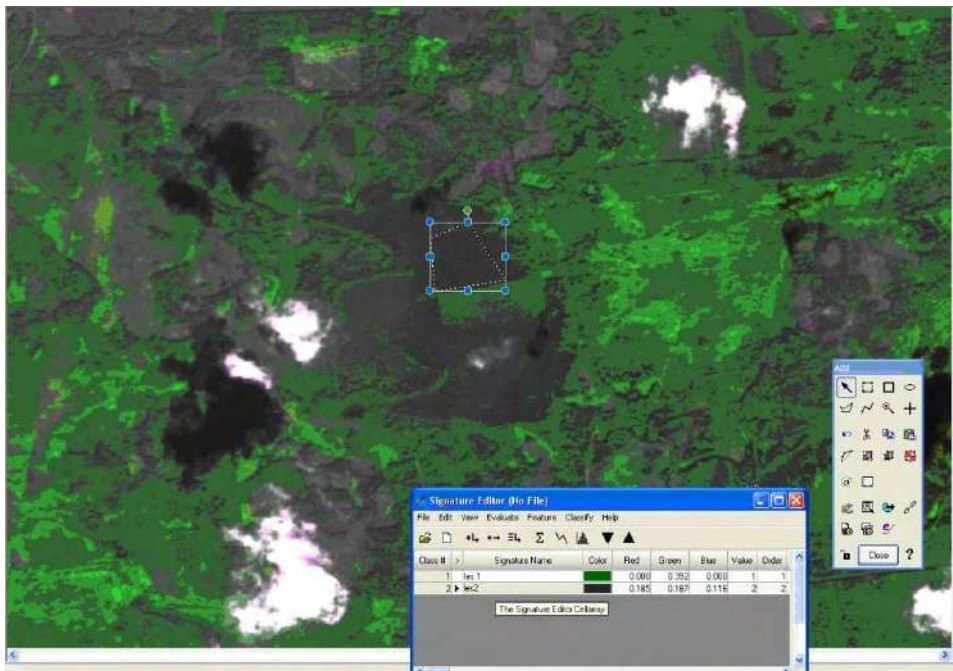


Рис. 2 – Контрольована класифікація. Процес створення бенчмарків

Класифікації, як і самі сигнатури, можуть бути параметричними та непараметричними. Непараметричні правила: простір ознак, правило паралелепіпеда. Класифікацію під наглядом можна поділити на два основні етапи: створення набору підписів; Автоматична класифікація та створення тематичного растрового зображення.

Процес формування підпису відбувався у такій послідовності: автоматичне або ручне позначення навчального об'єкта з використанням додаткових даних; Додавання спектрального зображення до низки

підписів; Перевірка наявності перетину спектральних зображень. Ця послідовність операцій чергується з об'єднанням подібних підписів — видаленням підписів, які перекриваються або викликають сумніви.

Ця класифікація здійснюється шляхом навчання відповідно до обраних стандартів (рис. 2) із формуванням відповідного підпису для кожного з них, який далі використовується для визначення центрів класу.

Рекомендується завершувати процес формування сигнатури, коли простір ознак максимально заповнений спектральними

зображеннями, які не перетинаються. Далі були встановлені кольорові градації для класів, сформованих підписами, які отримали назви. Внаслідок цього створюється набір підписів, які визначають

освітній патерн. Кожен підпис відповідає класу і використовується відповідно до важливого правила для призначення пікселів до певного класу (рис. 3, 4).

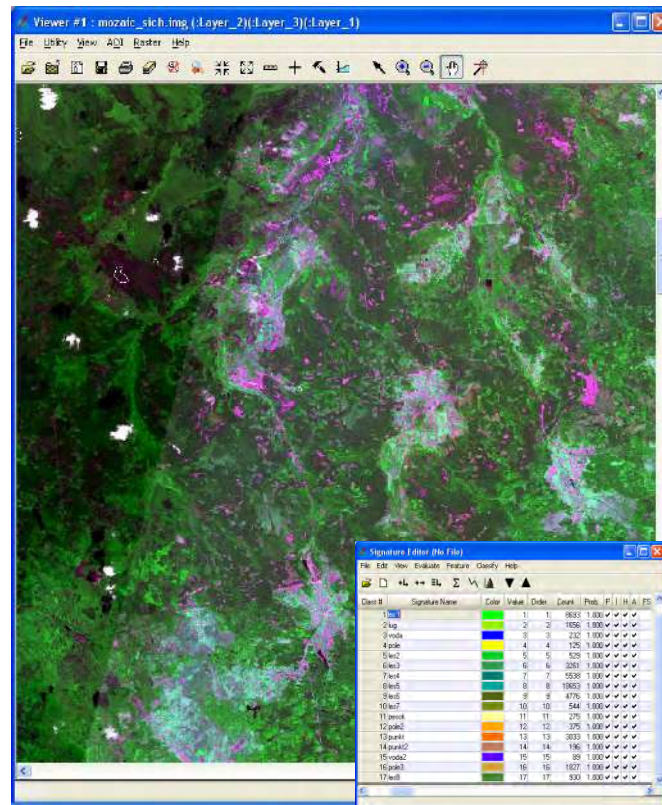


Рис. 3- Створення зображення простору ознак

Модуль класифікації ERDAS Imagine має багато підходів залежно від можливостей зображення, типу створених підписів і вибору аналітика. Під час робіт ми обирали підписи типу «еліпс» (рис. 5).

Для автоматичної класифікації встановлено такі опції:

- пропуск основного вирішального правила — необхідно класифікувати пікселі, які влучають у еліпс, безпосередньо за створеними підписами;

Пікселі, які не є частиною еліпса, слід класифікувати за правилом максимальної ймовірності;

- Перетин еліпсів ігнорується.

Для отримання кольорового зображення виконували комбінацію колонок оригінальних, тематичних і отриманих після узагальнення атрибутів (рис. 6). Внаслідок цього колір напівтонової гама змінюється на відповідний колір із еталонного файлу (рис. 7).

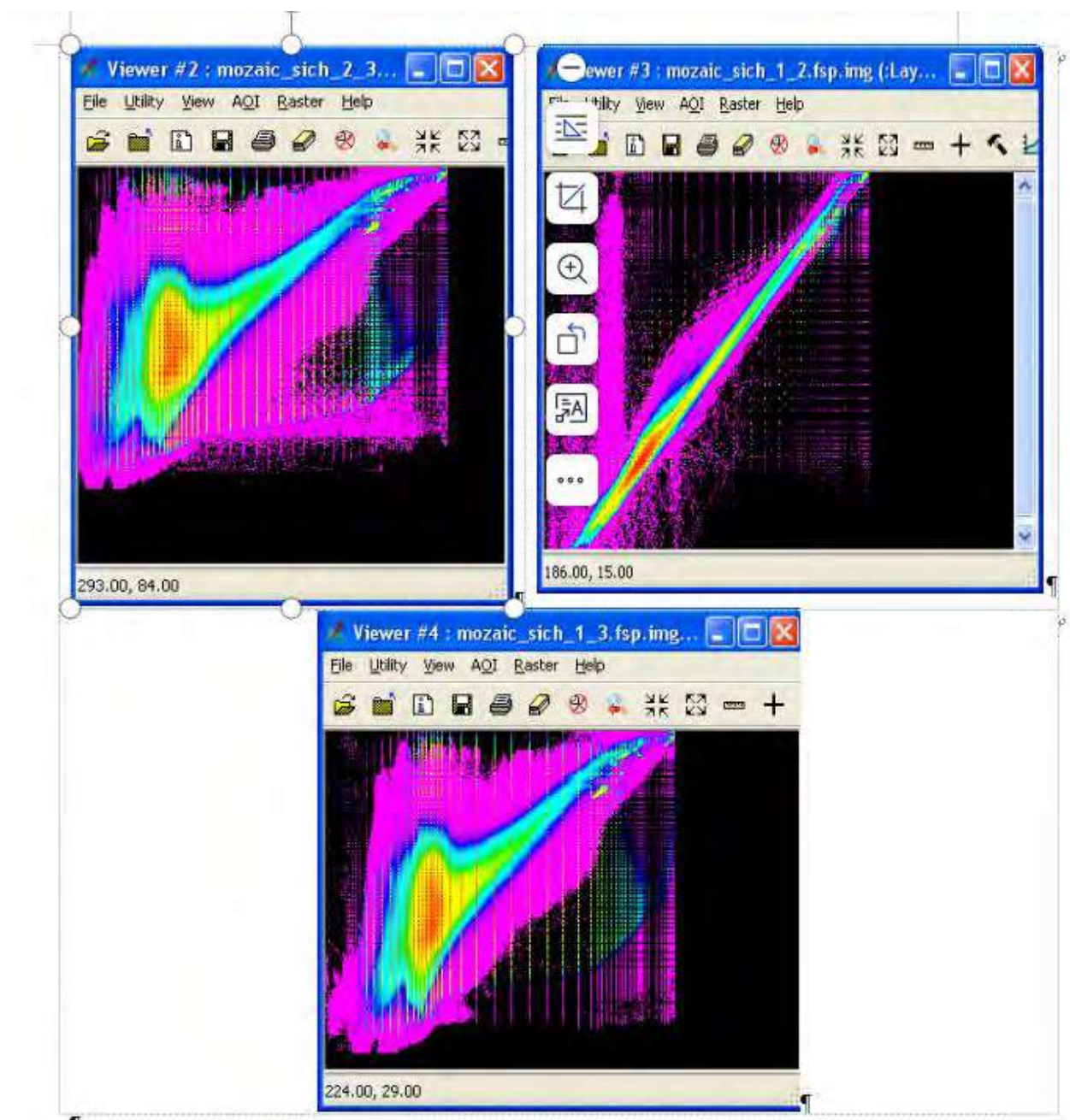


Рис. 4 – Варіанти отриманих зображень простору ознак, сформованих на основі комбінацій різних каналів

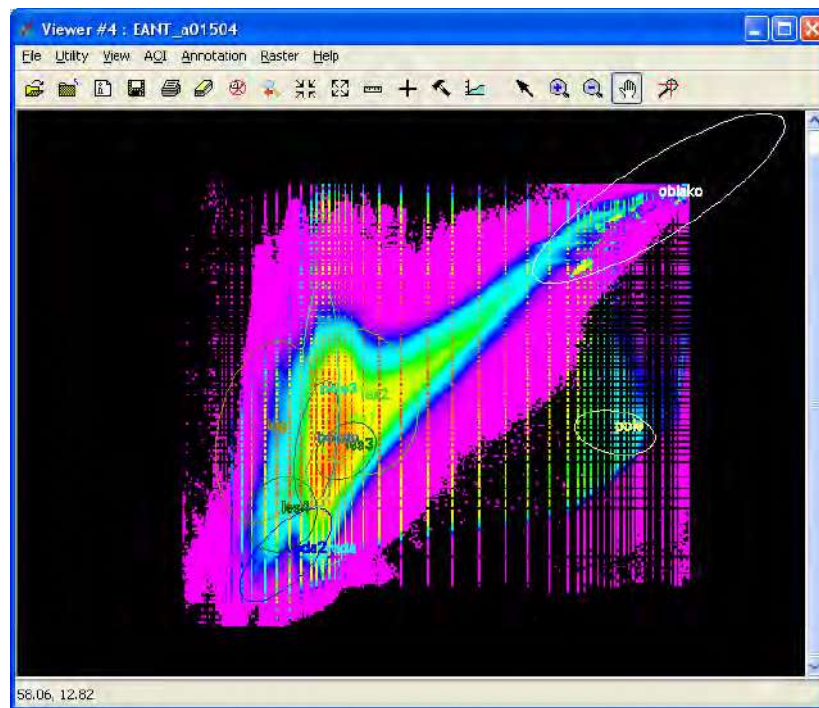


Рис. 5 – Перегляд еталонних об'єктів у зображенні простору об'єктів

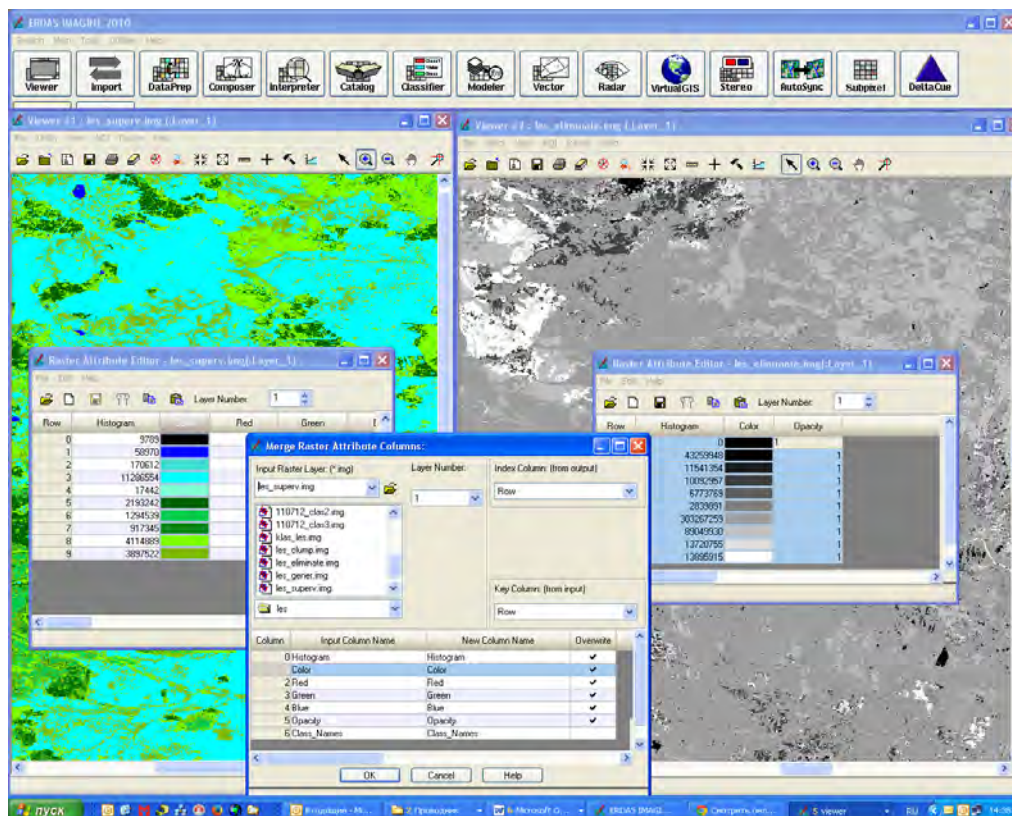


Рис. 6 – Процес встановлення зв'язку між референсними та узагальненими зображеннями

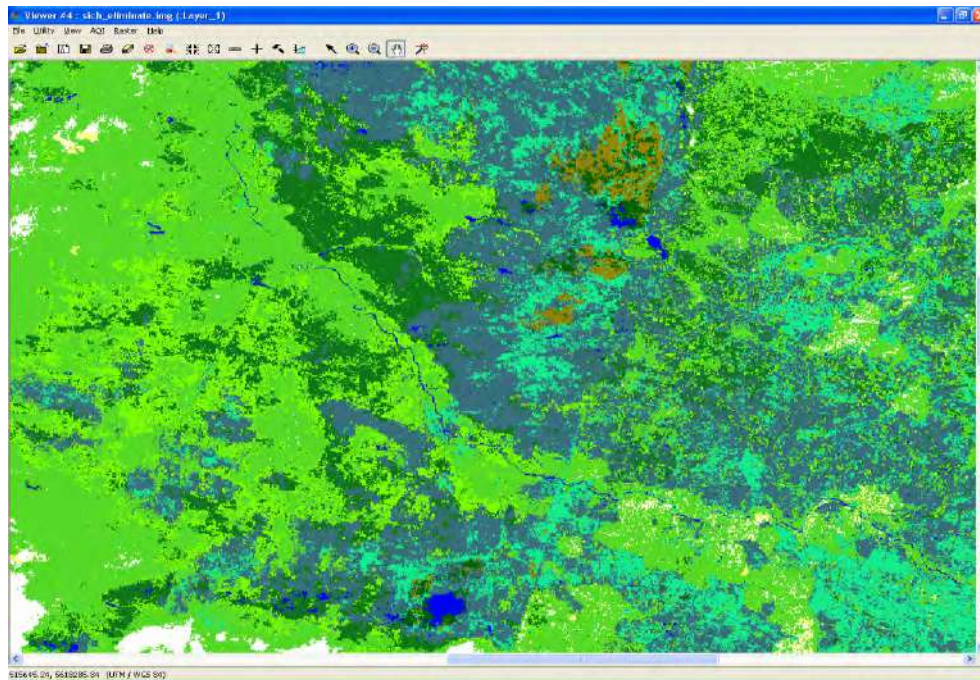


Рис. 7 – Фінальний тематичний образ

Після узагальнення отриманий тематичний образ знову аналізували для уніфікації класів (функція транскодування тематичного растрового шару). Тобто,

якщо розрізнити кілька типів поверхонь і полів, вони об'єднуються в один клас. У результаті було отримано відредаговане зображення (рис. 8).

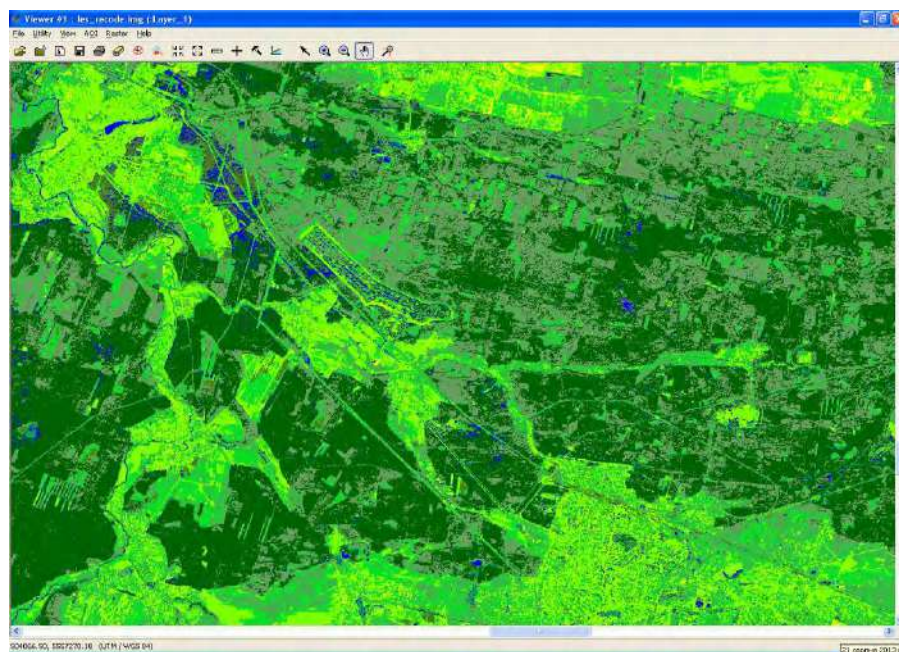


Рис. 8 – Фрагмент зображення після застосування функції транскодування

Отримане зображення використовується для екологічної оцінки наслідків транскордонних конфліктів (прогнозування екологічних процесів і оцінки екологічних ризиків).

Висновки.

1. Для оцінки транскордонного впливу економічної діяльності екологічно небезпечних підприємств та можливих ризиків для довкілля рекомендується

використовувати сучасні інформаційні технології (використання матеріалів для дистанційного зондування Землі з супутників та застосування геоінформаційних технологій).

2. Під час виконання екологічно небезпечних робіт у прикордонних районах існує екологічна небезпека через порушення підземних водоносних горизонтів. Це може призвести до припинення живлення озер, існує загроза мілководдя, зменшення водних площ, що призведе до загибелі унікальних природних резервуарів, втрати деяких видів флори та фауни.

3. Транскордонні екологічні конфлікти можуть призвести до неминучих і незворотних змін у нормальному функціонуванні сільського господарства та лісового господарства, порушення водопостачання мешканців прикордонних районів, погіршення стану гідромеліорації осушених земель. Видобуток і транспортування крейди також спричиняють штучне забруднення повітря.

4. Згідно з даними обробки аерокосмічних досліджень із використанням геоінформаційних технологій, було встановлено, що експлуатація техногенно та екологічно небезпечних об'єктів у прикордонній зоні може призвести до біосферного конфлікту (транскордонне забруднення) та екологічної катастрофи: збільшення потоку води в Чорне море та зменшення потоку води до Балтійського моря. Це призведе до уповільнення водообміну в Шацьких озерах і, як наслідок, до збільшення кількості природних і антропогенних факторів евтрофікації озер Національного природного парку Шацьк.

5. Проведені дослідження показують необхідність вжиття заходів для термінової організації постійного моніторингу стану підземних вод у прикордонній зоні з метою постійного контролю за їхнім станом і своєчасного вжиття необхідних заходів для запобігання можливим негативним екологічним наслідкам на території України.

Бібліографія

1. Закон України «Про ратифікацію Конвенції про оцінку впливу на навколишнє середовище в транскордонному контексті від 19 березня 1999 року No 534-XIV. Угода між Урядом України та Урядом Республіки Білорусь про співпрацю у сфері охорони навколишнього середовища від 16.12.1994

2. Мультиспектральні методи дистанційного зондування Землі в проблемах контролю природи / [Лялько В.І., Федоровський О.Д., Попов М.О. та ін.] редактори В.І. Лялька, М.О. Попов.— Київ: Наук.Думка, 2006.— 357 с.

3. Бондар О.І., Машков О.А., Присяжний В.І., Аваденко Т.С., Печений В.Л. Парадигма обробки інформації в інтелектуальній інформаційній системі для підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки / екологічних наук: науково-практичний журнал. Нью-Йорк: DEA, випуск 4(49), 2023, с. 144-152.

4. Концепція створення інтелектуальної інформаційної системи для підтримки прийняття рішень у сфері екологічної безпеки. Бондар О.І., Машков О.А., Присяжний В.І., Аваденко Т.С., Печений В.Л. / Екологічні науки: Науково-практичний журнал. Нью-Йорк: DEA, випуск 3(48), 2023, стор. 7-16.

5. Машков О.А., Аль-Тамімі Р.К.Н., Ламі Д.Д.Х. Використання даних аерокосмічного моніторингу для оцінки транскордонних екологічних конфліктів / Збірка наукових статей / Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювальної розвідки ISDMSI'2015, - Херсон, 2018, с. 96-105.

6. Пічугін М.Ф., Машков О.А., Сасук І.М., Кирилюк В.А. Обробка геофізичних сигналів у сучасних автоматизованих комплексах, Житомир, ред. JVIRE, 2006, 176 с.

7. Системи штучного інтелекту: підручник. / Н. Б. Шаховська, Р. М. Камінський, О. Б. Вовк. - Львов: Львівське політехнічне видавництво, 2018. - 392 с. - ISBN 966-941-197-6 .

8. Нільс Дж. Нільссон. Пошук штучного інтелекту. – 1. - Видавництво Кембриджського університету, 2009. – 578 с. – ISBN 978-0521116398.

9. Стюарт Дж. Рассел, Пітер Норвіг. Штучний інтелект: сучасний підхід. – 3. – Пірсон, 2015. – ISBN 978-9332543515.

УДК 504.064.4:57.089.2:528.94

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-05>

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ СКРИНІНГ ПАЛИНОТОКСИЧНОСТІ АВТОТРАНСПОРТНИХ ВИКИДІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БІОІНДИКАТОРІВ І ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ

Морозова Т.В.

Державна наукова установа «Інститут екологічного
відновлення та розвитку України»
вул. Василя Липківського, 35/2, 02000, Київ
erdu@urk.net

Анотація. У статті представлено результати просторово-часового скринінгу палинотоксичності автотранспортних викидів у міському середовищі із застосуванням трьох біоіндикаторних видів рослин (*Cerasus vulgaris* Mill., *Taraxacum officinale* F. Web., *Tussilago farfara* L.). Метою дослідження було визначення характеру морфометричних змін пилкових зерен і рівня їх стерильності під впливом діоксиду карбону та супутніх техногенних чинників. Установлено, що види реагують на забруднення по-різному: *C. vulgaris* характеризується істотним зменшенням довжини та ширини пилкових зерен; для *T. officinale* найбільш показовим є зростання рівня індукованої стерильності за незначних морфометричних коливань; *T. farfara* демонструє зменшення розмірів навіть фертильних пилкових зерен, що свідчить про високу чутливість цього виду до дії аерополітантів.

Кореляційний аналіз виявив пряму залежність середнього рівня між концентрацією CO₂ та часткою безкромхмальних пилкових зерен усіх досліджених видів, а також зворотну залежність між концентрацією CO₂ та довжиною пилку. Це підтверджує, що морфометричні параметри й рівень стерильності пилку функціонують як взаємодоповнювальні маркери палинотоксичності. Отримані дані свідчать

про перспективність використання пильцевого методу для оперативної діагностики аеротехногенного навантаження в умовах інтенсивного автотрафіку. Показано ефективність інтеграції результатів біоіндикації з геоінформаційним аналізом для формування локальних карт палинотоксичності, виявлення критичних ділянок міського простору та оптимізації структурно-ландшафтного планування. Найчутливішими до впливу автотранспортних викидів виявилися *T. officinale* та *T. farfara*, що визначає їхній потенціал у розвиткові системи біосурвейлансу урбанізованих територій.

Ключові слова: палинотоксичність; автотранспортні викиди; оксид карбону (II); пильцевий тест; біоіндикація; стерильність пилку; морфометрія пилку; просторово-часовий скринінг; аеротехногенне навантаження; GIS-картографування.

**Spatio-temporal screening of fuel toxicity
of motor vehicle emissions using
bioindicators and gis technologies**
Morozova T.V.

State Scientific Institution “Institute of
Ecological Restoration and Development of
Ukraine”

Abstract The study presents the results of a spatiotemporal screening of pollen toxicity

caused by vehicle emissions in an urban environment, using three plant species as bioindicators: *Cerasus vulgaris* Mill., *Taraxacum officinale* F. Web., and *Tussilago farfara* L. The research aimed to assess changes in pollen morphology and the proportion of sterile pollen grains under the influence of carbon dioxide (CO₂) and related anthropogenic stressors. The species demonstrated different sensitivity patterns: *C. vulgaris* showed a pronounced reduction in pollen length and width; *T. officinale* exhibited a significant increase in induced sterility with only minor morphometric variations; *T. farfara* responded with a notable decrease in the size of even fertile pollen grains, indicating elevated susceptibility to aerotechnogenic pollution.

Correlation analysis revealed a direct relationship between CO₂ concentration and the proportion of starchless (sterile) pollen grains across all species, as well as an inverse relationship between CO₂ concentration and pollen length. These findings indicate that both pollen sterility and morphometric characteristics function as complementary markers of pollen toxicity. The obtained results confirm the diagnostic potential of the pollen-based bioindication method for assessing air pollution caused by vehicle emissions.

The integration of bioindicator data with GIS analysis proved effective for mapping local gradients of pollen toxicity, identifying critical zones within the urban landscape, and supporting environmentally oriented spatial planning. Among the analyzed species, *T. officinale* and *T. farfara* were identified as the most sensitive to elevated CO₂ levels, highlighting their value for further development of urban biosurveillance systems.

Keywords: baseline studies, ESIA, EIA, wind energy, birds, bats, biodiversity, GIS modeling, collision risk model, environmental monitoring, Ukraine.

Забруднення довкілля токсикантами техногенного походження протягом останніх десятиліть набуло загрозливих

масштабів. Надходження до природних екосистем нехарактерних для них речовин становить пряму небезпеку для біоти. До основних антропогенних джерел забруднення навколишнього середовища належить автотранспорт. Дослідження численних авторів засвідчують, що компоненти автотранспортних викидів здатні негативно впливати на урожайність, спричиняти локальне забруднення довкілля та формувати небажані екологічні наслідки. Для їх запобігання необхідно проводити скринінг речовин, що входять до складу викидів, з метою визначення рівня їх токсичності для фітоценозів. У цьому контексті ефективно зарекомендував себе мікрогаметофітний аналіз.

Саме тому метою нашого дослідження стало оцінювання наслідків аеротехногенного забруднення довкілля автотранспортними викидами за їх гаметоцидним впливом на рослини, який проявляється у зростанні частки стерильних безкрахмальних пилкових зерен. Як зазначає Ібрагімова Е. Е., цей показник може слугувати індикатором мутагенної дії аерополітантів на репродуктивні органи рослин.

Для обґрунтування вибору літературних джерел та методологічних підходів до використання пилку як біоіндикатора було проаналізовано ключові публікації останніх років, які стосуються впливу антропогенних факторів, зокрема автотранспортних викидів, на морфологічні та репродуктивні характеристики пилку рослин. У таблиці 1 систематизовано рекомендовані джерела, їх тематику, тип забруднення та практичну цінність для дослідження. Це дозволяє чітко бачити, які методики та види рослин найчастіше застосовуються для біоіндикації стану атмосферного повітря в умовах урбанізованого середовища.

Таблиця 1

Використання пилку як біоіндикатора забруднення атмосферного повітря

Джерело / Автори / Назва	Тип забруднення / фактор впливу	Практична цінність для дослідження
<i>Pollution of the Environment and Pollen: A Review</i> (MDPI, 2020)	транспортні та промислові викиди	теоретичне обґрунтування використання пилку як біоіндикатора; висвітлює зміни морфології, стерильності та життєздатності пилку
<i>Impact of air pollution on reproductive biology of plants: Mechanisms and consequences</i> (Plant Stress, 2025)	загальне забруднення повітря	показує вплив забруднення на репродуктивну систему рослин, формування пилку, життєздатність; сучасна парадигма для методики дослідження
<i>Using of Taraxacum officinale (L.) pollens for the urban park bioindication</i> (Ukrainian Journal of Ecology, 2020)	міське антропогенне навантаження	демонструє залежність частки нежиттєздатного пилку від антропогенного навантаження; прямий приклад для вашого підходу
<i>Біоіндикація якості навколишнього середовища з використанням кульбаби лікарської (Taraxacum officinale Wigg.)</i> (Таврійський науковий вісник, 2024)	урбанізація, антропогенне забруднення	порівняння морфологічних ознак та абортивних пилкових зерен на ділянках з різним рівнем антропогенного впливу
<i>Еколого-біологічні особливості Taraxacum officinale Wigg за дії забруднення важкими металами в умовах промислового Криворіжжя</i> (2019)	важкі метали	методологія для оцінки змін пилку в умовах техногенного навантаження; корисно для порівняння впливу різних типів забруднення
<i>Using the pollen viability and morphology for fluoride pollution biomonitoring</i> (Journal of Environmental Quality / PubMed, 2011)	фториди та інші хімічні забруднювачі	демонструє чутливість пилку до різних типів забруднення; показує універсальність пильцевого методу для біоіндикації

Для біотестування екологічного стану приземного шару повітря на вулицях міста використано пилок трав'яних (*Taraxacum officinale* F. Web. ex Wigg., *Tussilago farfara* L.) та деревних рослин (*Cerasus vulgaris* Mill.). У цих видів визначали рівень спонтанної та індукованої стерильності пилкових зерен за стандартною методикою [6]. Пилок збирали в період масового цвітіння. Матеріалом слугували чоловічі суцвіття рослин, що зростають у придорожній зоні автошляхів з різною інтенсивністю транспортного

потoku. Контрольні зразки відбирали на території заказника загальнодержавного значення «Цецино». Фертильність пилкових зерен визначали йодним методом на тимчасових давлених препаратах; у кожному варіанті аналізували не менше ніж 2000 пилкових зерен. Морфологічну структуру зерен вивчали із застосуванням системи морфометричного аналізу зображень. Статистичну обробку даних виконували за допомогою пакета прикладних програм Microsoft Excel;

достовірність різниць оцінювали за t -критерієм Стьюдента.

За даними обласного статистичного управління [8], забруднення атмосферного повітря м. Чернівці формують як стаціонарні, так і пересувні джерела, причому 56,2 % загального обсягу шкідливих викидів припадає саме на пересувні джерела. Найбільше навантаження створює індивідуальний автотранспорт. У 2014 році ним в атмосферу було викинуто 28,75 тис. т забруднювальних речовин – на 1,3 тис. т більше, ніж у попередньому році. Зокрема, викиди включали 23 тис. т оксидів вуглецю (80 %), 3,74 тис. т вуглеводнів (13 %) та 1,73 тис. т оксидів азоту (6 %). У перерахунку на 1 км² площі міста щільність автотранспортних викидів становить 3,3 т.

З огляду на це нами проаналізовано інтенсивність руху автотранспорту та концентрацію оксиду вуглецю в повітрі на вулицях міста. Найбільша інтенсивність руху становила 1680 автомобілів на годину, найменша – 185 одиниць. Суттєво відрізняється і якісний склад транспортних потоків, що пов'язано з особливостями просторового розміщення вулиць. Найбільше навантаження припадає на легковий транспорт, особливо на центральних вулицях. Загальну оцінку завантаженості здійснено відповідно до ГОСТ 17.2.2.03-77: мінімальна кількість транспортних засобів становила 4565 автомобілів на добу, максимальна – 40 320.

Відомо, що інтенсивність руху та якісний склад автотранспорту визначають рівень забруднення атмосферного повітря. Подальший аналіз стосувався концентрації оксиду вуглецю у приземному шарі повітря. Встановлено, що рівень забруднення залишається високим: максимальна концентрація СО сягала 75,8 мг/м³, що у 15 разів перевищує ГДК. Такі показники можна пояснити як високою інтенсивністю руху (1640 авто/год), так і особливостями забудови – багатоповерхові будинки з обох боків вулиці, кільцеве перехрестя, розташування в центральній частині міста,

що зумовлює недостатню аерацію. На трьох центральних вулицях спостерігається ефект «аеродинамічної труби», який додатково посилює аеротехногенне забруднення.

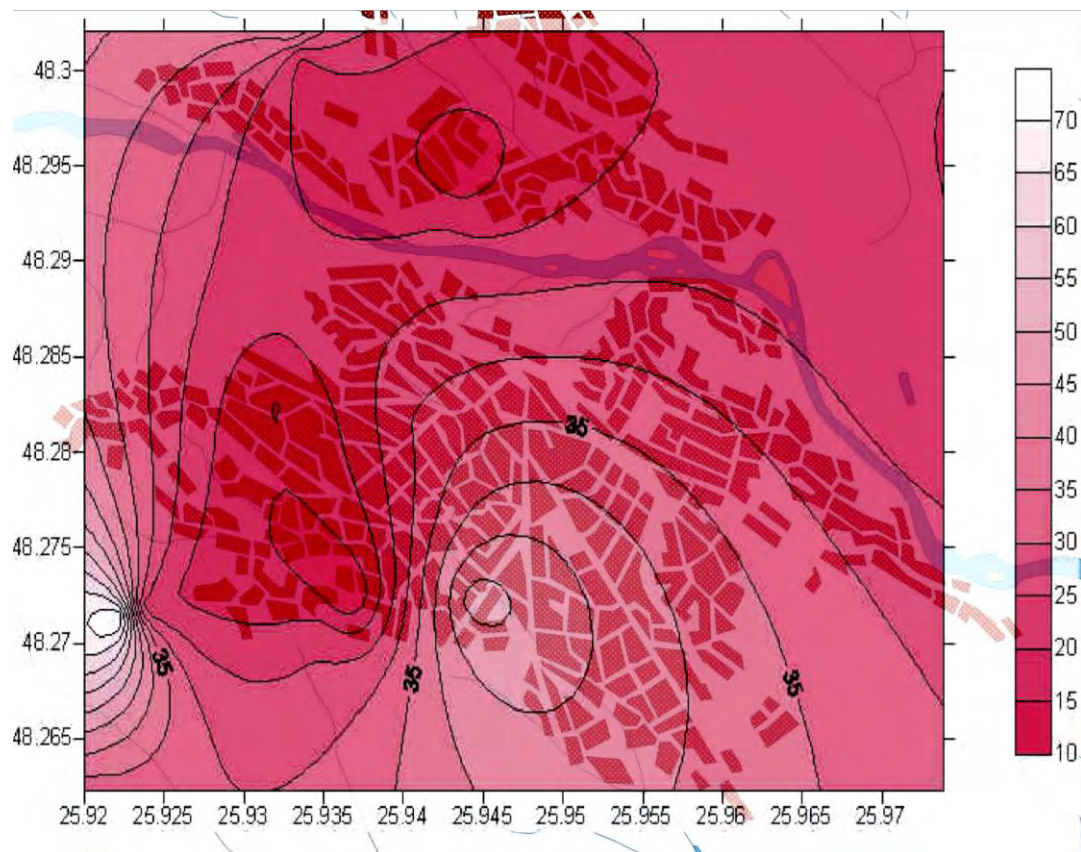
Для наочного представлення просторової структури забруднення створено геоінформаційну карту, що відображає розподіл концентрацій оксиду вуглецю у приземному шарі повітря (рис. 1).

Таким чином, проведені нами дослідження засвідчили, що найвищий рівень забруднення оксидом вуглецю спостерігається у центральній частині міста та в промислових районах. Характерною особливістю є також підвищений вміст оксиду вуглецю на всій території міста. Отже, значна кількість автотранспорту, що рухається міськими вулицями, спричиняє погіршення якості атмосферного повітря, зокрема підвищення концентрації оксиду вуглецю.

Добре відомо, що чоловічий гаметофіт вирізняється високою чутливістю до дії несприятливих чинників довкілля. Метод визначення стерильності пилку є одним із ефективних інструментів оцінювання екологічного стану територій. За умов забруднення середовища кількість крахмаловмісних пилових зерен зменшується [1, 2], проте це питання в літературі висвітлено недостатньо.

Встановлено, що пилкок *C. vulgaris* у більшості випадків морфологічно сформований, добре забарвлюється барвниками та є фертильним (до 83 %). Відомо також, що якість пилку істотно залежить від особливостей метеорологічних умов і походження рослин [9]. Нами визначено доволі низький спонтанний рівень стерильності пилових зерен (8,2 %), що продукуються генеративними органами *C. vulgaris* у екологічно сприятливій зоні.

У всіх без винятку моніторингових точках зафіксовано певний рівень індукованої стерильності пилку всіх досліджених рослин.

Рис. 1. Концентрація CO₂ в повітрі урбоєкосистеми

Показники стерильності чоловічого гаметофіту різко зростали у рослин, що зростають уздовж вулиць із високою інтенсивністю руху, особливо на ділянках із недостатньою аерацією території. Індукована аеротехногенним забрудненням

стерильність пилових зерен зростала у дерев, що зростають у цих точках, у кілька разів порівняно з контрольним варіантом. Так, частка абортівних пилових зерен збільшувалася у 3,5–4 рази (рис. 2).

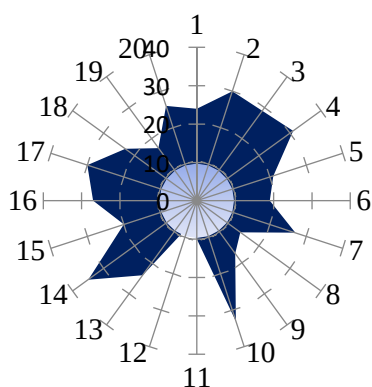
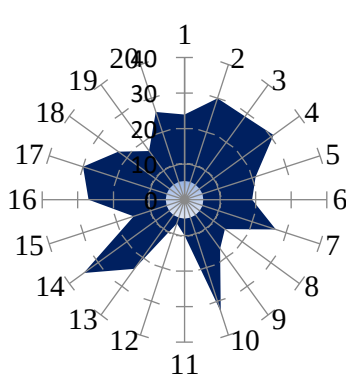
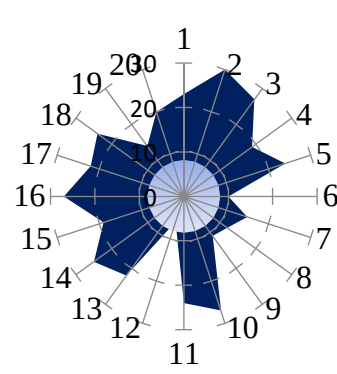
*T officinale**T farfara**C. vulgaris*

Рис. 2. Стерильність пилових зерен біоіндикаторів

У зоні інтенсивного транспортного руху частка абортівного пилку становила 31 % від загальної кількості пилових зерен. Водночас у деяких моніторингових

точках, попри зростання інтенсивності руху та відповідно збільшення емісії екотоксикантів, кількість стерильного пилку дещо знижувалася — до 27 %.

Імовірно, це може бути пов'язано з наявністю або відсутністю локальної аеродинамічної тіні. У цілому зафіксовано достовірне зростання частки безкрохмальних пиляків у рослин, що зростають на більшості досліджених вулиць. Водночас у низці моніторингових точок рівень їх стерильності залишався на рівні контрольних значень, хоча інтенсивність руху автотранспорту на цих ділянках є достатньо високою. Ймовірно, це пов'язано з вдалим інженерно-архітектурними рішеннями: одно- чи малоповерховою забудовою, наявністю деревних насаджень, відсутністю перехрест'я, відповідно, кращою аерацією простору.

Встановлено, що в зоні сильного забруднення формувалося більше життєздатної пилку, тоді як за умов середнього забруднення зростала частка особин із нижчою фертильністю чоловічого гаметофіту. Зниження якості пилку за середнього рівня забруднення пов'язане з ембріотоксичною та кластогенною дією аерополітантів на репродуктивну систему рослин [3]. Отримані результати свідчать, що викиди автотранспорту негативно впливають на чоловічу репродуктивну сферу *C. vulgaris*, що проявляється у зростанні частки стерильних пиляків. Аналіз частки безкрохмальної пилку *T. officinale* показав, що цей вид є чутливішим порівняно з *C. vulgaris*. Лише в одній моніторинговій точці відмічено рівень стерильності, близький до спонтанних значень. В інших точках встановлено достовірне підвищення індукованої стерильності пилку *T. officinale*, причому максимальне перевищення становило 3,6 рази. Подібна тенденція до зростання частки безкрохмальних пиляків зафіксована і для *Tussilago farfara* L.

На відміну від даних інших авторів [2], у нашому дослідженні стерильні пиляки не проявляли виразної деформації, натомість фертильні зерна відрізнялися за розмірами. Це стало підставою для визначення морфометричних параметрів пилку біоіндикаторів. Для видів вишні

характерна незначна кількість зерен зі зміненою формою (заглибини, виїмки, видовження тощо). Виявлено мінімальне значення довжини пилку *C. vulgaris* – 2,9 мкм за контрольного показника 3,9 мкм; мінімальна ширина становила 2,8 мкм за контрольних 3,8 мкм, що також достовірно відрізняється від контролю (табл. 1). Ймовірно, під дією аерополітантів у пиляках виникають локальні мутації, що стосуються переважно форми пилкових зерен.

У низці моніторингових точок виявлено істотне зменшення як довжини, так і ширини пилку. Саме в цих пунктах зафіксовано високу інтенсивність автотрафіку та підвищений вміст оксиду карбону в приземному шарі повітря. Отже, отримані результати підтверджують участь оксиду карбону (II) у зміні морфометричних характеристик пилку *C. vulgaris*.

У літературі наведено дані про вплив забруднення довкілля важкими металами (Fe, Mn, Cr, Zn, Cu тощо) на морфофізіологічні властивості пилку – автори повідомляють не лише про зниження фертильності, а й про зменшення розмірів пилкових зерен [3, 7]. Подібні закономірності виявлені й у нашому дослідженні: у точках із найвищим рівнем стерильності пилку вишні встановлено достовірне зменшення його морфометричних параметрів.

Для *T. officinale*, так само як і для наведеного вище виду, виявлено зменшення розмірів пилкових зерен (табл. 1). Водночас необхідно зазначити, що морфометричні параметри пилку змінювалися не настільки суттєво, як рівень його стерильності. На відміну від *C. vulgaris*, морфометричні характеристики пилку *Taraxacum officinale* F. Web. змінювалися однорідно. Порівняння результатів аналізу пилку вишні та кульбаби продемонструвало істотні відмінності між параметрами пилку досліджених видів. Так, у низці моніторингових точок зафіксовано достовірне зменшення довжини та ширини пилкових зерен *Cerasus vulgaris* Mill., тоді

як для *T. officinale* характерне істотне зростання рівня індукованої стерильності пилку при майже незмінних його морфометричних показниках. Довжина пилку кульбаби коливалася у межах 3,5–4,9 мкм за контрольного значення 4,5 мкм, а ширина — 3,6–4,8 мкм за контрольного значення 4,0 мкм.

На відміну від попередніх видів, для *Tussilago farfara* L. встановлено достовірне зменшення морфометричних показників. Крім того, у рослин, що зростають у цих точках, виявлено достовірне збільшення частки пиляків, які не містять крохмалю, на тлі одночасного достовірного зменшення їхніх морфометричних характеристик. В інших точках спостереження зафіксовано достовірне зменшення або довжини, або ширини пилку. Мінімальна довжина пилкових зерен становила 2,9 мкм, що на 26 % менше за контрольне значення; мінімальна ширина – 2,8 мкм за контрольного показника 3,8 мкм.

Узагальнюючи ці результати, можна констатувати, що досліджені біоіндикатори, реагуючи на однакові антропогенні чинники схожим рівнем стерильності пилку, вирізняються різними типами морфометричної відповіді. Окремо слід підкреслити специфічну особливість пилку *Tussilago farfara* L.: встановлено зменшення розмірів фертильних пилкових зерен за практично незмінного відсотка їх стерильності.

Для об'єктивної оцінки залежності між змінами рівня стерильності пилку біоіндикаторів і концентрацією оксиду карбону в атмосферному повітрі проведено парний кореляційний аналіз. Його результати засвідчили пряму кореляційну залежність середнього рівня між концентрацією оксиду карбону (II) та часткою безкрохмальних пилкових зерен усіх досліджених видів ($r = 0,52\text{--}0,63$). Також встановлено обернену кореляційну залежність між концентрацією оксиду карбону (II) та довжиною пилкових зерен у всіх без винятку біоіндикаторів. Щодо ширини пилкових зерен виявлена інша

закономірність – зафіксовано слабкий кореляційний зв'язок.

Таким чином, результати дослідження свідчать про участь оксиду карбону разом із кліматичними чинниками у збільшенні кількості стерильних пилкових зерен у зазначених видів рослин. Отримані дані підтверджують придатність пильцевого методу для діагностики забруднення атмосферного повітря викидами автотранспорту. Показано пряму кореляцію між середнім рівнем стерильної пилку та концентрацією оксиду карбону в повітрі, а також обернений зв'язок між концентрацією оксиду карбону (II) та довжиною пилку досліджених видів. Серед аналізованих біоіндикаторів найбільш чутливими до вмісту оксиду карбону (II) в атмосферному повітрі виявилися *Taraxacum officinale* F. Web. ex Wigg. та *Tussilago farfara* L.

Подальший розвиток досліджень передбачає розширення спектра біоіндикаторних видів та формування багаторівневої системи оцінювання чутливості рослин до автотранспортних викидів. Важливим напрямом є створення інтегральної шкали палинотоксичності, що об'єднає морфометричні параметри пилку, рівень стерильності та концентрацію аерополітантів у єдину діагностичну систему.

Перспективною є інтеграція результатів пильцевого аналізу з просторово-часовими даними про транспортні навантаження, мікрокліматичні модифікатори та хімічний склад атмосферного повітря. Це дасть змогу сформувати ГІС-орієнтовані моделі ризикам, відображати сезонну динаміку токсичного навантаження і прогнозувати стан повітря під впливом автотранспорту.

Окрему увагу доцільно приділити застосуванню машинного навчання та комп'ютерного зору для автоматизованого аналізу морфометрії пилку. Запровадження таких технологій забезпечить швидке опрацювання великих масивів даних та підвищення об'єктивності оцінювання палинотоксичності.

Подальші дослідження комбінованого впливу CO, NO_x, O₃ і твердих частинок сприятимуть розвитку мультипараметричного біосурвейлансу та оптимізації системи моніторингу якості повітря в урбанізованих умовах.

Висновки. Встановлено, що пилкові зерна *Cerasus vulgaris* Mill., *Taraxacum officinale* F. Web. та *Tussilago farfara* L. по-різному реагують на вплив автотранспортних викидів, формуючи видоспецифічні типи морфометричних змін та рівнів стерильності. Найбільш виражені морфометричні відхилення зафіксовано у *C. vulgaris* та *T. farfara*. Визначено, що для *T. officinale* характерне зростання рівня стерильності без істотної зміни розмірів пилку, тоді як для *T. farfara* виявлено зменшення довжини та ширини навіть фертильних зерен на тлі стабільного відсотка стерильності. Проведений парний кореляційний аналіз підтвердив пряму залежність між концентрацією CO₂ та часткою стерильних пилових зерен ($r = 0,52-0,63$) та зворотну залежність між рівнем CO₂ і довжиною пилових зерен усіх індикаторних видів. Показано діагностичну здатність пильцевого методу у виявленні токсичного впливу автотранспортних викидів. Найчутливішими до палинотоксичності виявилися *T. officinale* та *T. farfara*. Обґрунтовано доцільність поєднання даних пильцевого аналізу з геоінформаційними технологіями для створення локальних карт палинотоксичності та просторового виділення екологічно напружених ділянок.

Література

1. MDPI. (2020). *Pollution of the environment and pollen: A review*. MDPI. <https://www.mdpi.com/>
2. Plant Stress. (2025). *Impact of air pollution on reproductive biology of plants: Mechanisms and consequences*. ScienceDirect. <https://www.sciencedirect.com/>
3. Ukrainian Journal of Ecology. (2020). *Using of Taraxacum officinale (L.) pollens for the urban park bioindication*. Mendeley. <https://www.mendeley.com/catalogue/ed17a51b-41a1-34a0-80d1-575b21f9bc49>
4. Комарова, І. О. (2024). Біоіндикація якості навколишнього середовища з використанням кульбаби лікарської (*Taraxacum officinale* Wigg.). Таврійський науковий вісник. <http://lib.udau.edu.ua>
5. Khomenko, T. K. (2019). Еколого-біологічні особливості *Taraxacum officinale* Wigg за дії забруднення важкими металами в умовах промислового Криворіжжя. Elibrary KDPU. <http://elibrary.kdpu.edu.ua>
6. Majd, A., Rezanejad, F., & collaborators. (2012). *Using the pollen viability and morphology for fluoride pollution biomonitoring*. Journal of Environmental Quality 147(1-3):315-9. [doi:10.1007/s12011-011-9290-8](https://doi.org/10.1007/s12011-011-9290-8)
7. Морозова Т.В., Хрутьба В.О., Кобзиста О.П. Скринінг паліноморфологічного та палинотоксичного ефекту автотранспортних емісій. Науково-технічний збірник Вісник Національного транспортного ун-ту. Серія «Технічні науки» Випуск 3 (43), 2019. С. 116-126. [doi:10.33744/2308-6645-2019-1-43-116-126](https://doi.org/10.33744/2308-6645-2019-1-43-116-126).

УДК 622.24:504.064

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-06>

ФІЗИКО-ХІМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА БУРОВИХ ШЛАМІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА КОМПОНЕНТИ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА

Заріцький В. Б., Коцюбинський А. О., Линник Д. О.,
Угриновський І. Т., Калин Т. І., Турчин О. Р.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Нафтогазова промисловість є однією з ключових галузей економіки України, проте її діяльність супроводжується значним техногенним навантаженням на довкілля. Особливу екологічну небезпеку становлять виснажені нафтові свердловини, які після припинення експлуатації залишаються потенційними джерелами забруднення геологічного середовища. Буріння та експлуатація нафтових свердловин супроводжується утворенням значних обсягів відходів, зокрема бурових шламів та відпрацьованих бурових розчинів, що містять складні суміші хімічних речовин. Бурові шлами становлять серйозну загрозу для геологічного середовища, підземних водоносних горизонтів, ґрунтового покриву та

екосистем. У роботі представлено результати фізико-хімічної характеристики бурових шламів з різних глибинних інтервалів в зоні впливу нафтових свердловин. Для визначення елементного та оксидного складу застосовано метод енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного аналізу, що забезпечив комплексну оцінку вмісту основних компонентів та мікроелементів. Досліджено варіабельність хімічного складу бурових шламів залежно від літологічних особливостей геологічного розрізу та властивостей використовуваних бурових розчинів. Проведено оцінку впливу бурового шламу на геологічне середовище.

Ключові слова: буріння, свердловина, забруднення, буровий шлам, геологічне середовище, довкілля.

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF DRILLING SLURRIES AND THEIR IMPACT ON COMPONENTS OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT

Zaritskyi Vitaly Bogdanovych, Kotsyubynsky Andrew Olegovych, Lynnyk Diana Oleksandrivna, Ugrynovsky Ivan Tarasovych, Kalyn Tetiana Ivanivna, Turchyn Oleg Romanovych

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

The oil and gas industry is one of the key sectors of Ukraine's economy, but its activity is accompanied by a significant technogenic burden on the environment. Exhausted oil wells, which after the termination of operation, remain potential

sources of pollution of the geological environment, are a special environmental hazard. Drilling and operation of oil wells is accompanied by the generation of significant volumes of waste, in particular, drilling muds and spent drilling fluids

containing complex mixtures of chemicals. Drilling cuttings pose a serious threat to the geological environment, underground aquifers, soil cover and ecosystems. The paper presents the results of the physical and chemical characteristics of drilling muds from different depth intervals in the zone of influence of oil wells. The method of energy dispersive X-ray fluorescence analysis was used to determine the elemental and oxide composition, which provided a comprehensive assessment of the content of the main components and trace elements. The variability of the chemical composition of drilling muds was studied depending on the lithological features of the geological section and the properties of the used drilling fluids. The impact of drilling mud on the geological environment was assessed.

Key words: drilling, well, pollution, drilling mud, geological environment, environment.

Постановка проблеми.

Нафтогазова промисловість є однією з ключових галузей економіки України, проте її діяльність супроводжується значним техногенним навантаженням на довкілля. Особливу екологічну небезпеку становлять виснажені нафтові свердловини, які після припинення експлуатації залишаються потенційними джерелами забруднення геологічного середовища важкими металами, вуглеводнями та токсичними хімічними сполуками. Буріння та експлуатація нафтових свердловин супроводжується утворенням значних обсягів відходів, зокрема бурових шламів та відпрацьованих бурових розчинів. За різними оцінками, буровий розчин та буровий шлам разом утворюють другий за величиною обсяг залишків у розвідувально-видобувній галузі. Ці відходи містять складні суміші хімічних речовин, включаючи важкі метали (свинець, цинк, хром, кадмій, миш'як), барит, бентоніт, органічні забруднювачі та радіоактивні ізотопи. Покинуті та виснажені свердловини можуть

протікати під землею, забруднюючи ґрунтові води та поверхневі ґрунти навіть за відсутності видимих викидів на поверхні. Процеси вивітрювання бурових шламів, що складаються біля свердловин, призводять до міграції забруднювачів у навколишнє середовище, впливаючи на мікробну активність ґрунту, розчинність поживних речовин та екосистеми в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес буріння нафтових і газових свердловин є складною та капіталомісткою операцією, що включає декілька послідовних етапів: буріння, облаштування та введення в експлуатацію свердловини. Критичним елементом успішного проведення бурових робіт є застосування бурових розчинів, які зазвичай складаються з води, глини та різноманітних хімічних добавок, включаючи біоциди, мастильні речовини та обважнювачі. Бурові розчини виконують багато важливих функцій у процесі буріння та рециркулюють між свердловиною і платформою багаторазово [4]. Однак після численних циклів використання ці рідини перетворюються на відходи, що становить серйозну екологічну проблему [7, 8].

Буровий розчин та буровий шлам разом формують другий за обсягом вид залишків у розвідувально-видобувній галузі [4]. Залишковий буровий розчин є одним з найбільших відходів нафтогазової індустрії, а його різноманітність та хімічна складність значно зросли в останні десятиліття. У процесі експлуатації буровий розчин зазнає трансформації: хімічні речовини у його складі перетворюються на забруднювачі, він контактує з сировою нафтою при досягненні продуктивного пласта, а також змішується з ґрунтовими водами, що містять солі та важкі метали [8]. Буровий шлам характеризується складним хімічним складом і містить важкі метали, барит, бентоніт, спеціальні

хімічні реагенти, вуглеводні, органічні забруднювачі та радіоактивні ізотопи. Значні обсяги бурових відходів утворюються протягом усього процесу буріння до досягнення продуктивного горизонту. При цьому у відходах часто виявляють високі концентрації важких металів, зокрема свинцю, цинку, хрому, кадмію, миш'яку та магнію. Концентрація важких металів у буровому шламі визначається типом використовуваного бурового розчину, його добавок та мінералогічним складом формацій, через які проходить свердловина [9, 12].

Згідно досліджень є дві основні групи джерел забруднення важкими металами під час буріння свердловин. На початковому етапі домінуючим фактором є літологічний склад геологічних формацій, через які проходить стовбур свердловини, тоді як на наступних етапах основним джерелом стають добавки до бурового розчину [3]. Більшість металевих компонентів бурового шламу є прямими переносами з хімічних речовин і добавок бурових розчинів на водній основі, а також з гірських порід продуктивного пласта [9]. Глибина буріння також впливає на обсяг та склад відходів, оскільки зі збільшенням глибини зростає вміст хімічних речовин та іонів важких металів у шламі [11].

Буровий шлам після завершення робіт зазвичай складається на поверхні землі, де піддається різноманітним процесам вивітрювання. Лужний характер бурового розчину сприяє інтенсивній міграції забруднювачів: при накопиченні або розливі у водоймах чи на земній поверхні токсичні речовини поширюються по всій місцевій гідросистемі та ґрунтовому покриву. Водні потоки та вітрова ерозія розсіюють забруднюючі речовини на значні відстані, що призводить до деградації не лише ґрунтових та водних екосистем, але й негативно впливає на рослинний і тваринний світ [3].

Під час буріння вертикальної розвідувальної свердловини можливе значне пошкодження геологічної формації, що призводить до вивільнення бурового шламу з ушкодженої зони та перекриваючих горизонтів, створюючи потенційну загрозу забруднення підземних водоносних горизонтів та поверхневих ґрунтів [12]. Особливу небезпеку становлять покинуті та виснажені свердловини, які можуть протікати під землею навіть за відсутності видимих викидів метану на поверхні [1].

Забруднювачі впливають на ключові параметри ґрунтової екосистеми: пригнічують мікробну активність, знижують розчинність поживних речовин, погіршують життєдіяльність ґрунтових організмів та стимулюють міграцію елементів (Ca, Mg, Fe, Cu, Zn, P, B) до підземних водоносних горизонтів. Екологічні наслідки включають забруднення атмосферного повітря, емісію парникових газів, контамінацію ґрунтових вод, деградацію ґрунтів, руйнування екосистем та підвищений ризик вибухів [2].

Оцінка впливу на здоров'я населення продемонструвала тривожні результати. Індекс забруднення ґрунтових вод показав, що половина досліджених зразків з нафтовидобувних територій є непридатною для питного водопостачання. Аналіз ризиків для здоров'я виявив істотний неканцерогенний та канцерогенний вплив як на дорослих, так і на дітей [5]. Встановлений зв'язок між експозицією важких металів і зростаючою частотою неінфекційних захворювань свідчить про високу ймовірність збільшення онкологічного тягаря через забруднення важкими металами та вуглеводнями з бурових відходів. Навіть незначні концентрації вуглеводнів у відходах бурових розчинів залишаються небезпечними для екосистеми, оскільки провокують розвиток різноманітних

хронічних неінфекційних захворювань. Токсичність бурового розчину переважно детермінується його базовою рідиною [6]. Присутність важких металів у концентраціях, що перевищують гранично допустимі значення, вимагає спеціальної обробки для нейтралізації токсичного впливу і запобігання несприятливим наслідкам для живих організмів, рослин та тварин [9]. Для вирішення проблеми екологічного впливу відходів буріння регуляторні органи впровадили суворі нормативи щодо поводження з відходами та їх утилізації. Найпоширенішими методами утилізації бурових відходів є захоронення на спеціальних полігонах, закачування в інжекційні свердловини та термічна обробка [7]. Проте у більшості випадків рідина з забруднювачами все ж потрапляє в навколишнє середовище після завершення бурових робіт, незважаючи на можливість переробки бурового розчину [3].

Визначення цілей статті (постановка завдання). Мета дослідження – фізико-хімічна характеристика бурових шламів та оцінка їх впливу на геологічне

середовище в зоні впливу нафтових свердловин.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання:

1. Визначити елементний та оксидний склад бурових шламів.
2. Визначити основні джерела надходження важких металів та токсичних елементів у буровий шлам.
3. Оцінити потенційний вплив бурових шламів на компоненти геологічного середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для досягнення поставленої мети було відібрано три зразки бурових шламів з різних глибинних інтервалів експлуатованої нафтової свердловини. Визначення елементного та оксидного складу проводилося методом енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного аналізу (XRF), що дозволило отримати комплексну характеристику хімічного складу відходів буріння. На рисунку 1 представлено елементний склад досліджуваного типу бурового шламу.

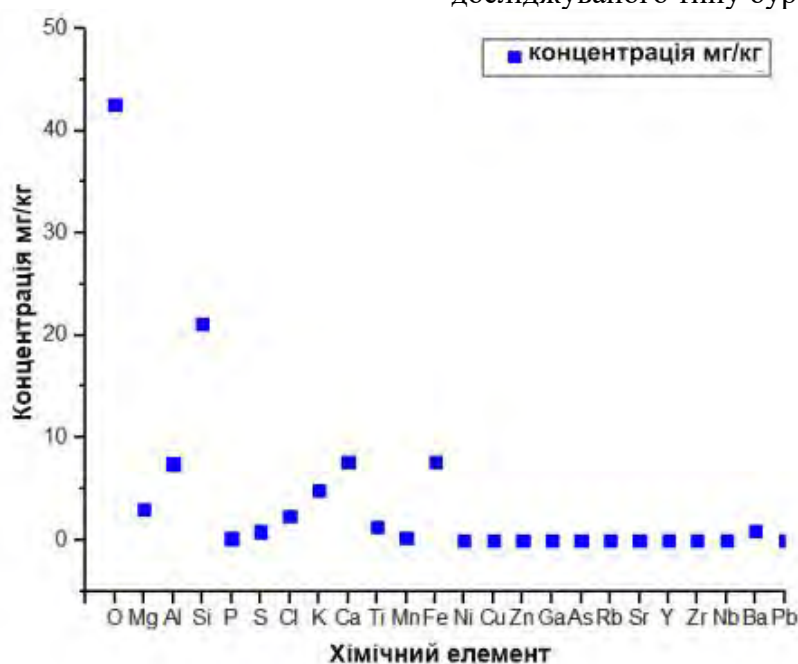


Рисунок 1. – Елементний склад бурового шламу.

*Джерело: розроблено авторами

Рисунок 1 ілюструє типовий спектр рентгенофлуоресцентного аналізу бурового шламу. На спектрі чітко ідентифікуються піки основних елементів: кремнію, алюмінію, заліза, кальцію, калію та магнію, які формують породоутворюючі оксиди. Також виявлено характеристичні лінії важких металів та мікроелементів (Pb, Zn, Ni, Cu, Sr, Ba, As), присутність яких зумовлена як літологічними

особливостями геологічного розрізу, так і компонентами бурових розчинів. Інтенсивність піків відображає відносний вміст елементів у зразку та дозволяє оцінити рівень потенційного забруднення геологічного середовища. Кількісна інтерпретація спектральних даних дозволила визначити масові частки оксидів та концентрації мікроелементів у досліджуваних зразках (таблиця 1).

Таблиця 1

Оксидний склад бурових шламів

Формула	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
Al ₂ O ₃	6,852	13,097	14,053
MgO	4,577	2,78	5,02
SiO ₂	36,815	50,752	45,14
Продовження таблиці 1			
PbO	139 ppm	135 ppm	52 ppm
Nb ₂ O ₅	35 ppm	24 ppm	41 ppm
P ₂ O ₅	0,35	0,38	0,361
SO ₃	2,215	2,145	2,061
Cl	4,483	2,608	2,313
K ₂ O	3,922	5,035	5,814
CaO	31,039	11,882	10,711
Fe ₂ O ₃	5,828	7,577	10,875
Ni ₂ O ₃	79 ppm	117 ppm	126 ppm
MnO ₂	0,297	0,201	0,419
CuO	45 ppm	63 ppm	56 ppm
ZnO	109 ppm	182 ppm	159 ppm
TiO ₂	2,086	2,061	2,139
Ga ₂ O ₃	24 ppm	46 ppm	—
As ₂ O ₃	21 ppm	16 ppm	21 ppm
Rb ₂ O	114 ppm	126 ppm	147 ppm
SrO	0,080	0,0544	459 ppm
Y ₂ O ₃	35 ppm	34 ppm	49 ppm
ZrO ₂	270 ppm	266 ppm	270 ppm
BaO	1,729	1,326	0,952

*Джерело: розроблено авторами

Діоксид кремнію є домінуючим компонентом у зразках 2 та 3, що характерно для бурових шламів, оскільки він походить як з глинистих компонентів бурового розчину (бентоніт), так і з піщано-кварцових порід геологічного розрізу. Зразок 1

відрізняється найнижчим вмістом SiO₂, але найвищою концентрацією оксиду кальцію, що вказує на проходження цього інтервалу через карбонатні породи або інтенсивне використання вапнякових реагентів для регулювання властивостей бурового розчину. Оксид

заліза присутній у всіх зразках у помітних концентраціях, при цьому найвищий вміст характерний для зразка 3, що може бути зумовлено як природним мінералогічним складом формацій, так і надходженням заліза з обважнювачів бурового розчину та корозії металевого обладнання. Оксиди калію та магнію виявлено у помірних концентраціях, що типово для бурових шламів з використанням калієвих стабілізаторів та магнієвих добавок. Підвищений вміст хлору у зразку 1 порівняно зі зразками 2 та 3 може свідчити про контакт бурового розчину з високо мінералізованими пластовими водами на відповідному глибинному інтервалі.

Особливу екологічну небезпеку становлять виявлені концентрації важких металів та токсичних елементів. Оксид свинцю демонструє значну варіабельність: зразок 1 характеризується критично високим вмістом, що майже у три рази перевищує показник зразка 3 та близький до значень зразка 2. Цинк виявлено у помітних концентраціях, при цьому найвищі значення характерні для зразка 2. Нікель присутній у всіх зразках, причому спостерігається тенденція до зростання від зразка 1 до зразка 3. Стронцій

демонструє найбільшу варіабельність серед досліджених елементів: зразок 3 містить аномально високу концентрацію, тоді як зразки 1 та 2 характеризуються значно нижчими значеннями. Така висока концентрація стронцію у зразку 3 може вказувати на контакт з високо мінералізованими пластовими водами нафтогазових родовищ. Барій виявлено у значних кількостях, при цьому найвищий вміст характерний для зразка 1, що може свідчити про використання бариту як обважнювача бурового розчину. Миш'як присутній у всіх зразках, що становить серйозну екологічну загрозу навіть при відносно низьких концентраціях. Для оцінки екологічних ризиків, пов'язаних з буровими шламами, проведено аналіз їх впливу на чотири ключові компоненти геологічного середовища: підземні води, ґрунтовий покрив, водоносні горизонти та геологічні формації (рис. 2). Графік представляє аналіз ступеня впливу на чотири компоненти навколишнього середовища: підземні води, ґрунтовий покрив, водоносні горизонти та геологічні формації. Для кожної категорії оцінюються три показники — рівень забруднення, міграційна здатність та тривалість впливу.

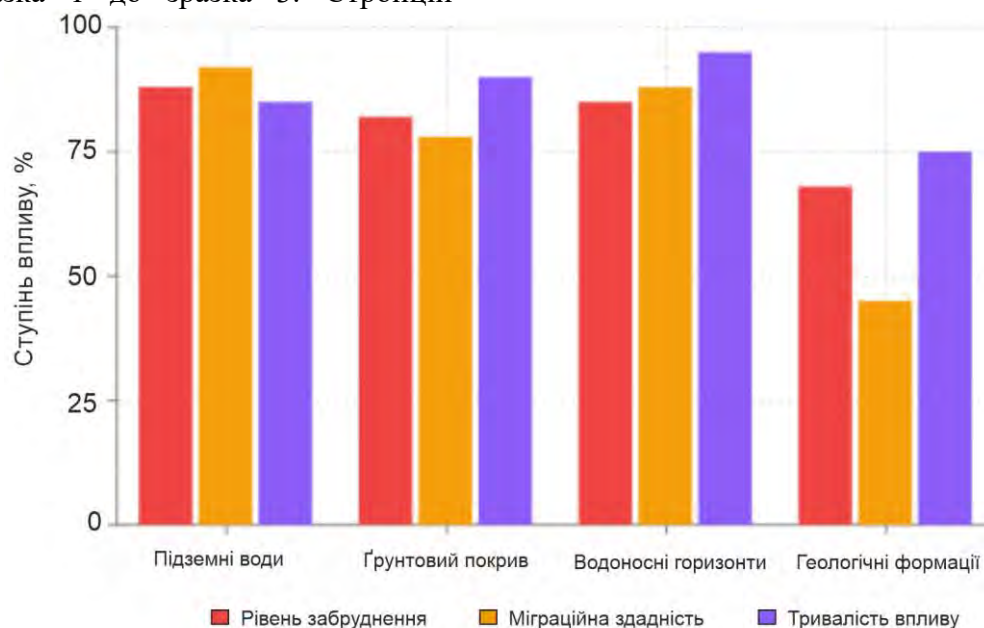


Рисунок 2 – Оцінка впливу на компоненти геологічного середовища

*Джерело: розроблено авторами

Результати показують, що підземні води та ґрунтовий покрив піддаються інтенсивному впливу з показниками 78-92%. Особливо вразливими є водоносні горизонти, де здатність впливу бурових шламів досягає 94%, що свідчить про високий ризик забруднення водних ресурсів. Геологічні формації демонструють найбільшу стійкість до впливу бурових шламів, де міграційна здатність забруднювачів обмежена. Це пояснюється низькою проникністю глибоких гірських порід, які утруднюють поширення забруднювачів.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Проведене дослідження фізико-хімічних характеристик бурових шламів з різних глибинних інтервалів нафтової свердловини дозволило встановити значну варіабельність їх елементного та оксидного складу. Методом рентгенофлуоресцентного аналізу визначено, що домінуючими компонентами є діоксид кремнію, оксиди кальцію, алюмінію та заліза, вміст яких залежить від літологічних особливостей геологічного розрізу та властивостей використовуваних бурових розчинів. Встановлено, що основними джерелами надходження важких металів та токсичних елементів у буровий шлам є природна мінералізація геологічних формацій, хімічні добавки до бурових розчинів, пластові води нафтогазових родовищ та корозія металевого обладнання. Виявлені концентрації важких металів становлять потенційну екологічну загрозу для навколишнього середовища. Особливу увагу заслуговують свинець, миш'як та нікель, які є високотоксичними та канцерогенними навіть при відносно низьких концентраціях. Аномально високі концентрації стронцію та барію у окремих зразках свідчать про контакт бурового розчину з високо мінералізованими пластовими водами та інтенсивне використання обважнювачів. Оцінка впливу бурових шламів на компоненти

геологічного середовища показала, що найбільш вразливими є водоносні горизонти та підземні води, тоді як геологічні формації демонструють найвищу стійкість до забруднення. Перспективи подальших досліджень включають оцінку довгострокового впливу на біогеохімічні цикли та моніторингу міграції забруднювачів у системі "буровий шлам – ґрунт – підземні води", оцінка канцерогенних ризиків для населення прилеглих територій.

Список літератури

1. Schout, G., Griffioen, J., Hassanizadeh, SM, de Lichtbuer, GC, Hartog, N. 2019. Occurrence and fate of methane leakage from cut and buried abandoned gas wells in the Netherlands. *Science of the Total Environment* 659: 773–782. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.339>.
2. Environmental Defense Fund. 2019. Model regulatory framework for hydraulically fractured hydrocarbon production wells. Environmental Defense Fund. Available at https://www.edf.org/sites/default/files/content/Model_Regulatory_Framework_For_Hydraulically_Fractured_Hydrocarbon_Production_Wells_2014.pdf
3. Bakhtiari, H., Amanipoor, H. & Battaleb-Looie, S. Analysis of heavy metal accumulation and environmental indicators in fluids and drilling cuttings. *J Petrol Explor Prod Technol* 14, 41–58 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13202-023-01690-7>
4. Pereira, L. B., Sad, C. M., Castro, E. V., Filgueiras, P. R., & Lacerda Jr, V. (2022). Environmental impacts related to drilling fluid waste and treatment methods: A critical review. *Fuel*, 310, 122301. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122301>
5. Dasari, B.M., Aradhi, K.K., Banothu, D. et al. Assessment of groundwater quality, source identification, and health risk around oil and gas drilling sites. *Environ Earth Sci* 83, 312 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11576-4>

6. Antia, M., Ezejiofor, A. N., Obasi, C. N., & Orisakwe, O. E. (2022). Environmental and public health effects of spent drilling fluid: an updated systematic review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 7, 100120. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100120>
 7. Nirali J. Gajjar, Apoorva B. Vaghela, Manish V. Shah, Rakeshkumar R. Panchal. A systematic review on composition, effect and remediation methods of petroleum hydrocarbon contaminated waste drilling mud. *Adv. Biores. Special Issue 1: 2023*: 56-65
 8. Yang, J., Sun, J., Wang, R. et al. Treatment of drilling fluid waste during oil and gas drilling: a review. *Environ Sci Pollut Res* 30, 19662–19682 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25114-x>
 9. Tirimisiyu, A. A., & Omon, U. K. (2024, April). Drilling to the Pay Zone with Water-Based Mud: Focus on Drill Cuttings Treatment. In 2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG) (pp. 1-8). IEEE. DOI: 10.1109/SEB4SDG60871.2024.10630307
 10. Halim, M. C., Hamidi, H., & Akisanya, A. R. (2022). Minimizing Formation Damage in Drilling Operations: A Critical Point for Optimizing Productivity in Sandstone Reservoirs Intercalated with Clay. *Energies*, 15(1), 162. <https://doi.org/10.3390/en15010162>
 11. Sun, P., He, Y., Zhou, S., Erneste, H., Gao, Q., Zou, Z., & Zhu, J. (2024). Experimental study on environmental chemical effect and purification treatment of waste slurry in horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 145, 105548. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105548>
 12. Elrayah, A.A.I. Enhancing drilling operations: prioritizing wellbore integrity, formation preservation, and effective mud waste control (case study). *J. Eng. Appl. Sci.* 71, 86 (2024). <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00383-0>
-
-

УДК 349.6:551.583

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-07>

АНАЛІЗ ЗАКОНОДАВЧО-НОРМАТИВНОЇ БАЗИ У СФЕРІ КЛІМАТУ. АДАПТАЦІЯ ЗАКОНОДАВСТВА ДО ЗМІН КЛІМАТУ (ЄВРОПА ТА УКРАЇНА)

Ромасевич Д, Ромасевич І

Державна екологічна академія післядипломної освіти та менеджменту,
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ

У статті аналізується законодавчо-нормативна база у сфері клімату в Європейському Союзі та Україні. Встановлено, що міжнародні підходи до боротьби зі зміною клімату формувалися на основі Рамкової конвенції ООН про зміну клімату, Кіотського протоколу та Паризької угоди, які заклали основи сучасної кліматичної політики.

Наголошено, що Європейський Союз створив цілісну систему правового регулювання: Європейський зелений курс, Кліматичний закон ЄС, стратегію адаптації до змін клімату та пакет «Fit for 55». Вони встановлюють обов'язкові цілі скорочення викидів і досягнення кліматичної нейтральності.

Зазначено, що Україна поступово адаптує своє законодавство, ратифікувавши Паризьку угоду у 2016 році та ухваливши низку стратегічних документів: Стратегію екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року, Концепцію реалізації державної політики у сфері зміни клімату, Національно визначений внесок (НВВ) зі скорочення викидів. Проте імплементація часто має декларативний характер, фінансове забезпечення обмежене, а міжсекторальна координація залишається низькою.

У статті наведено порівняльні таблиці, які демонструють ключові відмінності між кліматичною політикою ЄС та України: у ЄС кліматичне законодавство є обов'язковим, фінансово підкріпленим і інтегрованим у всі сфери управління, тоді як в Україні воно здебільшого носить стратегічний, але не зобов'язувальний характер.

Зроблено висновок, що для успішної адаптації українського законодавства необхідно ухвалити спеціальний кліматичний закон, запровадити систему торгівлі квотами (ETS), розширити адаптаційні заходи на всі рівні управління, створити національний кліматичний фонд і забезпечити ширше залучення громадськості.

Ключові слова: кліматична політика, адаптація, Паризька угода, Європейський зелений курс, Україна, законодавство, кліматична нейтральність, викиди парникових газів.

Постановка проблеми. Сучасні кліматичні зміни є глобальним викликом, що потребує ефективних механізмів реагування з боку держав, міжнародних інституцій та громадянського суспільства.

У цьому контексті надзвичайно важливим стає формування законодавчо-нормативної бази, здатної забезпечити адаптацію економічних і соціальних систем до кліматичних ризиків. Для України актуальним завданням є гармонізація власного законодавства з європейськими стандартами, зокрема у сфері досягнення кліматичної нейтральності та зниження викидів парникових газів.

Аналіз останніх досліджень. Питанню формування законодавчо-нормативної бази у сфері клімату та адаптації такої в Україні до законодавства Європи були присвячені праці В. Богуна, О.Закаль, В. Костицького, О. Балацької, А. Суходольської, В. Полич, А. Самури, Н. Шпег та ін.

Мета статті є дослідження сучасної законодавчо-нормативної бази у сфері клімату в Європі та Україні, виявлення ключових відмінностей і проблемних аспектів адаптації українського законодавства до європейських вимог, а також визначення основних напрямів його вдосконалення.

Виклад основного матеріалу. Законодавчо-нормативна база у сфері клімату являє собою систему правових актів, що регулюють механізми боротьби зі зміною клімату, управління ризиками та впровадження адаптаційних стратегій. Простіше кажучи, це "каркас" з правил, який визначає, що дозволено, що заборонено і як саме потрібно діяти у тій чи іншій ситуації.

У сфері адаптації законодавства до змін клімату в Європі та Україні, законодавчо-нормативна база — це система правових актів, які встановлюють правила, механізми та обов'язки для різних учасників (держави, бізнесу, громадян) з метою пом'якшення наслідків кліматичних змін та пристосування до них. На міжнародному рівні сформовано

низку правових документів, спрямованих на боротьбу зі зміною клімату та мінімізацію її негативного впливу. У 2015 році для консолідації зусиль держав світу в подоланні кліматичних викликів було укладено Паризьку угоду, яка стала логічним продовженням положень Кіотського протоколу в рамках Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (РКЗК ООН). Від 1 січня 2021 року країни-учасниці самостійно визначають свої національні цілі щодо скорочення або обмеження викидів парникових газів. До цього обсяги зобов'язань встановлювалися у межах Кіотського протоколу.

Для ЄС фундаментом є Європейський зелений курс, Кліматичний закон ЄС, стратегія адаптації до змін клімату та пакет «Fit for 55» [21; 22]. Ці документи встановлюють обов'язкові для всіх країн-членів цілі — скорочення викидів на 55% до 2030 року та досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року.

Україна ратифікувала Паризьку угоду у 2016 році, підтвердивши намір стати активною частиною Європейського зеленого курсу та реагувати на нові виклики, пов'язані зі зміною клімату. Відповідно до умов Угоди, кожна країна-учасниця подає національно визначений внесок (НВВ) зі зниження викидів парникових газів та переглядає його кожні п'ять років. В оновленому НВВ України, затвердженому розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 липня 2021 року № 868-р, передбачено скорочення викидів парникових газів на 65 % до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року.

Головним завданням адаптаційної кліматичної політики в Україні є зменшення вразливості систем до наслідків зміни клімату, а також зниження рівня парникових викидів, що спричиняють ці зміни. Формування таких

політик ґрунтується на аналізі кліматичних ризиків, оцінці вразливості та національних адаптаційних стратегіях. Через значну різноманітність кліматичних впливів і відмінності в географічних, соціально-економічних умовах, адаптаційні заходи, як правило, адаптовані до конкретних потреб окремих країн і секторів економіки.

Що включає законодавчо-нормативна база станом на зараз в Європі та Україні?

1. Міжнародні зобов'язання, ратифіковані на національному рівні:
 - Паризька угода (2015),
 - Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (UNFCCC),
 - Цілі сталого розвитку (SDGs), зокрема Ціль 13 – "Боротьба зі зміною клімату".
2. Європейське законодавство:
 - Європейський зелений курс (*European Green Deal*),
 - Регламент щодо кліматичної нейтральності (Кліматичний закон ЄС),
 - Плани адаптації до кліматичних змін (EU Adaptation Strategy),
 - Пакет «Fit for 55» (скорочення викидів на 55% до 2030 року).
3. Національне законодавство України, що адаптується до європейських норм:
 - Закон України «Про основні засади державної екологічної політики» (2019 р.),

- Стратегії з адаптації до зміни клімату (наприклад, Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року),

- Національно визначений внесок (НВВ) до Паризької угоди - скорочення викидів на 65% до 2030 р.,

- Кліматичні та енергетичні плани,

- Секторальні документи: у сфері сільського господарства, енергетики, містобудування, водного управління тощо.

Основне призначення цієї бази:

- Інституціоналізувати боротьбу зі зміною клімату;
- Забезпечити узгодженість дій усіх секторів: державного, приватного, громадського;
- Визначити фінансові та адміністративні механізми, наприклад, зелений бюджет, кліматичні фонди, звітність про викиди;
- Інтегрувати кліматичну політику в усі сфери державного управління.

Одним із перших стратегічних документів у межах виконання Паризької угоди стала «Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року», затверджена 18 липня 2018 року. Документ визначає довгостроковий курс на трансформацію економіки України в напрямі зниження вуглецевого навантаження, з урахуванням принципів сталого розвитку та національних інтересів.

Табл. 1. Відмінності між Європейським Союзом (далі - ЄС) та Україною:

Критерій	Європейський Союз	Україна
Рівень інтеграції	Високий, спільні політики для всіх країн-членів	Часткова адаптація до законодавства ЄС
Наявність кліматичного закону	ЄС має єдиний Кліматичний закон	Україна лише планує прийняття окремого кліматичного закону

Критерій	Європейський Союз	Україна
Фінансування	Потужні фінансові механізми (Європейський кліматичний фонд, NextGenerationEU)	Обмежені ресурси, орієнтація на міжнародну підтримку
Застосування стандартів	Обов'язкове та уніфіковане для всіх держав	Впроваджується поетапно, часто декларативно

Ключові виклики:

- Недостатнє фінансування кліматичної адаптації в Україні;
- Відсутність узгодженого кліматичного законодавства в одній правовій рамці;
- Низький рівень міжсекторальної координації;
- Потреба в актуалізації даних і науковому супроводі політик;
- Складність інтеграції європейських норм в українське правове поле.

В Україні поступово формується комплексна система правового регулювання у сфері зміни клімату, що включає нормативно-програмні документи, спрямовані як на запобігання кліматичним змінам, так і на посилення здатності суспільства адаптуватися до їхніх наслідків. В основу цих документів покладено принципи сталого розвитку, екологічної рівноваги, інтеграції екологічних аспектів у всі сектори державної політики та наближення національного законодавства до правових норм Європейського Союзу.

Ключові положення закріплюють необхідність переходу до низьковуглецевої моделі розвитку, використання сучасних технологій, підвищення екологічної ефективності виробництва, раціонального природокористування, збереження та відновлення екосистем, а також досягнення кліматичної нейтральності в довгостроковій перспективі.

Окрема увага приділяється запровадженню адаптаційних підходів на

всіх рівнях управління — від національного до місцевого. Це включає розробку ефективних заходів реагування на кліматичні ризики, впровадження системи оцінки вразливості до змін клімату, посилення ролі місцевих громад у плануванні та реалізації політики адаптації.

Інструментарій реалізації державної кліматичної політики охоплює як ринкові, так і неринкові механізми, зокрема розвиток внутрішньої системи торгівлі викидами парникових газів відповідно до європейських підходів, впровадження фінансових стимулів для зниження вуглецевого навантаження, а також механізмів екологічного оподаткування та субсидування кліматично орієнтованих проєктів.

Важливим елементом державної екологічної стратегії також є забезпечення науково-інформаційної та інноваційної підтримки управлінських рішень, зокрема через розвиток системи моніторингу кліматичних змін, доступ до екологічної інформації, просвітницькі ініціативи та підтримку досліджень у сфері клімату.

На законодавчому рівні закріплюється необхідність інтегрувати підходи до зміни клімату в широке коло державних програм, включаючи просторове планування, управління водними і земельними ресурсами, поводження з відходами, охорону біорізноманіття та розвиток інфраструктури. При цьому визнано, що політика адаптації має бути міжсекторальною та базуватися на оцінці

екологічних, соціальних і економічних ризиків.

В Україні ухвалено низку програмних правових актів, спрямованих

на запобігання зміні клімату та посилення адаптаційної здатності. Серед ключових документів:

Таб.2 Правові акти, спрямованих на запобігання зміні клімату та посилення адаптаційної здатності

Назва документа	Дата ухвалення / затвердження	Призначення / зміст (коротко)
Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища»	25.06.1991 року	Визначає принципи екологізації виробництва, відтворення природних ресурсів, стимулювання та відповідальність у природоохоронній сфері
Закон України «Про Основні засади державної екологічної політики України на період до 2030 року»	28.02.2019 року	Визначає стратегічні завдання в екополітиці, включно з адаптацією до змін клімату, сталим використанням довкілля, наближенням до <i>acquis</i> ЄС
Концепція реалізації державної політики у сфері зміни клімату на період до 2030 року (Розпорядження КМУ № 932-р)	7.12.2016 року	Напрями політики кліматичної зміни, включаючи механізми поглинання, торгівлю квотами, адаптацію, розвиток технологій
Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів»	12.12.2019 р.	Встановлює правові рамки системи MRV (моніторинг, звіти, верифікація) викидів ПГ
Закон України «Про регулювання господарської діяльності з озоноруйнівними речовинами та фторованими парниковими газами»	12.12.2019 р.	Врегулювання діяльності, що пов'язана з речовинами, що руйнують озоновий шар та фторованими ПГ
Розпорядження КМУ «Про схвалення Оновленого національно визначеного внеску України до Паризької угоди» № 868-р	30.07.2021 р.	Зобов'язання щодо скорочення викидів, норма перегляду внеску тощо
Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року	20.10.2021 р.	Визначає цілі адаптації, екологічної безпеки, напрями реагування на кліматичні ризики
План заходів на 2025–2027 роки для реалізації Стратегії екологічної безпеки та адаптації	ухвалений 2024 р.	Конкретні кроки по інтеграції вимог, зменшенню впливів кліматичних змін, імплементації стандартів ЄС

У контексті міжнародних зобов'язань, Україна послідовно адаптує свої внутрішні підходи до цілей,

закріплених Паризькою угодою та Європейським зеленим курсом, орієнтуючись на досягнення кліматичної

стійкості, екологічної безпеки та поступового зменшення викидів парникових газів. Зокрема пропонуємо узагальнену порівняльну таблицю

основних законодавчо-нормативної документів сфері клімату в Європі та Україні з рекомендаціями та налізом відмінностей

Таб.3. Порівняльна таблиця: Кліматичні політики (Україна - ЄС)

Політика / напрям		Стан в Україні	Стан у ЄС	Ключові відмінності та особливості застосування	Що потребує покращення або впровадження в Україні
Правова база		В Україні існують основні закони та стратегії: Закон «Про охорону навколишнього природного середовища», стратегія до 2030 р., Концепція кліматополітики, Стратегія адаптації, Стратегія екологічної безпеки, Закон про МЗВ, але їх імплементація слабша.	Всеохопне обов'язкове законодавство: Європейський кліматичний закон, Fit for 55, Європейська Зелена Угода.	В Україні більшість документів мають рекомендаційний характер, без обов'язкового механізму виконання. ЄС має глибше інтегровані механізми контролю та звітності, жорсткіші санкції за невиконання.	Надання юридичного статусу програмним документам, ухвалення Закону «Про зміну клімату» з конкретними обов'язками.
	МЗВ (моніторинг, звітність, верифікація)	Закон 2019 р. — створено систему МЗВ для великих підприємств	Обов'язкова звітність для усіх секторів економіки, жорсткий контроль Єврокомісії	Українська система діє лише частково, слабкий механізм контролю та санкцій	Розширити охоплення МЗВ на всі сектори; посилити верифікацію даних; запровадити цифрові інструменти збору даних
Торгівля квотами на викиди (ETS)		Впровадження лише заплановане; система готується на базі авіацію,	Європейська ETS діє з 2005 року, включає промисловість, авіацію,	ETS в Україні відсутня — тільки планується, в ЄС	Ухвалити закон про національну систему ETS; створити електронний

Політика / напрям	Стан в Україні	Стан у ЄС	Ключові відмінності та особливості застосування	Що потребує покращення або впровадження в Україні
Адаптація до змін клімату	Директиви 2003/87/ЄС	енергетику; встановлені жорсткі правила	діє понад 15 років ЄС ефективніше стимулює приватний сектор та інновації, має, суворіші вимоги до підприємств.	реєстр; інтегрувати з EU ETS у майбутньому
	Прийнято Стратегію до 2030 року; план дій затверджено у 2024 році	ЄС має комплексну стратегію 2021 р., інтегровану в усі політики (транспорт, енергетика, агро тощо)	В ЄС адаптація є кросс-секторальною; в Україні — обмежена за обсягом і реалізується повільно	Інтегрувати адаптацію в регіональні плани, секторні стратегії; фінансувати адаптаційні проєкти на місцевому рівні
	Ціль скорочення на 65% до 2030 /р. від рівня 1990 р.; кліматична нейтральність у другій половині XXI ст.	— ПГ ЄС має юридично закріплену мету досягти нейтральності до 2050 року	В Україні немає юридичної зобов'язувальної мети, лише декларації	Закріпити ціль кліматичної нейтральності в законі; розробити дорожню карту її досягнення
Низьковуглецевий розвиток кліматична нейтральність				
Інституційна координація	Координація через Міндовкілля, відсутній єдиний орган чи кліматичне агентство, відсутня системність та масштабність заходів.	Єврокомісія координує зусилля держав-членів; є спеціальні агенції. Широко впроваджуються інформаційні кампанії, навчальні програми, підвищення обізнаності населення.	В Україні — фрагментація відповідальності, низька спроможність на місцевому рівні. В ЄС краща комунікація зі суспільством, ширше залучення громадськості до екополітик.	Створити координаційний орган з питань клімату; розвивати екологічну освіту та участь громадян.

Таким чином, головна відмінність полягає в тому, що у ЄС кліматична політика юридично обов'язкова, інтегрована в усі сфери, фінансово підкріплена. В Україні — стратегічна, але не завжди обов'язкова, часто не забезпечена фінансуванням або виконавчими механізмами. Базуючи на досвіді країн-членів ЄС для адаптації законодавчо-нормативної бази у сфері клімату в Україні необхідно:

1. Ухвалити законодавство з юридично зобов'язувальними кліматичними цілями.
2. Впровадити повноцінну ETS-систему.
3. Розширити адаптаційні заходи на всі рівні — від національного до громад.
4. Інституційно зміцнити координацію та залучити громади.
5. Посилити доступ до фінансування і впровадити національні кліматичні інструменти.

Інституційні засади впровадження державної кліматичної політики України. У другому розділі Закону України «Про основні засади державної кліматичної політики України» встановлено інституційну базу для реалізації кліматичної політики на рівнях центральної та місцевої влади (стаття 5). Закон передбачає механізми координації та співпраці між різними державними органами, які відповідають за виконання кліматичних заходів. При цьому зазначено, що перелік органів і їхніх повноважень не є вичерпним, оскільки у сфері клімату можуть виникати нові виклики, що потребують залучення органів, які формально не мають прямих повноважень у цій галузі, але мають бути включені до процесу з урахуванням своєї компетенції.

Реалізація державної кліматичної політики покладається на такі органи:

1. **Верховна Рада України:**
 - Визначає нормативні основи кліматичної політики;

- Забезпечує парламентський контроль за формуванням та виконанням кліматичної політики;

- Розглядає щорічні звіти Кабінету Міністрів щодо реалізації кліматичних заходів.

2. **Кабінет Міністрів України:**

- Координує та пріоритезує кроссекторальну кліматичну політику, спрямовує роботу виконавчих органів;

- Організовує розробку та впровадження інфраструктури і ресурсного забезпечення для реалізації кліматичних заходів;

- Видає нормативно-правові акти, зокрема затверджує Національний план з енергетики та клімату, Національно визначений внесок України за Паризькою угодою, Довгострокову стратегію низьковуглецевого розвитку, Стратегію адаптації до зміни клімату та інші програмні документи;

- Оцінює відповідність нормативних актів цілям державної кліматичної політики;

- Щорічно інформує Верховну Раду про хід та результати реалізації кліматичних політик.

3. **Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України (Мінприроди):**

- Формує та реалізує державну кліматичну політику;

- Координує діяльність інших центральних органів влади у сфері пом'якшення змін клімату та адаптації;

- Забезпечує нормативно-правове регулювання кліматичної політики;

- Організовує інформаційне забезпечення з питань зміни клімату;

- Бере участь у розробці Національного плану з енергетики та клімату;

- Вносить пропозиції щодо пріоритетів і бюджетного фінансування кліматичних заходів.

4. **Міністерство економіки:**

- Розробляє Національний план з енергетики та клімату;

- Готує секторальні плани зі скорочення викидів парникових газів і заходи з адаптації до кліматичних змін.

5. Міністерство енергетики:

- Залучається до розробки Національного плану з енергетики та клімату;

- Формує секторальні плани щодо зменшення викидів і адаптації у відповідних галузях.

6. Органи, що відповідають за гідрометеорологічну діяльність:

- Забезпечують кліматичне інформаційне обслуговування і прогнози зміни клімату;

- Публікують дані про зміни клімату;

- Ініціюють науково-технічні програми у цій сфері.

7. Інші центральні органи виконавчої влади:

- Розробляють пропозиції для реалізації кліматичної політики в межах своїх повноважень;

- Учасники підготовки національних планів та оцінки їх виконання;

- Готують секторальні плани зі скорочення викидів та адаптації.

8. Рада міністрів Автономної Республіки Крим і місцеві адміністрації:

- Розробляють та забезпечують виконання регіональних кліматичних планів та стратегій адаптації;

- Звітують про виконання цих планів;

- Інтегрують кліматичні заходи до місцевих стратегій розвитку і програм охорони довкілля.

9. Верховна Рада Автономної Республіки Крим та органи місцевого самоврядування:

- Розробляють та реалізують місцеві плани зменшення викидів та адаптації;

- Затверджують регіональні та місцеві стратегії;

- Фінансують природоохоронні заходи в межах місцевих бюджетів;

- Контролюють реалізацію кліматичних заходів та їх моніторинг.

Крім того, закон передбачає можливість створення консультативних, дорадчих та інших допоміжних органів з питань клімату, зокрема Науково-експертної ради з питань зміни клімату та збереження озонового шару, яка виконує функції незалежного науково-експертного дорадчого органу.

Висновки. Законодавчо-нормативна база у сфері адаптації до змін клімату в Україні та Європейському Союзі є ключовим інструментом регулювання кліматичної політики, що забезпечує правові рамки, механізми та зобов'язання для держав, бізнесу і суспільства. Вона включає міжнародні угоди (зокрема Паризьку угоду), європейські законодавчі акти (Європейський зелений курс, Кліматичний закон ЄС, пакети заходів) та національні документи України (закони, стратегії, плани).

Незважаючи на наявність базових законів і стратегій в Україні, їх імплементація часто є недостатньою, що обумовлено браком юридично зобов'язуючих механізмів, обмеженням фінансуванням, фрагментованою інституційною координацією та низькою інтеграцією кліматичних норм у різні сектори управління. На відміну від України, кліматична політика ЄС має більш високий рівень інтеграції, є обов'язковою для всіх країн-членів, підтримується потужними фінансовими інструментами і системою контролю, що сприяє більш ефективному впровадженню заходів.

Ключові виклики для України полягають у необхідності ухвалення спеціального кліматичного закону з конкретними зобов'язаннями, запровадження системи торгівлі квотами на викиди (ETS), розширення адаптаційних заходів на всіх рівнях, посилення міжсекторальної координації та залучення громадськості, а також активізації

фінансування через створення національних кліматичних фондів і мобілізацію приватних інвестицій.

Для успішної адаптації законодавчо-нормативної бази України до європейських стандартів необхідно забезпечити комплексний підхід, що базується на науково обґрунтованих даних, інтеграції кліматичної політики у всі сфери управління, посиленні контролю за виконанням і прозорості, а також активній участі суспільства у процесах формування та реалізації кліматичних заходів.

Таким чином, подальший розвиток правового регулювання кліматичної політики України має орієнтуватися на практичну реалізацію міжнародних зобов'язань, створення ефективної інституційної системи, фінансову підтримку та інтеграцію кліматичних інструментів на національному та місцевому рівнях, що сприятиме сталому розвитку та підвищенню кліматичної стійкості країни.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кабінет Міністрів України – Новини про ухвалення Стратегії адаптації. URL: <https://www.kmu.gov.ua/en/news/uhvaleno-strategiyu-ekologichnoyi-bezpeki-ta-adaptaciyi-do-zmini-klimatu-do-2030-roku>
2. Кабінет Міністрів України – План виконання Стратегії (2025–2027). URL: <https://mepr.gov.ua/en/uryad-shvalyv-plan-vykonannya-strategiyi-ekologichnoyi-bezpeky-ta-adaptatsiyi-do-zminy-klimatu-do-2030-roku>
3. Законопроект №11310 – Про засади державної кліматичної політики. URL: <https://www.kmu.gov.ua/en/news/v-ukraini-skhvalenyi-ramkovyi-klimatychnyi-zakon-mindovkillia> Пояснення суті рамкового кліматичного закону.
4. UNDP Ukraine – підтримка кліматичних ініціатив. URL: <https://www.undp.org/ukraine/press-releases/government-adopts-new-strategy-make-ukraine-more-resilient-climate-crisis>.
5. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України — секція «Інтегрована кліматична політика» URL: mepr.gov.ua.
6. Дослідницька служба Верховної Ради — інформаційні довідки щодо кліматичної політики, аналізи ЄС норм і законодавчого регулювання клімату. URL: research.rada.gov.ua.
7. Портал «Кліматична політика в Україні» (Ukrainian Climate Office) — огляди, історія, аналітика кліматичної політики України. URL: [Ukrainian Climate Office](https://ukrainianclimateoffice.org).
8. Аналітичні статті в академічних виданнях про становлення кліматичного законодавства України — наприклад, «Державна кліматична політика України: правова еволюція». URL: [Directory of Open Access Journals](https://openaccessjournals.org).
9. Офіційний портал Кабінету Міністрів України — «Екологічна політика». URL: kmu.gov.ua.
10. Богун В. (2025). Державна кліматична політика України: правова еволюція. *Economics and Law*, 77(2), 101–112. URL: [ДЕРЖАВНА КЛІМАТИЧНА ПОЛІТИКА УКРАЇНИ: ПРАВОВА ЕВОЛЮЦІЯ | Economics and Law](https://www.economicsandlaw.org/journal/view.php?doi=10.1515/el-2025-0010).
11. Закаль О.О. Захист кліматичних прав людини: питання теорії та практики: дис. ... д-ра філософії у галузі права: 081. Право. Національний університет біоресурсів та природокористування. Київ, 2023. 273 с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u145/di_s_zakal.pdf.
12. Інтегрована кліматична політика. URL: [Інтегрована кліматична політика – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України](https://mze.gov.ua/ua/press-releases/2024/04/04-integrated-climate-policy)
13. Каракаш І. Законодавчі засади нової Стратегії державної екологічної політики України. Наукові праці Національного університету «Одеська юридична академія». 2011. Т. 10. С. 335–344.
14. Костицький В.В., Балацька О.Р., Суходольська А.А. Європейські орієнтири правового забезпечення формування екологічної політики в Україні. Науково-практичний журнал «Екологічне право». 2024. Вип. 1–2. С. 16–20.

15. Курило В.І., Мачуський В.В. Історико-правові аспекти становлення кліматичного законодавства в Україні. Юридичний науковий електронний журнал. 2021. № 5. С. 160-163. URL: [39.pdf](#).
16. [ОГЛЯД КЛІМАТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ:НОРМАТИВНО-ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ – Експертно-дорадчий центр.](#)
17. Полич В.П. Правові засади боротьби зі зміною клімату в праві Європейського Союзу. : Доктор філософії : спец.. 293 - Міжнародне право : дата захисту 2023-02-27; Статус: Наказ про видачу диплома; Національний юридичний університет імені Ярослава Мудрого. – Харків, 2022, 265 с. URL: [Пошук академічних текстів - Національний репозитарій академічних текстів.](#)
18. Самура А., Шпех Н. Аналіз українського законодавства у сфері зміни клімату. URL: [Аналіз українського законодавства у сфері зміни клімату – Екологія Право Людина.](#)
19. [Стратегії і програми запобігання змінам клімату та їхнє впровадження в українському агросекторі | Національний інститут стратегічних досліджень.](#) URL: [Just a moment...](#)
20. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року: Рішення Міжвідомчої комісії із забезпечення виконання Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (протокол від 16 лютого 2018 р. № 1). URL: [Layout 1.](#)
21. Україна та політика протидії зміні клімату: економічний аспект / Аналітична доповідь; за загальною редакцією В.Р. Сіденка та О.О. Веклих. Київ: Заповіт, 2016. 208 с.
22. Paris Agreement – UNFCCC. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.
23. European Commission – EU Adaptation Strategy. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en.
24. European Green Deal – European Commission. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
25. OECD – Climate Change and Ukraine. URL: <https://www.oecd.org/environment/cc/ukraine-climate-policy.htm>.
-
-

УДК 504.53:546.3:656.2

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-08>

ГЕОХІМІЧНА ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ В ЗОНІ ВПЛИВУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Коцюбинський А. О., Линник Д. О., Марич Т. М.,
Грицуляк Г. М. Довгалюк О. В. Медвідь М. М.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Забруднення ґрунтів важкими металами становить серйозну загрозу для здоров'я населення, оскільки ці елементи здатні мігрувати по ґрунтовому профілю, потрапляти до підземних вод та включатися в харчові ланцюги через рослинність. У статті представлено результати геохімічної оцінки забруднення ґрунтів важкими металами в зоні впливу залізничного транспорту. Актуальність дослідження зумовлена зростанням техногенного навантаження на придорожні території залізничної інфраструктури та ризиками накопичення токсичних елементів у ґрунтовому покриві. Метою роботи є визначення рівня та характеру просторового розподілу важких металів у ґрунтах, прилеглих до залізничної колії. Дослідження проведено шляхом градієнтного відбору ґрунтових проб на різних відстанях від колії з подальшим визначенням елементного складу методом рентгенофлуоресцентної

спектрометрії. У зразках встановлено присутність широкого спектра макро- та мікроелементів, зокрема техногенно зумовлене збагачення цинком, міддю, нікелем, хромом та залізом. Для більшості досліджених металів виявлено чітку тенденцію зниження концентрацій зі збільшенням відстані від джерела впливу, що підтверджує роль залізничного транспорту як локального чинника формування геохімічних аномалій. Отримані результати свідчать про необхідність систематичного екологічного моніторингу ґрунтів у придорожній смузі залізниць, особливо в межах сільськогосподарських та селітебних територій, з метою мінімізації екологічних ризиків та запобігання вторинному забрудненню компонентів довкілля.

Ключові слова: забруднення ґрунтів, важкі метали, залізничний транспорт, колія, ретгенофлуоресцентний аналіз.

GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF SOIL CONTAMINATION WITH HEAVY METALS IN THE AREA AFFECTED BY RAILWAY TRANSPORT

Kotsyubynsky A. O., Lynnyk D. O., Marych T. M., Hrytsulyak G. M., Dovgalyuk O. V., Medvid M. M.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Soil contamination with heavy metals poses a serious threat to public health, as these elements can migrate through the soil profile, enter groundwater,

and enter the food chain through vegetation. This article presents the results of a geochemical assessment of heavy metal contamination in soils in areas affected by

rail transport. The relevance of this study is due to the increasing anthropogenic load on roadside areas of railway infrastructure and the risks of toxic elements accumulating in the soil cover. The aim of the work is to determine the level and nature of the spatial distribution of heavy metals in soils adjacent to the railway track. The study was conducted by gradient sampling of soil samples at different distances from the track, followed by determination of the elemental composition by X-ray fluorescence spectrometry. The samples showed the presence of a wide range of macro- and microelements, in particular, technogenic enrichment with zinc, copper, nickel, chromium, and iron. For most of the metals studied, a clear trend of decreasing concentrations with increasing distance from the source of influence was found, confirming the role of rail transport as a local factor in the formation of geochemical anomalies. The results obtained indicate the need for systematic environmental monitoring of soils in the roadside strip of railways, especially within agricultural and residential areas, in order to minimize environmental risks and prevent secondary pollution of environmental components.

Keywords: soil pollution, heavy metals, rail transport, track, X-ray fluorescence analysis.

Постановка проблеми.

Транспортна інфраструктура є одним із найбільш значущих антропогенних чинників впливу на довкілля, особливо в урбанізованих регіонах. Залізничний транспорт, незважаючи на свою екологічну перевагу порівняно з автомобільним, створює локальні зони техногенного навантаження вздовж транспортних коридорів. Інтенсивна експлуатація залізниць супроводжується надходженням у навколишнє середовище широкого спектру забруднювальних речовин, серед яких особливу небезпеку становлять важкі метали через їх токсичність, здатність до акумуляції в ґрунтах та міграцію у інші компоненти навколишнього

середовища. Основними джерелами надходження важких металів у придорожню смугу залізниць є абразивне зношування рейок і колісних пар рухомого складу, корозія металевих конструкцій, викиди від дизельних локомотивів, витікання паливно-мастильних матеріалів, застосування гербіцидів для обробки колійного полотна та осідання аерозольних часток від транспортованих вантажів. Унаслідок цих процесів у ґрунтах прилеглих територій накопичуються такі елементи як залізо, мідь, цинк, свинець, хром, нікель та кадмій. Просторовий розподіл цих металів формується під впливом інтенсивності залізничного руху, метеорологічних умов, особливостей рельєфу та фізико-хімічних властивостей самих ґрунтів. Забруднення ґрунтів важкими металами становить серйозну екологічну загрозу, оскільки ці елементи здатні мігрувати по ґрунтовому профілю, потрапляти до підземних вод та включатися в харчові ланцюги через рослинність. Особливу занепокоєність викликає той факт, що залізничні колії часто проходять через сільськогосподарські угіддя та селітебні зони, де ризики для здоров'я населення є найбільш критичними. Тому геохімічна оцінка стану ґрунтів у зоні впливу залізничної інфраструктури є актуальним завданням екологічного моніторингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Функціонування залізничної інфраструктури супроводжується комплексним техногенним впливом на навколишнє середовище. Забруднення ґрунтового покриву відбувається внаслідок надходження важких металів та ароматичних вуглеводнів, які через інфільтраційні процеси та латеральну міграцію можуть досягати водоносних горизонтів і поверхневих водних об'єктів [1,3]. Паливно-мастильні матеріали, зокрема бензин, дизельне паливо та мастильні речовини, характеризуються

високою токсичністю та канцерогенним потенціалом для біоти [2]. Останніми роками спостерігається підвищення ризику забруднення важких металів, пов'язаної з експлуатацією залізничного транспорту. Основна частина викидів забруднювальних речовин від процесів горіння зумовлена використанням палива в двигунах внутрішнього згоряння тягового рухомого складу. До пріоритетних поллютантів, що надходять у навколишнє середовище, належать тверді частинки, леткі неметанові органічні сполуки, діоксид сірки та оксиди азоту. Проте значну небезпеку становлять також процеси абразивного зношування металевих елементів залізничної інфраструктури. Внаслідок тертя між рейками та колесами рухомого складу важкі метали у вигляді аерозолів потрапляють в атмосферу, ґрунт, поверхневі та підземні води, створюючи локальні зони підвищеного забруднення. Підвищені концентрації важких металів також фіксуються поблизу місць зберігання дерев'яних шпал, просочених креозотом. Свинець, кадмій та цинк визнано найбільш токсичними та поширеними елементами-забруднювачами залізничних територій [4].

Викиди твердих частинок, асоційовані зі зносом рейок, коліс транспортних засобів, гальмівних колодок та дисків, струмоприймачів пантографів та контактних ліній на електрифікованих лініях, а також вихлопні гази на неелектрифікованих ділянках, становлять основні джерела забруднення залізничних територій [7]. Корозійні процеси металевих конструкцій, включаючи мости та тунелі, також вносять вклад у забруднення важкими металами, зокрема свинцем, кадмієм та нікелем, які здатні акумулюватися в ґрунтах та водних об'єктах, створюючи ризики для здоров'я людини та функціонування екосистем [8].

Процес зношування рейок відбувається переважно вздовж вертикальної площини через передачу високих навантажень. На криволінійних ділянках колії виникає додаткове тертя між гребенем колеса та бічною поверхнею головки рейки, що спричиняє посилений латеральний знос, пропорційний до кривизни траси. Відповідно найінтенсивніше забруднення важкими металами внаслідок зношування рейок буде спостерігатися на найбільш викривлених ділянках колії. Для мінімізації зношування на криволінійних ділянках застосовуються спеціальні сплави рейкової сталі. Підвищений вміст хрому та міді в придорожніх ґрунтах може бути індикатором інтенсивного зносу залізничних рейок та транспортних коліс [7].

Результати досліджень свідчать про помірний або сильний рівень забруднення ґрунтів пріоритетними токсичними елементами в зоні впливу залізничного транспорту. Встановлено, що залізничний транспорт є основним джерелом міді, нікелю та цинку, концентрації яких значно зменшуються нелінійно з відстанню від колії. Згідно дослідження [5], емісія міді, нікелю та цинку істотно знижується на відстані від колії, що пояснюється їх походженням від абразивного стирання компонентів залізничної інфраструктури. Залізничний транспорт встановлено як джерело забруднення ґрунтів оловом та сурмою, збагачення якими відбувається внаслідок стирання гальмівних систем, рейок, коліс, втрат вантажів та вихлопних газів. Статистичний аналіз експериментальних даних показує [6], що розподіл сурми та олова у ґрунтах поблизу залізничних колій визначається функціональним призначенням території, відстанню від колії, топографічними особливостями, віком залізничної інфраструктури, а також властивостями ґрунтів, включаючи

гранулометричний склад, вміст гумусу та рН. Характерною особливістю забруднення є максимальні концентрації у ґрунтах поблизу великих вузлових залізничних станцій, зменшення концентрацій з відстанню від залізниці, зростання з тривалістю експлуатації інфраструктури, а також вплив топографічних умов на просторовий розподіл [6].

Забруднення ґрунтів важкими металами становить серйозну загрозу для рослинного покриву, здоров'я людини та глобальної продовольчої безпеки. Рухомі форми кадмію чинять негативний вплив на життєдіяльність ґрунтових мікроорганізмів та адсорбцію органічної речовини. Високі концентрації свинцю спричиняють зміни рН ґрунтового розчину та сорбційної здатності ґрунтів. Мідь проявляє токсичний ефект щодо специфічних мікробних угруповань, особливо бактерій порядку Rhizobiales. Цинк викликає пригнічення активності біологічно важливих мікроорганізмів та бактеріальної мікрофлори [11]. Важкі метали знижують активність ґрунтових ферментів пропорційно до ступеня забруднення, що впливає на процеси мінералізації органічної речовини та вивільнення біогенних елементів (вуглецю, азоту, фосфору, сірки), призводячи до трансформації структури мікробного ценозу ґрунту [12]. Поступова міграція забруднювачів углиб ґрунтового профілю призводить до контамінації підземних вод з наступним потраплянням до поверхневих водних об'єктів. Акумуляція важких металів в організмі відбувається протягом тривалого періоду, спричиняючи різноманітні патологічні зміни. У рослин це призводить до пошкодження кореневої системи та асиміляційного апарату, порушення клітинних структур та життєво важливих біохімічних процесів, зокрема фотосинтезу та мінерального живлення [10]. Для людини важкі метали становлять загрозу

ураження критичних органів – нирок та печінки, а також розвитку онкологічних захворювань. Ступінь шкідливості цих елементів визначається їх концентрацією, тривалістю експозиції та дозою. Миш'як, хром, кадмій та свинець належать до найнебезпечніших металів, здатних індукувати мутагенні, канцерогенні ефекти та пошкодження генетичного матеріалу [9].

Визначення цілей статті (постановка завдання). Мета роботи: геохімічна оцінка забруднення ґрунтів важкими металами в зоні впливу залізничного транспорту.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- 1) Провести відбір ґрунтових проб на різних відстанях від залізничної колії ;
- 2) Визначити елементний склад досліджуваних ґрунтових зразків;
- 3) Проаналізувати закономірності просторового розподілу важких металів;
- 4) Оцінити ступінь техногенної трансформації ґрунтового покриву придорожніх територій залізниці.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження просторового розподілу забруднювачів проводили шляхом відбору ґрунтових проб на трьох відстанях від залізничної колії: безпосередньо біля колії (зразок 1), на відстані 2 м (зразок 2) та 3 м (зразок 3). Відібрані проби висушували до повітряно-сухого стану, подрібнювали та гомогенізували для забезпечення репрезентативності аналізу. Геохімічну оцінку елементного складу ґрунтів здійснювали методом рентгенофлуоресцентної спектроскопії.

Рентгенофлуоресцентний аналіз трьох ґрунтових зразків, відібраних на різних відстанях від залізничної колії, виявив присутність численних хімічних елементів з широким діапазоном концентрацій від макро- до мікрорівня.

Таблиця 1

Елементний склад ґрунту

Елемент	Концентрація мг/кг		
	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
80	46.647	46.777	48.822
12Mg	3.452	1.616	1.901
13Al	3.129	2.908	4.152
14Si	30.799	31.964	35.470
15P	0.205	0.138	0.142
16S	0.354	0.233	0.110
19K	4.386	3.993	4.564
20Ca	1.503	1.594	1.365
22Ti	0.535	0.492	0.618
23V	–	ppm 127	–
24Cr	ppm 153	ppm 144	ppm 92
25Mn	0.149	0.165	0.087
26Fe	8.637	9.842	2.665
28Ni	ppm 84	ppm 67	ppm 33
29Cu	ppm 212	ppm 169	ppm 33
30Zn	ppm 760	ppm 610	ppm 149
31Ga	ppm 19	ppm 18	ppm 17
33As	ppm 30	ppm 19	–
37Rb	ppm 64	ppm 77	ppm 65
38Sr	ppm 143	ppm 158	ppm 108
39Y	ppm 39	ppm 21	ppm 24
40Zr	ppm 341	ppm 233	ppm 449
41Nb	–	–	ppm 38
42Mo	–	ppm 22	–
56Ba	–	ppm 610	–
82Pb	ppm 205	ppm 23	ppm 66

*Джерело: розроблено авторами

Серед макроелементів домінуючою складовою у всіх досліджуваних зразках виявився бром, що може свідчити про присутність органічних бромвмісних сполук. Кремній, як основний породоутворюючий елемент, становив значну частку від загальної маси проб. Концентрації калію, алюмінію, кальцію, магнію та титану були відносно стабільними у всіх зразках. Розподіл заліза свідчить про техногенне забруднення ґрунтів внаслідок абразивного зношування рейок та колісних пар рухомого складу.

Марганець, який часто корелює із залізом у техногенних ґрунтах, також демонстрував зростання концентрації у відповідних зразках. З мікроелементів високі концентрації виявлено для цирконію, стронцію та рубідію. Барій у значній кількості зафіксовано лише у другому зразку. Миш'як виявлено у другому та третьому зразках, тоді як у першому його вміст був нижче межі виявлення. Ванадій та молібден зареєстровано виключно у другому зразку, що може вказувати на локальну неоднорідність забруднення.

На рисунку 1 відображено порівняльний розподіл концентрації важких металів у ґрунтових зразках.

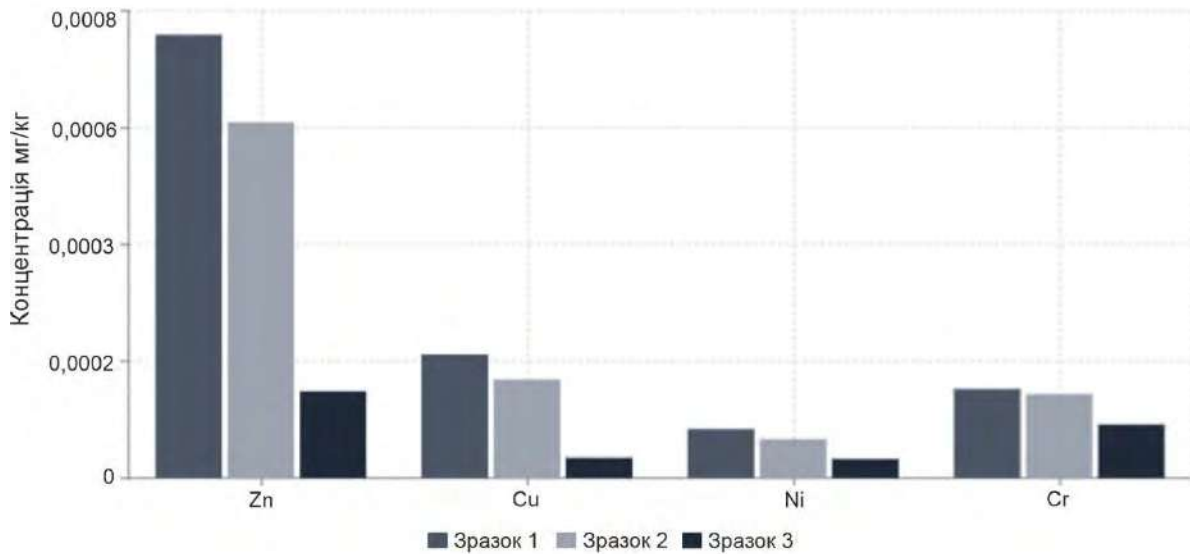


Рисунок 1. – Порівняльний розподіл концентрації важких металів у ґрунтових зразках
*Джерело: розроблено авторами

Цинк демонструє найвищі концентрації серед усіх досліджених металів, при цьому спостерігається чітка закономірність зниження його вмісту при збільшенні відстані від колії. Ґрунт, відібраний у безпосередній близькості від залізниці, характеризується максимальними концентраціями цинку, тоді як найвіддаленіший зразок виявляє мінімальні значення. Мідь посідає друге місце за концентраціями і демонструє аналогічну тенденцію просторового розподілу, з найвищими показниками в приколійній зоні та поступовим зниженням при віддаленні. Нікель та хром присутні у нижчих концентраціях порівняно з цинком та міддю, проте зберігають той самий характер розподілу залежно від відстані до колії. Для всіх чотирьох досліджених металів простежується послідовне зниження концентрацій при збільшенні відстані

від залізничної інфраструктури, що свідчить про те, що залізнична колія та пов'язана з нею діяльність є основним джерелом надходження цих забруднювачів у ґрунт. Свинець також досягає максимальної концентрації у найближчій до колії точці відбору, проте не демонструє лінійного зниження концентрації з віддаленням від колії. Найбільш інтенсивне забруднення цинком та міддю в приколійній зоні може бути зумовлене продуктами зносу рухомого складу, цинкуванням металевих конструкцій колії, а також осадженням промислових викидів від локомотивів. Виражений градієнт концентрацій чітко демонструє міграцію забруднювачів від залізничної колії у навколишні ґрунти. На рисунку 2 відображено градієнт залежності концентрації важких металів від відстані до колії.

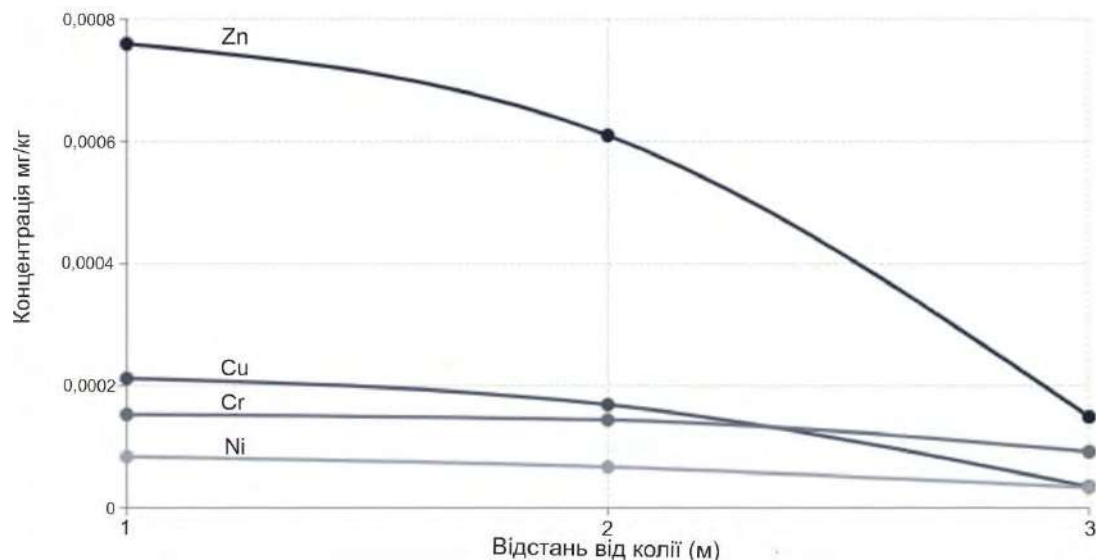


Рисунок 2. — Залежність концентрації від відстані до колії

*Джерело: розроблено авторами

Графік відображає залежність концентрацій важких металів (від відстані до залізничної колії в трьох точках відбору. Усі чотири метали - цинк, мідь, хром та нікель - демонструють закономірне зниження концентрацій при збільшенні відстані від колії, проте характер цього зниження суттєво відрізняється. Найбільш виражений градієнт спостерігається для цинку, який показує різке, майже п'ятикратне падіння концентрації від першого до третього метра, тоді як мідь, хром та нікель характеризуються більш плавним, поступовим зниженням. Така аномально висока швидкість зменшення концентрації цинку може бути зумовлена специфікою його міграції у ґрунтовому середовищі: цинк характеризується високою мобільністю та розчинністю, особливо у формі іонів та комплексних сполук, що забезпечує його швидке вимивання атмосферними опадами та транспортування на значні відстані. Крім того, джерело цинкового забруднення, ймовірно пов'язане з цинкуванням металоконструкцій або гальванічними процесами, розташоване безпосередньо біля колії, що створює локальний піковий викид у точці один метр, після чого відбувається стрімке розведення забруднювача. На відміну від цинку, мідь, хром та нікель мають

меншу мобільність через їх здатність до сорбції на органічній речовині ґрунту та глинистих мінералах, що забезпечує більш рівномірний просторовий розподіл та менш різкий градієнт концентрацій.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведених досліджень геохімічного стану ґрунтів у зоні впливу залізничного транспорту методом рентгенофлуоресцентної спектроскопії визначено елементний склад ґрунтових проб, відібраних на градієнтних відстанях від колії. Встановлено присутність 26 хімічних елементів у досліджуваних зразках, серед яких виявлено значне техногенне збагачення залізом, цинком, міддю, нікелем та хромом. Цинк та мідь демонструють найвищі концентрації серед усіх досліджених важких металів, досягаючи максимальних значень у безпосередній близькості від залізничної колії. Нікель та хром присутні у нижчих концентраціях порівняно з цинком та міддю, проте зберігають аналогічний характер просторового розподілу з послідовним зниженням при віддаленні від колії. Для свинцю встановлено нелінійний характер розподілу, що може вказувати на наявність додаткових локальних джерел забруднення.

Результати дослідження підтверджують високий ступінь техногенної трансформації ґрунтового покриву придорожніх територій залізниці та формування локальних геохімічних аномалій у приколіній смузі. Встановлені закономірності просторової міграції забруднювачів від залізничної колії у навколишні ґрунти обґрунтовують необхідність систематичного екологічного моніторингу придорожніх територій залізничної інфраструктури, особливо в зонах проходження колій через сільськогосподарські угіддя та селітебні території, де ризики для здоров'я населення є найбільш критичними.

Список літератури

1. Devatha, C. P., Vishnu Vishal, A., & Purna Chandra Rao, J. (2019). Investigation of physical and chemical characteristics on soil due to crude oil contamination and its remediation. *Applied Water Science*, 9, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0970-4>
2. Kuppusamy, S., Maddela, N. R., ... & Venkateswarlu, K. (2020). Ecological impacts of total petroleum hydrocarbons. *Total petroleum hydrocarbons: Environmental fate, toxicity, and remediation*, 95-138.
3. Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*, 12(21), 9002.
4. Vaiškūnaitė, R., & Jasiūnienė, V. (2020). The analysis of heavy metal pollutants emitted by railway transport. *Transport*, 35(2), 213-223. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.12751>
5. Brtnický, M., Pecina, V., Juříčka, D., Kowal, P., Galiová, M. V., Baltazár, T., & Radziemska, M. (2022). Can rail transport-related contamination affect railway vegetation? A case study of a busy railway corridor in Poland. *Chemosphere*, 293, 133521. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133521>
6. Stančić, Z., Fiket, Ž., & Vuger, A. (2022). Tin and antimony as soil pollutants along railway lines—a case study from North-Western Croatia. *Environments*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.3390/environments9010010>
7. Szmagliński, J., Nawrot, N., Pazdro, K., Walkusz-Miotk, J., & Wojciechowska, E. (2021). The fate and contamination of trace metals in soils exposed to a railroad used by Diesel Multiple Units: Assessment of the railroad contribution with multi-tool source tracking. *Science of the Total Environment*, 798, 149300. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149300>
8. Stojić, N., Štrbac, S., Čurčić, L., Pucarević, M., Prokić, D., Stepanov, J., & Stojić, G. (2023). Exploring the impact of transportation on heavy metal pollution: A comparative study of trains and cars. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 125, 103966. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103966>
9. Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in pharmacology*, 12, 643972.
10. Rehman, A. U., Nazir, S., Irshad, R., Tahir, K., ur Rehman, K., Islam, R. U., & Wahab, Z. (2021). Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114455.
11. Botirov, M. T., Normatova, S. A., Nizametdinova, M., Shodmonov, U., & Mamarasulov, J. (2021). Influence of oil and oil products on living organisms and methods of soil purification from oil products. *Asian Journal of Advances in Research*, 186-190.

12. Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M.-Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
-
-

УДК 502/504

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-09>

ПОБЛЕМИ РОЗПОДІЛУ ВПЛИВУ АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА ВОДНІ ОБ'ЄКТИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ МІЛІТАРИЗАЦІЇ

Покшевніцька Т.В.Національний транспортний університет
вулиця Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, 01010officenttn@ukr.net

Анотація. У статті проаналізовано антропогенний вплив на водні об'єкти України в умовах повномасштабної військової агресії та посилення екологічних ризиків. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування та характеристика процесів трансформації водних екосистем під впливом господарської діяльності й воєнних чинників, а також оцінка ефективності превентивних механізмів екологічного регулювання. Розглянуто сучасні підходи до трактування понять «водні об'єкти» та «водні ресурси» у контексті національного законодавства та європейських екологічних підходів. Визначено основні джерела антропогенного забруднення поверхневих і підземних вод, охарактеризовано їх просторові закономірності та особливості формування в межах водогосподарських систем. Запропоновано поняття «екологічна мілітаризація» як комплексну характеристику впливу воєнних дій на стан водних екосистем, що проявляється у порушенні гідрологічних режимів, деградації водогосподарської інфраструктури та зміні екологічних функцій водних об'єктів. Особливу увагу приділено аналізу превентивних інструментів екологічного регулювання, зокрема процедури оцінки впливу на довкілля, у контексті вибору технічних альтернатив гідротехнічних рішень. Виявлено проблеми застосування багатокритеріальних підходів до

оцінювання альтернатив та недостатність урахування факторів воєнної стійкості. Показано доцільність інтеграції екологічних, технічних і воєнних критеріїв у систему прийняття рішень щодо проєктування та експлуатації водогосподарських об'єктів.

Ключові слова: водні об'єкти, антропогенне забруднення, екологічна мілітаризація, оцінка впливу на довкілля, технічні альтернативи, гідротехнічні споруди, воєнна стійкість.

Problems of the distribution of anthropogenic pollution impacts on water bodies of Ukraine in the context of environmental militarization.

Pokshevnytska T. The article analyzes anthropogenic impacts on water bodies in Ukraine under conditions of full-scale military aggression and increasing environmental risks. The aim of the study is to provide a theoretical substantiation and characterization of the processes of transformation of aquatic ecosystems under the influence of economic activities and military factors, as well as to assess the effectiveness of preventive mechanisms of environmental regulation. Modern approaches to the interpretation of the concepts of “water bodies” and “water resources” are considered in the context of national legislation and European environmental approaches. The main sources of anthropogenic pollution of surface and groundwater are identified, and their spatial patterns and specific features of formation

within water management systems are characterized. The concept of “environmental militarization” is proposed as a comprehensive characteristic of the impact of military actions on the state of aquatic ecosystems, manifested in disruptions of hydrological regimes, degradation of water management infrastructure, and changes in the ecological functions of water bodies. Special attention is paid to the analysis of preventive instruments of environmental regulation, in particular the environmental impact assessment procedure, in the context of selecting technical alternatives for hydraulic engineering solutions. Problems in the application of multicriteria approaches to the assessment of alternatives and insufficient consideration of military resilience factors are identified. The expediency of integrating environmental, technical, and military criteria into the decision-making system regarding the design and operation of water management facilities is demonstrated.

Keywords: water bodies, anthropogenic pollution, environmental militarization, environmental impact assessment, technical alternatives, hydraulic structures, military resilience.

Постановка проблеми. Водні об'єкти становлять основу екологічної рівноваги, водопостачання населення та функціонування природних екосистем [1]. Згідно з Водною стратегією України на період до 2050 року, усі води на території держави становлять її водний фонд та потребують комплексного підходу до управління й охорони [2]. Однак інтенсивне господарське використання водних ресурсів неминуче супроводжується антропогенним навантаженням, що проявляється у зміні якісного стану води та порушенні природних умов функціонування водних екосистем [3].

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена змінами стану якості водних об'єктів України та появою нових викликів, пов'язаних із повномасштабною військовою агресією. Відповідно до

офіційних даних, екологічний стан переважної більшості поверхневих водних масивів країни оцінюється як задовільний, поганий або дуже поганий [2]. Серед основних водно-екологічних проблем визначено забруднення поверхневих вод органічними та біогенними речовинами, наявність точкових і дифузних джерел забруднення, а також гідроморфологічні зміни, пов'язані з господарським використанням водних ресурсів [4-5]. В умовах воєнного стану ці проблеми набувають нової якості та вимагають переосмислення традиційних підходів до екологічного регулювання.

У цьому контексті превентивні механізми екологічного регулювання дозволяють контролювати негативний вплив на етапі планування господарської діяльності. У системі превентивного екологічного регулювання важливе місце посідає процедура оцінки впливу на довкілля, що дозволяє передбачити потенційні наслідки для навколишнього середовища та обґрунтувати альтернативні технічні рішення [6]. Однак ефективні результати значною мірою залежатимуть від того, наскільки добре критерії військової стійкості можуть бути інтегровані в процес оцінки технічних альтернатив в умовах дії воєнного стану.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах сучасних наукових підходів до оцінювання антропогенного впливу на водні об'єкти та розвитку превентивних механізмів екологічного регулювання. Авторський доробок спрямований на розв'язання актуальних наукових і практичних завдань, пов'язаних із забезпеченням екологічної безпеки водних ресурсів, удосконаленням методології оцінки впливу на довкілля та адаптацією екологічного регулювання до умов воєнних викликів.

Результати дослідження узгоджуються з положеннями Водної стратегії України на період до 2050 року, концепціями інтегрованого управління

водними ресурсами та сучасними підходами до оцінювання екологічних ризиків. Запропоновані теоретичні положення й методичні підходи можуть бути використані у практиці проектування та експлуатації гідротехнічних споруд, підготовці звітів з оцінки впливу на довкілля, а також у процесі формування та реалізації екологічної політики у сфері водокористування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика антропогенного навантаження на водні ресурси України розвивалася у двох взаємопов'язаних напрямках: (1) уточнення джерел і просторових закономірностей забруднення (передусім біогенами та органічними речовинами) в межах басейнових систем; (2) фіксація та інтерпретація додаткових ризиків, спричинених воєнними діями, руйнуванням інфраструктури водопостачання/водовідведення та гідротехнічних споруд.

У фахових гідроекологічних дослідженнях акцентовано, що надходження біогенних елементів у поверхневі води формується сукупністю точкових і дифузних джерел, а оцінювання забруднення потребує методично узгоджених підходів (зокрема щодо розрахунку навантажень азоту й фосфору та інтерпретації моніторингових даних) [7]. В українській науковій практиці також посилюється увага до зіставлення різних інструментів розрахунку навантажень у межах конкретних басейнів, що дає змогу виявляти «вузькі місця» водогосподарських систем і обґрунтовувати природоохоронні заходи [8].

Паралельно в міжнародних публікаціях розкрито, що воєнні дії створюють мультифакторний тиск на водні ресурси: від прямих випадків забруднення та аварійних скидів до зупинки/пошкодження систем водопідготовки й очищення стічних вод, а також ризиків, пов'язаних із підтопленням шахт і руйнуванням дамб [9]. У перспективному аналізі для басейну Дніпра

окремо обґрунтовано, що руйнування водної інфраструктури під час повномасштабної війни може зумовлювати зростання надходжень забруднювачів із неочищеними міськими стоками, змінюючи структуру джерел у бік домінування точкових викидів [10].

Дослідження, присвячені водній безпеці України, підкреслюють, що воєнні ризики (удари по інфраструктурі, обмеження доступу до води, втрата регулюючих функцій водосховищ) суттєво загострюють уже наявні проблеми, пов'язані з кліматичними екстремумами та нерівномірністю забезпечення водними ресурсами [11]. Окремий блок робіт фокусується на наслідках руйнування Каховського водосховища як події, що призводить до масштабних екосистемних втрат і трансформації водних екосистем, зокрема через деградацію рибогосподарських ресурсів та зміну умов існування водної біоти [12].

Таким чином, сучасні публікації формують наукове підґрунтя для комплексного аналізу: традиційні підходи до оцінювання антропогенного забруднення (біогенні/органічні речовини; точкові/дифузні джерела; басейнові закономірності) доповнюються воєнно зумовленими чинниками ризику, що вимагає інтеграції гідроекологічних і інфраструктурних критеріїв у систему екологічного регулювання.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Аналіз сучасних наукових досліджень засвідчує, що проблематика антропогенного впливу на водні ресурси достатньо широко представлена в гідроекологічних, географічних і природоохоронних роботах. Значна увага приділяється оцінюванню якості поверхневих і підземних вод, ідентифікації джерел забруднення, аналізу ролі точкових і дифузних навантажень, а також вивченню гідроморфологічних змін водних об'єктів. Водночас більшість досліджень зосереджена на умовах

мирного часу та не враховує специфіку функціонування водних систем в умовах воєнних впливів. Недостатньо розробленими залишаються питання комплексного аналізу трансформації водних екосистем під впливом воєнних дій, зокрема у поєднанні з традиційними чинниками антропогенного навантаження. У наукових публікаціях фрагментарно висвітлюються наслідки руйнування водогосподарської інфраструктури, порушення режимів водокористування та зміни структури джерел забруднення, однак відсутній цілісний методологічний підхід до оцінювання цих процесів у межах єдиної концептуальної моделі. Окремою невирішеною проблемою є обмеженість методичних підходів до врахування воєнних ризиків у системі превентивного екологічного регулювання. Процедура оцінки впливу на довкілля, попри її потенціал як інструменту попередження негативних екологічних наслідків, у практиці застосування переважно орієнтована на традиційні екологічні та технічні критерії. Питання інтеграції критеріїв воєнної стійкості та багатокритеріального оцінювання технічних альтернатив у процесі прийняття рішень щодо водогосподарських об'єктів залишаються недостатньо опрацьованими. Таким чином, потребують подальшого дослідження теоретичні та методологічні засади оцінювання антропогенного впливу на водні об'єкти в умовах екологічної мілітаризації, а також розробка підходів до інтеграції воєнних чинників у систему екологічного регулювання та практику оцінки впливу на довкілля.

Матеріали та методи дослідження. Методологічну основу дослідження становить системний та міждисциплінарний підхід до аналізу антропогенного впливу на водні об'єкти, що поєднує положення гідроекології, водного менеджменту, екологічного права та теорії екологічного регулювання.

У процесі дослідження використано комплекс теоретичних і емпіричних методів. Теоретичний аналіз застосовано

для узагальнення сучасних наукових підходів до визначення понять «водні об'єкти», «водні ресурси», «антропогенне забруднення» та «екологічна мілітаризація», а також для систематизації наукових публікацій і нормативно-правових документів у сфері управління водними ресурсами та оцінки впливу на довкілля.

Для оцінювання структури та механізмів антропогенного впливу використано концептуальну модель DPSIR (Driving forces – Pressures – State – Impacts – Responses), що дозволило формалізувати взаємозв'язки між соціально-економічними чинниками, джерелами забруднення, змінами стану водних екосистем та управлінськими реакціями. У межах цього підходу проведено аналіз просторових закономірностей розподілу антропогенного навантаження в межах окремих водних об'єктів і басейнів водозбору.

Порівняльний аналіз застосовано для оцінювання технічних альтернатив гідротехнічних рішень у межах процедури оцінки впливу на довкілля. При цьому використано елементи багатокритеріального оцінювання, що передбачали врахування екологічних, технічних, економічних і соціальних показників, а також критеріїв воєнної стійкості водогосподарських об'єктів.

Емпіричну базу дослідження становили матеріали звітів з оцінки впливу на довкілля гідротехнічних проєктів, дані державного моніторингу поверхневих і підземних вод, статистичні матеріали органів державної влади, а також інформація міжнародних організацій і наукових публікацій 2022–2024 років.

Методи узагальнення, систематизації та логічного моделювання використано для формування висновків щодо особливостей трансформації водних екосистем в умовах антропогенного навантаження та екологічної мілітаризації, а також для обґрунтування напрямів удосконалення превентивних механізмів екологічного регулювання.

Результати дослідження та їх обговорення. Водний кодекс України визначає водний об'єкт як природний або створений штучно об'єкт довкілля, в якому зосереджуються води: море, річка, озеро, водосховище, став, канал, водонесний горизонт. Це визначення охоплює як природні, так і штучні форми водних об'єктів, акцентуючи увагу на їх здатності накопичувати воду. Водночас у визначенні відсутній акцент на екологічних функціях водних об'єктів, таких як підтримка біорізноманіття, очищення води, регулювання клімату [13].

Імплементация положень Водної рамкової директиви ЄС в Україні здійснюється через розроблення Планів управління річковими басейнами, де поняття водного об'єкта конкретизується через категорії "масив поверхневих вод" та "масив підземних вод". У цьому контексті водний об'єкт трактується як функціональна екосистемна одиниця управління, для якої проводиться оцінка екологічного стану, аналіз антропогенних впливів і планування заходів з охорони та відновлення. Такий підхід відображає перехід від ресурсно-адміністративного розуміння водних об'єктів до інтегрованого екосистемного підходу [14].

Поняття "водні ресурси" відображає утилітарний підхід до водних об'єктів, акцентуючи увагу на їх господарській цінності. Згідно з Водним кодексом України, водні ресурси – це обсяги поверхневих, підземних і морських вод відповідної території. У міжнародній практиці поняття водних ресурсів тісно пов'язане з концепцією відновлюваності [13]. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН визначає відновлювані водні ресурси як внутрішні води, що поновлюються глобальним водним циклом [15].

Використання водних об'єктів і їх ресурсів у господарській діяльності неминуче супроводжується антропогенним навантаженням. На відміну від природних процесів самоочищення, антропогенне забруднення має цілеспрямований,

просторово неоднорідний характер і формується під впливом як зовнішніх джерел надходження забруднюючих речовин, так і процесів, пов'язаних безпосередньо з використанням водних ресурсів. Зовнішні джерела надходження забруднюючих речовин формують суттєву складову антропогенного навантаження на водні об'єкти. Цей тип забруднення є результатом господарської діяльності у межах басейну водного об'єкта та прилеглих територій і характеризується переважно опосередкованим впливом, при якому водний об'єкт виступає приймачем забруднюючих речовин. До основних механізмів формування зовнішнього антропогенного навантаження належать дифузні змиви з сільськогосподарських і урбанізованих територій, точкові скиди з промислових та комунальних об'єктів, фільтрація забруднених вод через ґрунтову товщу, а також атмосферна депозиція забруднюючих речовин антропогенного походження. Поряд із зовнішніми джерелами, антропогенне навантаження формується також у процесі безпосереднього використання водних ресурсів. У цьому випадку зміна якісного стану води пов'язана з порушенням природного режиму функціонування водних об'єктів унаслідок експлуатаційних впливів. Використання водних ресурсів може супроводжуватися залученням у водообмін забруднених вод, зміною напрямків і швидкості руху води, а також порушенням природних механізмів самоочищення. Для поверхневих вод це проявляється у зміні режиму течії, водообміну та акумуляції забруднюючих речовин, тоді як для підземних вод експлуатаційне навантаження пов'язане зі зміною гідродинамічних умов, формуванням депресійних воронок і залученням вод із суміжних горизонтів [16-17].

До окремої категорії антропогенного впливу на водні об'єкти належить забруднення, зумовлене воєнними конфліктами. В умовах повномасштабної військової агресії виникає потреба у

введенні нового поняття, яке б комплексно відображало специфіку трансформації водних екосистем під впливом воєнних дій. Пропонується термін *"екологічна мілітаризація"* – системний процес трансформації природних екосистем, зокрема водних об'єктів, під впливом прямих і опосередкованих воєнних дій, що характеризується комплексним порушенням екологічних функцій, деградацією водогосподарської інфраструктури та необхідністю інтеграції критеріїв воєнної стійкості у систему екологічного регулювання.

Екологічна мілітаризація водних об'єктів проявляється у трьох взаємопов'язаних вимірах. По-перше, це пряме воєнне забруднення, що включає надходження специфічних забруднюючих речовин внаслідок бойових дій, руйнування промислових та водогосподарських об'єктів, порушення цілісності гідротехнічних споруд. По-друге, це опосередкований вплив через дестабілізацію систем моніторингу, управління та охорони водних ресурсів, що призводить до накопичення екологічних проблем і неможливості своєчасного реагування. По-третє, це довгострокові наслідки, пов'язані з необхідністю відновлення водогосподарської інфраструктури в умовах обмежених ресурсів і триваючих ризиків.

Особливістю екологічної мілітаризації є те, що вона не обмежується територіями активних бойових дій, а поширюється на всю водогосподарську систему держави через гідрологічні зв'язки, міграцію забруднюючих речовин та необхідність перерозподілу водних ресурсів. Екологічна безпека водних ресурсів у цих умовах визначається як стан захищеності водних об'єктів і водогосподарських систем від воєнних і пов'язаних з ними негативних впливів, що забезпечує їхню здатність задовольняти потреби населення та екосистем без шкоди для здоров'я людини й довкілля.

Концепція екологічної мілітаризації вимагає перегляду традиційних підходів до

оцінки антропогенного впливу на водні об'єкти. Якщо класичне розуміння антропогенного забруднення фокусується на господарській діяльності мирного часу, то екологічна мілітаризація інтегрує воєнні ризики як постійний фактор, що має враховуватися при плануванні, проектуванні та експлуатації водогосподарських об'єктів. Це передбачає необхідність розробки критеріїв воєнної стійкості інфраструктури, методів оцінки вразливості водних систем до воєнних впливів та механізмів швидкого відновлення функціонування після пошкоджень.

Сучасні методології оцінки впливу антропогенного забруднення базуються на моделях DPSIR (Рушійні сили – Тиски – Стан – Впливи – Реакції), які формалізують послідовність переходу від рушійних соціально-економічних факторів до тиску на водні системи, змін стану навколишнього середовища та екологічних наслідків. У межах цього підходу "тиски" розглядаються як джерела надходження забруднюючих речовин та змін гідрологічних умов, а "впливи" – як зміни якості води, структури і функціонування водних екосистем. Такий підхід дозволяє простежити просторові патерни впливу забруднення в межах водного об'єкта або басейну водозбору [18-20].

У водному менеджменті, зокрема у межах реалізації Водної рамкової директиви ЄС, підкреслюється важливість оцінювання стану водних масивів за фізико-хімічними та екологічними параметрами, що дозволяє виявляти просторові патерни змін, пов'язані з антропогенним забрудненням. Такий підхід фокусується не на локалізації джерела як такого, а на просторовому впливі забруднення – на тих ділянках водного об'єкта, де спостерігаються стійкі зміни параметрів якості води. Аналіз таких патернів дає змогу виділяти зони підвищених концентрацій забруднювальних речовин, зони змішаних вод і зони кумулятивного навантаження від кількох джерел одночасно [14].

Особливе місце серед джерел антропогенного впливу займають гідротехнічні споруди, які водночас виступають інструментом управління водними ресурсами та чинником трансформації природних гідрологічних режимів. На відміну від більшості видів антропогенного забруднення, пов'язаних з надходженням хімічних речовин, гідротехнічні споруди здійснюють функціонально зумовлений вплив, безпосередньо змінюючи гідрологічний режим, просторову структуру потоків, умови водообміну та формування водних ресурсів. Унікальність гідротехнічних споруд полягає в тому, що, будучи створеними з метою регулювання, захисту або раціонального використання вод, вони водночас виступають чинниками довготривалої трансформації водних екосистем і ресурсного потенціалу водних об'єктів [21-22].

Для поверхневих водозаборів характерна градієнтна закономірність розподілу впливу антропогенного забруднення, за якої максимальні зміни гідродинамічних умов і пов'язані з ними ефекти вторинного забруднення приурочені до прибережної зони та безпосередньо до району водозабірної споруди. Числові моделі течії показують, що формування зони підвищених швидкостей і турбулентності спричиняє локальне підняття донних відкладів і перерозподіл завислих домішок, а інтенсивність цього впливу зменшується з віддаленням від водозабору. Масштаби такої зони прямо залежать від витрати водовідбору, що визначає просторові межі впливу забруднення та його концентрацію в окремих ділянках водойми.

Для підземних водозаборів характерна радіально-градієнтна закономірність розподілу впливу антропогенного забруднення, зумовлена формуванням депресійних зон у водоносних горизонтах. У межах таких зон змінюється напрям фільтраційних потоків, що сприяє просторово нерівномірному надходженню домішок та трансформації

гідрохімічного складу підземних вод. Сучасні тривимірні моделі підтверджують, що зі зростанням інтенсивності водовідбору масштаби зон впливу розширюються, а межі просторового поширення забруднення визначаються поєднанням дебіту свердловин і фільтраційних властивостей порід. Тривала експлуатація водозаборів призводить до формування стійких зон гідрохімічних змін, що не збігаються з місцем забору, але є закономірним наслідком перерозподілу підземних потоків.

Просторові закономірності розподілу впливу можуть розглядатися на різних рівнях організації водних систем. На локальному рівні вплив проявляється в межах окремої водозабірної споруди або ділянки водного об'єкта і характеризується найвищою інтенсивністю змін гідродинамічних і гідрохімічних параметрів. На регіональному рівні формуються зони поширення впливу в межах річкового басейну або водоносного горизонту, де накопичуються ефекти від множинних джерел забруднення. На басейновому рівні проявляються інтегральні закономірності, пов'язані з кумулятивним впливом усіх джерел антропогенного навантаження та природними процесами самоочищення.

В умовах екологічної мілітаризації просторові закономірності розподілу антропогенного забруднення ускладнюються додатковими факторами. Руйнування гідротехнічних споруд призводить до формування нових, непередбачуваних зон забруднення, пов'язаних із неконтрольованим скиданням накопичених забруднюючих речовин, зміною гідрологічного режиму та порушенням природних бар'єрів. Воєнні дії можуть спричиняти каскадні ефекти, коли пошкодження однієї споруди призводить до ланцюгової реакції порушень у водогосподарській системі. Це вимагає розробки нових методів прогнозування просторового поширення забруднення з урахуванням можливих воєнних сценаріїв

та оцінки вразливості водних систем до різних типів воєнних впливів.

Таким чином, розуміння закономірностей розподілу та рівнів впливу антропогенного забруднення є необхідною основою для розробки ефективних превентивних механізмів екологічного регулювання. Просторово-функціональний підхід до оцінки впливу дозволяє не лише ідентифікувати джерела забруднення, а й прогнозувати масштаби та інтенсивність їх впливу на різних рівнях організації водних систем, що є критично важливим для обґрунтування технічних рішень у процедурі оцінки впливу на довкілля.

В умовах зростання техногенного навантаження та екологічної мілітаризації дедалі більшого значення набувають превентивні механізми екологічного регулювання, сутність яких полягає у перенесенні акценту з реагування на вже сформовані негативні наслідки на попередження потенційно небезпечних впливів ще на етапі планування діяльності. Ефективність екологічної політики значною мірою залежить від здатності інтегрувати екологічні критерії та критерії воєнної стійкості у процес формування технічних і управлінських рішень [23, 24]. Процедура ОВД забезпечує можливість прогнозування потенційних екологічних наслідків планованої діяльності та обґрунтування альтернативних технічних рішень. Аналіз альтернатив у межах ОВД розглядається як центральний елемент процесу прийняття рішень, що дозволяє порівнювати різні варіанти технологічних, конструктивних і просторових рішень, а також впливати на параметри проєктів ще до їх реалізації.

В умовах екологічної мілітаризації процедура ОВД набуває нового значення як механізм інтеграції критеріїв воєнної стійкості у процес проєктування гідротехнічних споруд. Технічні рішення мають оцінюватися не лише з позицій екологічної ефективності, економічної доцільності та соціальної прийнятності, а й з урахуванням здатності об'єктів протистояти воєнним впливам, швидко

відновлюватися після пошкоджень та забезпечувати автономність функціонування в кризових умовах.

У країнах Європейського Союзу аналіз альтернатив є обов'язковим елементом процедури оцінки впливу відповідно до Директиви 2011/92/ЄС [25]. Європейська модель ОВД ґрунтується на принципі раннього включення аналізу альтернатив у процес планування проєктів, що передбачає врахування екологічних критеріїв ще на стадії формування концепції проєкту. У сучасній європейській практиці поступово розширюється розуміння альтернатив, які охоплюють не лише технічні рішення, а й альтернативи просторового розміщення, масштабу діяльності, технологічних підходів, а також управлінських і організаційних рішень.

Чинне законодавство України у сфері оцінки впливу на довкілля передбачає обов'язковий розгляд альтернатив планованої діяльності, однак не встановлює конкретних методів їх порівняння та чітко визначених критеріїв оцінювання [6]. Така нормативна невизначеність створює ризик формального виконання вимог щодо аналізу альтернатив без реального пошуку оптимальних технічних рішень.

Аналіз практики підготовки звітів з ОВД для гідротехнічних проєктів засвідчує наявність системних недоліків у підходах до розгляду і порівняння технічних альтернатив. Встановлено, що у переважній більшості випадків розглядається обмежена кількість альтернатив – часто лише дві (обрана та відхилена), що фактично звужує можливості вибору оптимальних технічних рішень і знижує аналітичну цінність процедури ОВД.

Значна частина звітів характеризується поверховим рівнем опрацювання альтернатив, який не супроводжується повноцінним порівняльним аналізом. Виявлено значну варіативність у кількості та складі груп критеріїв, що застосовуються для порівняння технічних альтернатив. У більшості звітів використовується обмежений набір критеріїв, переважно

екологічних або економічних і технічних, тоді як економічні, соціальні та, що особливо важливо, критерії воєнної стійкості враховуються епізодично або взагалі не розглядаються. Така неоднорідність підходів свідчить про відсутність уніфікованої методології багатокритеріального оцінювання у процедурі ОВД.

Якісний аналіз засвідчив переважання неформалізованих або частково формалізованих методів порівняння альтернатив, що базуються переважно на якісних описах без системного використання кількісних показників. Формалізовані методи багатокритеріального аналізу застосовуються вкрай обмежено, що знижує об'єктивність та прозорість обґрунтування вибору пріоритетних технічних рішень.

Особливої уваги в контексті екологічної мілітаризації заслуговує питання врахування воєнних ризиків при порівнянні технічних альтернатив. Попри очевидну актуальність цього аспекту в умовах воєнного стану, системний аналіз критеріїв воєнної стійкості – захищеності об'єктів від прямих воєнних впливів, здатності до швидкого відновлення, автономності функціонування – здійснюється лише у поодиноких випадках. Це свідчить про недостатню адаптацію практики ОВД до умов екологічної мілітаризації та функціонування критичної інфраструктури в умовах воєнного стану.

Узагальнюючи, можна констатувати, що чинна практика розгляду технічних альтернатив у звітах з оцінки впливу на довкілля не забезпечує повноцінного, об'єктивного та комплексного обґрунтування вибору технічних рішень, особливо в контексті екологічної мілітаризації. Виявлені недоліки підтверджують необхідність розробки уніфікованої методології багатокритеріального оцінювання технічних альтернатив гідротехнічних об'єктів, яка має враховувати екологічні,

технічні, економічні, соціальні та воєнні аспекти.

Висновки

У результаті проведеного дослідження встановлено, що антропогенний вплив на водні об'єкти України в сучасних умовах характеризується ускладненням структури чинників і механізмів формування, що зумовлено поєднанням традиційних господарських навантажень і воєнних впливів. Це зумовлює трансформацію гідрологічних режимів, зміну якісного стану водних ресурсів та порушення екологічних функцій водних екосистем.

Обґрунтовано доцільність використання поняття «екологічна мілітаризація» для опису системних змін водних екосистем під впливом воєнних дій. Показано, що екологічна мілітаризація проявляється у порушенні гідрологічних процесів, деградації водогосподарської інфраструктури, зміні структури джерел забруднення та посиленні просторової неоднорідності антропогенного навантаження в межах водних басейнів.

Встановлено, що гідротехнічні споруди виступають не лише елементами управління водними ресурсами, а й чинниками довготривалої трансформації природних гідрологічних режимів і водних екосистем. Їх функціонування зумовлює зміни просторової структури потоків, умов водообміну та формування ресурсного потенціалу водних об'єктів, що потребує комплексного врахування у системі екологічного регулювання.

Проаналізовано роль превентивних механізмів екологічного регулювання, зокрема процедури оцінки впливу на довкілля, у контексті планування та реалізації водогосподарських проєктів. Виявлено, що чинна практика оцінювання технічних альтернатив характеризується обмеженістю методичних підходів і недостатнім урахуванням воєнних ризиків та критеріїв стійкості. Це знижує потенціал превентивних інструментів у запобіганні негативним екологічним наслідкам.

Доведено необхідність удосконалення методології оцінювання антропогенного впливу на водні об'єкти шляхом інтеграції екологічних, технічних, економічних і воєнних критеріїв у процес прийняття рішень щодо проєктування та експлуатації водогосподарських систем. Запропонований підхід створює передумови для підвищення ефективності екологічного регулювання та адаптації систем управління водними ресурсами до умов екологічної мілітаризації.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку формалізованих методів багатокритеріального оцінювання технічних альтернатив гідротехнічних споруд, удосконалення системи показників воєнної стійкості водогосподарських об'єктів та адаптацію європейських підходів до оцінки впливу на довкілля з урахуванням специфіки функціонування водних систем в умовах воєнних ризиків.

ЛІТЕРАТУРА

1. UN-Water. Progress on Water-related Ecosystems : SDG indicator 6.6.1 report 2024. 2024. URL: <https://www.unwater.org/publications/progress-water-related-ecosystems-2024>.
2. Водна стратегія України на період до 2050 року : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80>.
3. European Environment Agency. Europe's water: an indicator-based assessment : EEA Report. Copenhagen, 2023. URL: <https://www.eea.europa.eu>.
4. Хільчевський В. К., Гребінь В. В. Сучасні проблеми якості поверхневих вод України. Український географічний журнал. 2023. № 2. С. 24–35.
5. Бондар О. І., Яцик А. В. Антропогенний вплив на водні ресурси України та екологічні ризики. Екологічні науки. 2022. № 5(44). С. 18–27.
6. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII (із змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>.
7. Osadcha N. M., Luzovitska Yu. A., Ukhan O. O., Biletska S. V., Osypov V. V., Bonchkovsky A. S., Nabyvanets Yu. B., Osadchyi V. I. Methodology for assessing the surface water pollution by nutrients. Ukrainian Geographical Journal. 2022. № 4. P. 37–48. DOI: 10.15407/ugz2022.04.037.
8. Bonchkovskyi A. S., Osypov V. V. Assessment of nutrients load in the Sula river basin from point and diffuse sources. Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology. 2024. Vol. 1(71). P. 58–73. DOI: 10.17721/2306-5680.2024.1.6.
9. Shumilova O., Tockner K., Sukhodolov A., Khilchevskiy V., De Meester L., Stepanenko S., Trokhymenko G., Hernández-Agüero J. A., Gleick P. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. Nature Sustainability. 2023. Vol. 6. P. 578–586. DOI: 10.1038/s41893-023-01068-x.
10. Stokal V., Kurovska A., Stokal M. More river pollution from untreated urban waste due to the Russian-Ukrainian war: a perspective view. Journal of Integrative Environmental Sciences. 2023. Vol. 20(1). Art. 2281920. DOI: 10.1080/1943815X.2023.2281920.
11. Snizhko S., Didovets I., Bronstert A. Ukraine's water security under pressure: Climate change and wartime. Water Security. 2024. Vol. 23. 100182. DOI: 10.1016/j.wasec.2024.100182.
12. Novitskyi R., Hapich H., Maksymenko M., Kovalenko V. Loss of fisheries from destruction of the Kakhovka reservoir. International Journal of Environmental Studies. 2024. P. 1–9. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314890.
13. Водний кодекс України : Закон України від 06.06.1995 № 213/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>.
14. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy.

URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060>.

15. Food and Agriculture Organization of the United Nations. AQUASTAT : Global information system on water and agriculture. Rome, 2023. URL: <https://www.fao.org/aquastat/en/>.

16. United Nations World Water Assessment Programme. United Nations World Water Development Report 2024 : Water for prosperity and peace. Paris : UNESCO, 2024. URL: <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2024>.

17. Stokal M., Bai Z., Luan S., Kroeze C., Ma L., Velthof G., et al. Increasing anthropogenic nutrient inputs to rivers worldwide. *Science of the Total Environment*. 2023. Vol. 856. 159095. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159095.

18. European Environment Agency. Environmental indicators: typology and overview. Technical report No 25/1999. Copenhagen : EEA. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25>.

19. Organisation for Economic Co-operation and Development. Environment at a Glance 2023 : OECD Indicators. Paris : OECD Publishing, 2023. URL: <https://www.oecd.org/environment/environment-at-a-glance/>.

20. Gari S. R., Newton A., Icely J. A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. *Ocean & Coastal*

Management. 2022. Vol. 103. P. 63–77. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2014.11.013.

21. Grill G., Lehner B., Lumsdon A. E., MacDonald G. K., Zarfl C., Reidy Liermann C. An index-based framework for assessing the ecological impacts of dams. *Environmental Research Letters*. 2023. Vol. 18. 044003. DOI: 10.1088/1748-9326/acb5c5.

22. Zarfl C., Lumsdon A. E., Berlekamp J., Tydecks L., Tockner K. A global boom in hydropower dam construction. *Aquatic Sciences*. 2022. Vol. 84. 5. DOI: 10.1007/s00027-021-00845-3.

23. European Commission. Environmental Impact Assessment of Projects : Guidance on the preparation of the Environmental Impact Assessment Report. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2022. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/environmental-assessment/eia_en.

24. Organisation for Economic Co-operation and Development. Building Climate and Environmental Resilience : Policy Perspectives. Paris : OECD Publishing, 2023. URL: <https://www.oecd.org/environment/>.

25. Directive 2011/92/EU of the European Parliament and of the Council of 13 December 2011 on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32011L0092>

УДК 628.4:662.76

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-10>

ГАЗИФІКАЦІЯ ВІДХОДІВ ЯК ТЕРМОХІМІЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Маркіна Людмила, Коваленко ДаниїлДержавна наукова установа «Інститут
екологічного відновлення та розвитку України»

Анотація

У статті досліджено газифікацію відходів як сучасну термохімічну технологію, що спрямована на підвищення рівня екологічної безпеки та зменшення негативного впливу відходів на навколишнє природне середовище. В умовах зростання обсягів утворення твердих побутових і промислових відходів, обмеженості полігонних потужностей та посилення екологічних вимог газифікація розглядається як ефективна альтернатива традиційним методам захоронення та прямого спалювання. У роботі проаналізовано сутність процесу газифікації, основні фізико-хімічні перетворення органічної складової відходів у високотемпературному середовищі з обмеженим доступом окисника, а також особливості формування синтез-газу як цільового продукту. Показано, що газифікація забезпечує значне зменшення маси й об'єму відходів, зниження їх токсичності та мінімізацію довгострокових екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням атмосферного повітря, ґрунтів і водних об'єктів. Особливу увагу приділено екологічним аспектам експлуатації газифікаційних установок, зокрема рівню викидів забруднюючих речовин і можливостям їх скорочення за рахунок застосування сучасних систем очищення газової фази. Проведено порівняльний аналіз газифікації з іншими термічними технологіями оброблення відходів, такими як піроліз і спалювання, що дозволило обґрунтувати переваги

газифікації з позицій екологічної ефективності та ресурсної доцільності. Зроблено висновок, що впровадження газифікаційних технологій у системи управління відходами сприяє реалізації принципів циркулярної економіки, підвищенню рівня екологічної та енергетичної безпеки територій і створює передумови для сталого розвитку.

Ключові слова: газифікація відходів, термохімічні технології, синтез-газ, екологічна безпека, управління відходами, енергетична утилізація, сталий розвиток.

Abstract

The article investigates waste gasification as a modern thermochemical technology aimed at improving environmental safety and reducing the negative impact of waste on the environment. Under conditions of increasing volumes of municipal and industrial waste generation, limited landfill capacity, and stricter environmental regulations, gasification is considered an effective alternative to conventional disposal and incineration methods. The study analyzes the essence of the gasification process, the main physicochemical transformations of the organic fraction of waste in a high-temperature environment with limited oxidant supply, and the formation of synthesis gas as the target product. It is shown that gasification provides a significant reduction in waste mass and volume, decreases toxicity, and minimizes long-term environmental risks associated with air, soil, and water pollution. Particular attention is

paid to the environmental aspects of gasification plant operation, including pollutant emissions and the possibilities for their reduction through advanced gas cleaning systems. A comparative analysis of gasification with other thermal waste treatment technologies, such as pyrolysis and incineration, is carried out, substantiating the advantages of gasification in terms of environmental efficiency and resource recovery. The study concludes that the integration of gasification technologies into waste management systems contributes to the implementation of circular economy principles, enhances environmental and energy security, and supports sustainable development.

Keywords: waste gasification, thermochemical technologies, syngas, environmental safety, waste management, energy recovery, sustainable development.

Вступ

Сучасний етап розвитку суспільства характеризується стрімким зростанням обсягів утворення відходів, що зумовлено урбанізацією, індустріалізацією та підвищенням рівня споживання матеріальних ресурсів. Накопичення твердих побутових і промислових відходів за умов обмежених можливостей їх захоронення формує одну з ключових загроз екологічній безпеці територій, проявами якої є деградація ґрунтів, забруднення поверхневих і підземних вод, погіршення якості атмосферного повітря та зростання техногенних ризиків для здоров'я населення. Традиційні підходи до поводження з відходами, що базуються переважно на полігонному захороненні або прямому спалюванні, дедалі частіше виявляються екологічно та соціально неприйнятними, що актуалізує пошук альтернативних технологічних рішень.

У контексті переходу до принципів сталого розвитку та циркулярної економіки особливої уваги набувають термохімічні технології перероблення відходів, здатні поєднувати зменшення їх негативного впливу на довкілля з отриманням вторинних енергетичних

ресурсів. Газифікація відходів розглядається як одна з найбільш перспективних технологій цього напрямку, оскільки забезпечує глибоке термічне перетворення органічної складової у контрольованому середовищі з обмеженим доступом окисника. Такий підхід дозволяє істотно знизити масу та об'єм відходів, мінімізувати утворення токсичних сполук і сформувати синтез-газ, який може бути використаний для виробництва теплової та електричної енергії або як сировина для хімічних процесів.

На відміну від процесів прямого спалювання, газифікація характеризується вищим рівнем керованості фізико-хімічних перетворень, що створює передумови для зменшення викидів забруднюючих речовин та підвищення екологічної ефективності технології. Водночас екологічна доцільність застосування газифікації значною мірою залежить від морфологічного складу відходів, режимів термічної обробки та ефективності систем очищення газової фази, що зумовлює необхідність комплексного аналізу даної технології з позицій екологічної безпеки.

У зв'язку з цим актуальним є наукове обґрунтування ролі газифікації відходів у сучасних системах управління відходами, з урахуванням її екологічних переваг, потенційних обмежень і можливостей інтеграції в регіональні та національні стратегії сталого розвитку. Дослідження газифікаційних технологій у контексті підвищення рівня екологічної безпеки дозволяє сформувати науково обґрунтовані підходи до їх впровадження та сприяє переходу від утилізаційної моделі поводження з відходами до ресурсоефективної та екологічно орієнтованої системи.

Метою дослідження є наукове обґрунтування газифікації відходів як термохімічної технології підвищення рівня екологічної безпеки шляхом аналізу процесів термічного перетворення органічної складової відходів, оцінювання екологічних переваг і обмежень

технології, а також визначення її ролі в сучасних системах управління відходами. Досягнення поставленої мети передбачає формування комплексного уявлення про екологічну ефективність газифікаційних установок та можливості їх інтеграції в регіональні й національні стратегії сталого розвитку.

Наукова гіпотеза дослідження полягає в припущенні, що застосування газифікації відходів за умови оптимізованих температурних режимів і використання сучасних систем очищення газової фази забезпечує істотне зниження екологічних ризиків порівняно з традиційними методами захоронення та прямого спалювання. Передбачається, що така технологія дозволяє не лише мінімізувати викиди забруднюючих речовин і зменшити токсичність твердих залишків, а й підвищити рівень ресурсної та енергетичної ефективності систем поводження з відходами, що в цілому сприяє зміцненню екологічної безпеки території.

Матеріали та методи

Розкриття сутності процесу газифікації ґрунтується на його трактуванні як складного багатостадійного термохімічного процесу високотемпературного часткового окиснення органічної складової відходів у контрольованому середовищі з обмеженим доступом окисника. Такий підхід принципово відрізняє газифікацію від прямого спалювання, при якому відбувається повне окиснення органічної речовини з утворенням переважно діоксиду вуглецю, водяної пари та значної кількості теплової енергії. У випадку газифікації кількість окисника навмисно обмежується, що забезпечує переважання відновних і рівноважних реакцій та сприяє формуванню газоподібних продуктів із високою енергетичною цінністю.

Керування складом газифікуючого середовища, температурними режимами та часом перебування матеріалу в реакторі дозволяє регулювати співвідношення

основних компонентів синтез-газу, зокрема монооксиду вуглецю, водню, метану та вуглекислого газу. Це створює можливості для цілеспрямованої оптимізації процесу залежно від подальшого способу використання газової фази, а також для мінімізації утворення небезпечних побічних сполук. На відміну від прямого спалювання, за якого формування токсичних компонентів відбувається безпосередньо в зоні горіння та значною мірою залежить від нестабільності температурного режиму, газифікація забезпечує більш прогнозований і контрольований перебіг реакцій, що є важливою передумовою підвищення екологічної безпеки технології.

У реакторі газифікації реалізується послідовний комплекс фізико-хімічних перетворень, кожне з яких відіграє визначальну роль у формуванні кінцевих продуктів процесу. На початковій стадії відбувається сушіння відходів, під час якого видаляється волога та знижується енергетичне навантаження на подальші етапи термічної обробки. Наступною є стадія піролізу, що супроводжується термічним розкладанням органічної речовини з утворенням летких компонентів і твердого вуглецевмісного залишку. Подальші відновні реакції між вуглецем, водяною парою та вуглекислим газом сприяють утворенню монооксиду вуглецю та водню, які визначають паливну цінність синтез-газу. Часткове окиснення, у свою чергу, забезпечує підтримання необхідного теплового балансу процесу без залучення зовнішніх джерел енергії.

Сукупність зазначених стадій формує не лише склад і теплотворну здатність синтез-газу, а й фізико-хімічні властивості твердого залишку, який зазвичай характеризується зменшеною масою, нижчою біодоступністю небезпечних компонентів і підвищеною стабільністю порівняно з початковими відходами. Це створює передумови для зниження екологічних ризиків під час подальшого поводження з твердими

продуктами газифікації та розширює можливості їх вторинного використання.

Зосередження на екологічних аспектах застосування газифікаційних технологій дозволяє розглядати їх не лише як інженерне рішення з перероблення відходів, а як комплексний інструмент зниження довгострокових екологічних ризиків. Однією з ключових переваг газифікації є істотне скорочення обсягів захоронення відходів, що безпосередньо впливає на зменшення площ полігонів, зниження навантаження на ґрунтове середовище та мінімізацію ризиків фільтраційного забруднення підземних і поверхневих вод. Відмова від захоронення органічної фракції відходів також знижує ймовірність утворення біогазу та неконтрольованих викидів метану, що має суттєве значення з огляду на кліматичні аспекти екологічної безпеки.

Перетворення органічної складової відходів у газоподібне паливо в процесі газифікації створює передумови для скорочення використання викопних енергоресурсів і зменшення сумарного антропогенного навантаження на довкілля. Синтез-газ, отриманий у результаті термохімічної обробки, може бути використаний для виробництва теплової та електричної енергії або як сировина для подальших хімічних перетворень, що відповідає принципам ресурсоефективності та циркулярної економіки. Таким чином, газифікація сприяє переходу від утилізаційної моделі поводження з відходами до моделі їх залучення у вторинний ресурсний обіг.

Важливим екологічним аспектом є вплив газифікації на викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря. У порівнянні з прямим спалюванням відходів, газифікаційні процеси характеризуються нижчим потенціалом утворення оксидів азоту, діоксиду сірки, твердих частинок, а також діоксинів і фуранів, оскільки основні реакції відбуваються в контрольованому середовищі з обмеженим доступом кисню. Перенесення стадії окиснення газоподібних продуктів за межі основного

реактора створює можливість застосування багатоступневих систем очищення синтез-газу, що дозволяє ефективно видаляти пил, кислі гази та органічні домішки. За умови використання сучасних технологій газоочищення екологічні показники газифікаційних установок можуть відповідати або навіть перевищувати вимоги чинних нормативів щодо викидів забруднюючих речовин.

Окремої уваги потребує проблема поводження з твердими залишками газифікації, які утворюються внаслідок термохімічного перетворення неорганічної складової відходів. На відміну від зольних залишків після спалювання, тверді продукти газифікації зазвичай характеризуються нижчою розчинністю небезпечних компонентів і більш стабільною мінеральною структурою. Це зменшує ризики вторинного забруднення довкілля під час їх зберігання або захоронення та відкриває можливості для залучення таких матеріалів у вторинне використання, зокрема у будівельній галузі або як заповнювачі за умови дотримання екологічних вимог. У сукупності зазначені фактори свідчать про те, що газифікація відходів може розглядатися як екологічно доцільна технологія, здатна суттєво підвищити рівень екологічної безпеки та знизити негативний вплив систем поводження з відходами на навколишнє природне середовище.

Кількісне порівняння викидів доречно подавати не як «абстрактну екологічність», а через зіставлення фактичних (або розрахункових) концентрацій у димових газах із граничними значеннями, які встановлені регуляторно. Для газифікаційних ліній, де синтез-газ після очищення доспалюється в котлі/камері допалювання або двигуні, екологічна оцінка на виході установки практично зводиться до контролю параметрів, аналогічних установкам термічного оброблення відходів, оскільки саме стадія окиснення (допалювання) формує основний потік газів, що

відводиться в атмосферу. Важливо також, що нормативи задаються у стандартних умовах і за нормованої частки кисню, тому порівняння коректне лише після приведення вимірювань до «сухого газу» та відповідного O_2 .

Нижче наведено зіставлення ключових граничних показників для

установок спалювання відходів у ЄС [21], та в Україні [7]. Числа наведено як середньодобові (daily average) для безперервно контрольованих речовин, а для діоксинів/фуранів і металів — як середні за період відбору проб, що відповідає логіці нормування.

Таблиця 1 – Порівняння граничних показників викидів забруднюючих речовин для установок термічної обробки відходів (стандартизація: сухий газ; $O_2 = 11\%$)

Показник	ЄС (IED 2010/75/EU)	Україна (Наказ №856, 2025)
Пил (TSP/PM), мг/Нм ³	10	10
ТОС (загальний органічний вуглець), мг/Нм ³	10	10
HCl, мг/Нм ³	10	10
HF, мг/Нм ³	1	1
SO ₂ , мг/Нм ³	50	50
NO _x як NO ₂ , мг/Нм ³ (потужність > 6 т/год або нові установки)	200	200
NO _x як NO ₂ , мг/Нм ³ (потужність ≤ 6 т/год)	400	400
Діоксини + фурани, нг I-TEQ/Нм ³ (6–8 год відбір проб)	0,1	0,1
Cd + Tl (сумарно), мг/Нм ³ (30 хв–8 год відбір)	0,05	0,05
Hg, мг/Нм ³ (30 хв–8 год відбір)	0,05	0,05
Σ(Sb+As+Pb+Cr+Co+Cu+Mn+Ni+V), мг/Нм ³	0,5	0,5
CO, мг/Нм ³ (середньодобове значення)	50	—

Ця таблиця показує принципову річ для аргументації в статті: українські граничні значення для «класичних» маркерів атмосферного впливу на рівні інтегрованого контролю практично синхронізовані з вимогами IED для установок спалювання відходів (і за набором речовин, і за числовими рівнями, і за приведенням до 11% O_2 у сухих газах). Це дозволяє в тексті коректно підсилити тезу про екологічну доцільність газифікації через «керованість процесу + очищення газової фази» так: якщо газифікаційний комплекс проектується з повним контуром охолодження/очищення синтез-газу та стабільним допалюванням, то досягнення нормативів стає інженерно передбачуваним, оскільки контроль ведеться по тих самих реперних

показниках, що й для найжорсткіше регульованих термічних установок, а формування діоксинів/фуранів та кислих газів переноситься в режим, де їх простіше відсікати технологічно (температурно-часовий режим, швидке «quench»-охолодження, сорбційно-реагентне вилучення HCl/HF/SO₂, уловлювання пилу та металів у фільтрувальних ступенях).

Наведемо короткий приклад розрахунку “запасу по нормативу” для трьох контрольних показників, які найчастіше використовують як реперні для екологічної оцінки газифікаційних комплексів із допалюванням: пил, NO_x та SO₂. Для коректності порівняння приймаємо, що концентрації приведені до стандартних умов для сухих димових газів

за 11% O₂, а граничні значення (ELV) становлять для пилу 10 мг/Нм³, для NO_x (як NO₂) 200 мг/Нм³ та для SO₂ 50 мг/Нм³. Тоді сценарії 30%, 70% і 90% від ELV відповідають різним рівням технологічної “наближеності” до ліміту, а запас по нормативу зручно визначати як різницю між ELV і фактичною концентрацією: $\Delta = ELV - C$, де $C = k \cdot ELV$, $k = 0,30; 0,70; 0,90$.

Для кількісної оцінки екологічної надійності газифікаційних установок використано підхід визначення запасу щодо граничних значень викидів (ELV). Як базові прийнято нормативні концентрації забруднюючих речовин у димових газах, приведені до стандартних умов (сухий газ, 11 % O₂): для твердих

частинок (пилу) – 10 мг/Нм³, для оксидів азоту (NO_x у перерахунку на NO₂) – 200 мг/Нм³, для діоксиду сірки (SO₂) – 50 мг/Нм³. Оцінювання проведено для трьох сценаріїв експлуатації установки, що відповідають рівням 30 %, 70 % та 90 % від гранично допустимих значень.

Запас по нормативу визначали як різницю між граничним значенням і фактичною концентрацією забруднюючої речовини, що дозволяє оцінити ступінь екологічної стійкості процесу та чутливість системи до коливань режимів роботи.

Кількісна оцінка запасу щодо граничних значень викидів для основних забруднюючих речовин наведена в табл. 2.

Таблиця 2 – Кількісна оцінка запасу щодо граничних значень викидів (ELV)

Забруднююча речовина	ELV, мг/Нм ³	30 % ELV, мг/Нм ³	Запас, мг/Нм ³	70 % ELV, мг/Нм ³	Запас, мг/Нм ³	90 % ELV, мг/Нм ³ / запас
Пил	10	3	7	7	3	9 / 1
NO _x	200	60	140	140	60	180 / 20
SO ₂	50	15	35	35	15	45 / 5

Отримані результати свідчать, що за рівня викидів, що не перевищує 30 % від граничних значень, газифікаційна установка має значний технологічний резерв, який забезпечує високу екологічну стійкість і низьку чутливість до зміни експлуатаційних параметрів. Сценарій 70 % ELV характеризується зменшенням, але достатнім запасом по нормативу, що вимагає стабільного контролю процесу газоочищення та режимів горіння або допалювання. За умов наближення до 90 % ELV запас по нормативу стає мінімальним, що підвищує ризик

перевищення граничних значень у перехідних режимах роботи та потребує додаткових інженерних заходів з оптимізації процесу або підсилення систем очищення.

Графічно співвідношення між сценаріями 30 %, 70 % і 90 % ELV доцільно інтерпретувати як послідовне наближення фактичних концентрацій до нормативної межі, де зі зростанням частки від ELV зменшується екологічний запас і підвищуються вимоги до стабільності технологічного процесу.

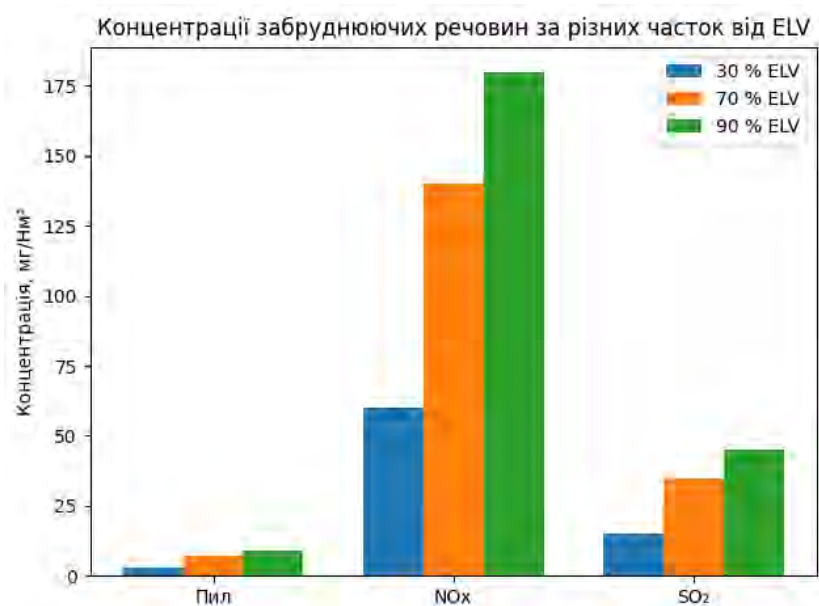


Рис. 1 – Концентрації забруднюючих речовин

На рис. 1 наведено порівняння концентрацій пилу, оксидів азоту та діоксиду сірки за сценаріїв експлуатації газифікаційної установки на рівні 30 %, 70 % і 90 % від гранично допустимих значень. Діаграма наочно демонструє зменшення запасу по нормативу зі зростанням частки від ELV, що підтверджує необхідність стабільного контролю режимів газоочищення при роботі в наближених до граничних умовах.

Порівняння газифікації з іншими термічними методами оброблення відходів, зокрема прямим спалюванням і піролізом, дозволяє комплексно оцінити її екологічні та технологічні переваги в контексті підвищення рівня екологічної безпеки. Пряме спалювання відходів ґрунтується на повному окисненні органічної складової за надлишку кисню, що супроводжується утворенням значних обсягів димових газів і потребує складних систем очищення для дотримання екологічних нормативів. Піроліз, у свою чергу, реалізується в безкисневому середовищі та орієнтований переважно на отримання рідких і твердих продуктів, проте характеризується підвищеною

чутливістю до морфологічного складу відходів і обмеженими можливостями стабільного енергетичного використання продуктів процесу без додаткових стадій обробки.

Газифікація займає проміжне, але технологічно більш гнучке положення між зазначеними методами, поєднуючи переваги контролюваного термохімічного перетворення з можливістю безперервного енергетичного використання газоподібних продуктів. Обмежений доступ окисника та відновне середовище дозволяють зменшити потенціал утворення токсичних органічних сполук у реакційній зоні, тоді як перенесення стадії окиснення за межі газифікатора створює передумови для більш ефективного контролю викидів. З екологічної точки зору це означає вищий рівень керованості процесу та прогнозованість досягнення нормативних показників порівняно з прямим спалюванням.

Для наочності відмінностей між термічними технологіями у статті доцільно використовувати порівняльну таблицю, яка узагальнює їх ключові характеристики з позицій екологічної безпеки та ресурсної ефективності

Таблиця 3 – Порівняльна характеристика термічних технологій оброблення відходів з позицій екологічної безпеки

Технологія	Середовище процесу	Основний продукт процесу	Потенціал утворення токсичних сполук	Керованість викидів забруднюючих речовин	Загальний рівень екологічної безпеки
Спалювання	Надлишок кисню	Теплова енергія, димові гази	Високий	Обмежена	Середній
Піроліз	Безкисневе середовище	Піролізна олія, твердий кокс	Середній	Середня	Середній
Газифікація	Обмежений доступ окисника	Синтез-газ	Нижчий	Висока	Підвищений

Узагальнення порівняльних характеристик показує, що газифікація забезпечує більш збалансоване поєднання екологічних та енергетичних параметрів, особливо в системах, орієнтованих на мінімізацію захоронення відходів і скорочення антропогенного навантаження на довкілля. На відміну від піролізу, де утилізація рідких і твердих продуктів може супроводжуватися додатковими екологічними ризиками, газифікація

дозволяє інтегрувати процес у єдину енергетичну схему з централізованим контролем викидів. Порівняно зі спалюванням, газифікаційні установки характеризуються меншою кількістю димових газів на одиницю обробленої маси відходів, що спрощує досягнення нормативних вимог. Порівняльні характеристики основних термохімічних технологій перероблення відходів наведено в табл. 4.



Рисунок 2 – Концентрації забруднюючих речовин за різних часток від граничних значень викидів (ELV)

Таблиця 4 – Порівняльна характеристика основних термохімічних технологій оброблення відходів

Параметр	Торрефікація	Піроліз	Газифікація	Спалювання (інсинерація)
Атмосфера процесу	Інертне середовище	Киснедефіцитне середовище	Обмежений доступ кисню	Надлишок кисню
Температурний діапазон	200–350 °C	300–1300 °C	800–1200 °C	750–1100 °C
Робочий тиск	Атмосферний	Близько 1 бар	1–45 бар	Близько 1 бар
Основні продукти процесу	Твердий вуглецевий залишок (char)	Твердий кокс + рідке паливо (смола) + синтез-газ	Синтез-газ (CO, H ₂ , CO ₂ , CH ₄ , легкі вуглеводні)	CO ₂ , H ₂ O та теплова енергія
Термохімічний характер	Ендотермічний	Ендотермічний	Екзотермічний	Екзотермічний
Швидкість нагріву	Низька	Повільна (≈10 °C/хв); швидка (до 600 °C/с)	Змінна (залежить від типу газифікатора)	Середня
Типи відходів	Харчові відходи, ПВХ-пластики, зношені шини, деревні залишки	Попередньо оброблені ТПВ (видалення скла, металів, інертних домішок)	Попередньо оброблені ТПВ (видалення скла, металів, інертних домішок)	Змішані тверді побутові відходи
Технологічні рішення	Оберткові барабани, шнекові реактори, багатоподові печі, реактори з рухомим шаром, стрічкові сушарки, мікрохвильові реактори	Оберткові печі, трубчасті реактори (промислові); реактори з фіксованим і псевдозрідженим шаром (лабораторні дослідження)	Газифікатори з потоком, псевдозрідженим шаром, циклонні та насадкові газифікатори	Печі з псевдозрідженим шаром, печі з киплячим шаром, решітчасті печі

Таким чином, порівняльний аналіз свідчить, що газифікація відходів має потенціал стати ключовою термохімічною технологією у сучасних системах управління відходами, поєднуючи високий ступінь екологічної безпеки з можливістю ефективної енергетичної та ресурсної утилізації продуктів процесу.

Висновок

Газифікація відходів є ефективною термохімічною технологією, здатною забезпечити підвищення рівня екологічної безпеки систем поводження з відходами за рахунок керованості процесів термічного перетворення органічної складової та

можливості цілеспрямованого контролю утворення забруднюючих речовин. Реалізація процесу в умовах високотемпературного часткового окиснення з обмеженим доступом окисника створює передумови для стабільного формування синтез-газу з прогнозованими фізико-хімічними характеристиками та ефективного очищення газової фази перед її енергетичним використанням. Порівняння екологічних показників газифікаційних установок із вимогами нормативів Європейського Союзу та України свідчить про можливість досягнення відповідності граничним рівням викидів пилу, оксидів азоту,

діоксиду сірки та стійких органічних забруднювачів за умови застосування сучасних систем газоочищення та оптимізації режимів роботи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для обґрунтування технічних і організаційних рішень під час проектування та впровадження газифікаційних комплексів у складі регіональних і локальних систем управління відходами, а також у процесах оцінювання впливу на довкілля та формування екологічних вимог до об'єктів термічної переробки. Встановлення технологічного запасу по ключових показниках викидів підвищує надійність експлуатації газифікаційних установок і знижує ризики перевищення нормативів у перехідних режимах роботи. Додатковою екологічною перевагою газифікації є суттєве скорочення обсягів захоронення відходів і можливість залучення твердих залишків до вторинного використання за умови дотримання екологічних вимог, що в сукупності сприяє зменшенню антропогенного навантаження на довкілля та підвищенню рівня екологічної безпеки території.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про управління відходами». Відомості Верховної Ради України. – 2022. – № 10. – Ст. 74.
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища». Відомості Верховної Ради України. – 1991. – № 41. – Ст. 546.
3. Національний план управління відходами до 2030 року. Затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.02.2019 № 117-р // Офіційний вісник України. – 2019. – № 22.
4. ДСТУ 4462.3.01:2006. Охорона природи. Поводження з відходами. Термічне оброблення відходів. Загальні вимоги. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 24 с.
5. ДБН В.2.5-75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування (у частині

поводження з осадами та відходами). – Київ : Мінрегіон України, 2013.

6. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 25.04.2025 № 856. Про затвердження Вимог до викидів забруднюючих речовин від установок спалювання та співспалювання відходів // Офіційний вісник України. – 2025.

7. Мальований Михайло Степанович, Шмандій Валерій Миколайович. Термічні методи переробки твердих побутових відходів у системі екологічної безпеки // *Екологічна безпека*. – 2017. – № 1(23). – С. 9–15.

8. Шмандій Валерій Миколайович, Харламова Олена Вікторівна, Мальований Михайло Степанович. Аналіз екологічних ризиків термічної утилізації відходів // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2018. – № 5(112). – С. 123–129.

9. Мальований Михайло Степанович, Харламова Олена Вікторівна. Сучасні підходи до управління відходами в Україні // *Екологічні науки*. – 2019. – № 2(25). – С. 18–25.

10. Білецький Володимир Степанович. Техногенно-екологічна безпека : монографія. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2014. – 312 с.

11. Кравченко Олександр Миколайович, Бондар Олександр Іванович. Управління відходами як чинник екологічної безпеки держави // *Екологічні науки*. – 2019. – № 4(27). – С. 88–95.

12. Markina Liudmyla Mykolaivna, Ushkats Svitlana Yuriiivna, Mihelev Ivan Leonidovych, Zholobenko Nataliia Yuriiivna. Determination of morphological composition of municipal solid waste for Mykolayiv city (Ukraine) and forecasting of their accumulation in the future // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2022. – № 6(1). – С. 87–94.

13. Markina Liudmyla Mykolaivna. Analysis of the world market of waste management // *Technologies of Advanced Materials and Products*. – 2024. – Vol. 5, Issue 2. – P. 34–48. DOI: 10.15587/2706-5448.2024.307321.
 15. European Parliament and Council. Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) // *Official Journal of the European Union*. – 2010. – L 334. – P. 17–119.
 16. Arena Umberto. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification: A review // *Waste Management*. – 2012. – Vol. 32, Issue 4. – P. 625–639. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.09.025.
 17. Higman Christopher, van der Burgt Maarten. *Gasification*. – 2nd ed. – Oxford : Elsevier, 2008. – 456 p.
-
-

УДК 544.344:620.193:661.52

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-11>

ДОСЛІДЖЕННЯ СИНЕРГЕТИЧНОГО ЕФЕКТУ ВІДНОВЛЕНОГО ОКСИДУ ГРАФЕНУ (RGO) ТА ЕВТЕКТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ НІТРАТУ АМОНІЮ ПРИ ТЕРМІЧНОМУ РОЗКЛАДІ

Грицуляк Г. М., Коцюбинський А. О.,
Лясковська М. Р., Линник Д. О., Калин Т. І.,
Медвідь М. М.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

У роботі детально досліджено особливості структурної взаємодії та прояв синергетичного ефекту в системі NH_4NO_3 –евтектика– rGO методом ATR-FTIR спектроскопії як інформативного інструменту аналізу локального іонного середовища та міжмолекулярних взаємодій. Проведено порівняльний аналіз чотирьох зразків: чистого нітрату амонію (AN), евтектичної системи на його основі (AN–Eut), композиції з відновленим оксидом графену (AN– rGO) та трикомпонентної системи (AN–Eut– rGO). Такий підхід дозволив простежити еволюцію спектральних характеристик при послідовному ускладненні структури системи та оцінити адитивність або неадитивність внесків окремих компонентів.

Спектр чистого AN характеризується типовими смугами валентних коливань $\nu(\text{N–H})$ амонійного катіона в області $3000\text{--}3200\text{ см}^{-1}$, асиметричних та симетричних валентних коливань $\nu_{\text{as}}(\text{NO}_3^-)$ та $\nu_{\text{s}}(\text{NO}_3^-)$ у діапазоні $1300\text{--}1500\text{ см}^{-1}$, а також деформаційних коливань $\delta(\text{NO}_3^-)$ і $\delta(\text{N–H})$ у нижчочастотній області. Положення та інтенсивність цих смуг відображають симетрію нітрат-іона,

ступінь його координації та характер водневих зв'язків у кристалічній ґратці. Введення евтектичної складової (AN–Eut) спричиняє помірні, але систематичні зсуви характеристичних смуг $\nu(\text{N–H})$, $\nu_{\text{as}}(\text{NO}_3^-)$, $\nu_{\text{s}}(\text{NO}_3^-)$ та $\delta(\text{NO}_3^-)$. Це свідчить про модифікацію локального іонного оточення, зниження симетрії нітрат-іона та перебудову мережі водневих зв'язків. Ймовірно, утворення евтектики супроводжується частковим послабленням міжіонних електростатичних взаємодій та формуванням нових типів асоціатів, що проявляється у зміні ширини та асиметрії спектральних смуг. Такі зміни можуть вказувати на зростання структурної неоднорідності та підвищення динамічності іонної підсистеми.

Отримані результати підтверджують формування багаторівневої системи взаємодій у композиції AN–Eut– rGO та демонструють, що структурна модифікація має кооперативний характер. Виявлений синергетичний ефект на молекулярному рівні може бути ключовим фактором, що визначає подальші зміни фізико-хімічних та термічних характеристик матеріалу,

зокрема особливості фазових переходів, стабільність кристалічної структури та характер термічного розкладу модифікованих нітратних композицій.

Ключові слова: нітрат амонію, евтектична система, відновлений оксид графену, ATR-FTIR, синергетичний ефект, міжіонні взаємодії.

STUDY OF THE SYNERGETIC EFFECT OF REDUCED GRAPHENE OXIDE (RGO) AND EUTECTIC SYSTEMS BASED ON AMMONIUM NITRATE DURING THERMAL DECOMPOSITION

Hrytsulyak G. M., Kotsyubynsky A. O.,
Liaskovska M. R., Lynnyk D. O.,
Kalyn T. I., Medvid M. M.,

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

In the work, the peculiarities of structural interaction and the manifestation of synergistic effect in the NH_4NO_3 –eutectic–rGO system were investigated in detail by the method of ATR-FTIR spectroscopy as an informative tool for the analysis of the local ionic environment and intermolecular interactions. A comparative analysis of four samples was carried out: pure ammonium nitrate (AN), a eutectic system based on it (AN–Eut), a composition with reduced graphene oxide (AN–rGO), and a three-component system (AN–Eut–rGO). This approach made it possible to trace the evolution of the spectral characteristics with successive complexity of the system structure and to assess the additivity or non-additivity of the contributions of individual components.

The spectrum of pure AN is characterized by typical bands of valence vibrations $\nu(\text{N–H})$ of the ammonium cation in the region $3000\text{--}3200\text{ cm}^{-1}$, asymmetric and symmetric valence vibrations $\nu_{as}(\text{NO}_3^-)$ and $\nu_s(\text{NO}_3^-)$ in the range $1300\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$, as well as deformation vibrations $\delta(\text{NO}_3^-)$ and $\delta(\text{N–H})$ in the low-frequency range. The position and intensity of these bands reflect the symmetry of the nitrate ion, the degree of its coordination, and the nature of hydrogen bonds in the crystal lattice.

The introduction of the eutectic component (AN–Eut) causes moderate but systematic shifts of the characteristic bands of $\nu(\text{N–H})$, $\nu_{as}(\text{NO}_3^-)$, $\nu_s(\text{NO}_3^-)$ and $\delta(\text{NO}_3^-)$. This indicates a modification of the

local ionic environment, a decrease in the symmetry of the nitrate ion, and a rearrangement of the network of hydrogen bonds. Probably, the formation of eutectics is accompanied by a partial weakening of interionic electrostatic interactions and the formation of new types of associates, which is manifested in a change in the width and asymmetry of the spectral bands. Such changes may indicate an increase in structural heterogeneity and an increase in the dynamics of the ionic subsystem.

The obtained results confirm the formation of a multi-level system of interactions in the AN–Eut–rGO composition and demonstrate that the structural modification has a cooperative nature. The identified synergistic effect at the molecular level can be a key factor determining further changes in the physical, chemical and thermal characteristics of the material, in particular, the features of phase transitions, the stability of the crystal structure, and the nature of the thermal decomposition of modified nitrate compositions.

Keywords: ammonium nitrate, eutectic system, reduced graphene oxide, ATR-FTIR, synergistic effect, interionic interactions.

Постановка проблеми. Нітрат амонію (NH_4NO_3) є однією з найбільш поширених азотвмісних сполук, що широко застосовується в агрохімії, енергетичних матеріалах та промислових процесах. Його термічна

поведінка характеризується складним багатостадійним механізмом розкладу, який суттєво залежить від кристалічної структури, фазових переходів, домішок та зовнішніх умов. Незважаючи на значний обсяг досліджень, питання контрольованої модифікації термодеструкції нітрату амонію залишається актуальним.

Сучасні підходи до регулювання термічних властивостей окиснювальних систем передбачають використання структуроутворюючих та нанорозмірних добавок. Зокрема, відновлений оксид графену (rGO) привертає увагу завдяки високій питомій поверхні, електронній структурі та здатності формувати міжфазні взаємодії. Паралельно, евтектичні системи на основі нітрату амонію можуть змінювати фазову поведінку та іонне оточення NO_3^- і NH_4^+ , що впливає на кінетику та механізм розкладу.

Однак у науковій літературі недостатньо досліджено можливий синергетичний ефект одночасного введення rGO та евтектичної матриці у систему NH_4NO_3 . Залишається відкритим питання: зміни термічної поведінки адитивними; чи виникає нелінійна (синергетична) взаємодія між наноструктурованою вуглецевою фазою та іонною евтектикою; які структурні зміни в системі можна зафіксувати спектроскопічними методами (ATR-FTIR).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних роботах, присвячених термічному розкладу нітрату амонію (NH_4NO_3), показано, що механізм деструкції є багатостадійним і чутливим до фазового стану, наявності домішок, вологості, а також до фізико-хімічного оточення іонів NH_4^+ та NO_3^- . Дослідники підкреслюють, що навіть незначні зміни мікроструктури або введення добавок можуть спричинити помітні зсуви температурних ефектів і зміну шляхів утворення проміжних продуктів. У цьому контексті широко

використовуються термоаналітичні методи (DSC/TGA) у поєднанні з інструментальними підходами для встановлення структурних і міжмолекулярних взаємодій, серед яких важливе місце займає FTIR-спектроскопія [1, 4].

Окремий напрям сучасних досліджень пов'язаний із модифікацією властивостей нітратних систем шляхом формування евтектичних композицій. Евтектичний підхід дає змогу змінювати фазову поведінку, температуру переходів, а також іонне середовище, що впливає на координацію NO_3^- та силу водневих зв'язків NH_4^+ . У літературі описано, що зміна іонного оточення в таких системах відображається у FTIR-спектрах як зсуви та зміна інтенсивності характерних смуг NO_3^- у зоні середніх хвильових чисел, а також трансформації у fingerprint-області. Водночас більшість публікацій фокусується або на термофізичних властивостях евтектик, або на загальних закономірностях розкладу, тоді як структурні прояви взаємодій у конкретних композиціях часто розглянуті обмежено [2, 4].

Паралельно активно розвивається напрям використання нанорозмірних вуглецевих матеріалів як функціональних модифікаторів для різних іонних/окиснювальних систем. Зокрема, відновлений оксид графену (rGO) досліджують завдяки високій питомій поверхні, можливості адсорбції іонних видів, наявності залишкових кисневмісних груп і здатності формувати міжфазні контакти. У публікаціях, присвячених композитам на основі графенових матеріалів, демонструється, що rGO може змінювати спектральні характеристики (посилення/послаблення смуг $-\text{OH}$, $\text{C}=\text{C}$, $\text{C}-\text{O}$, зсуви смуг солей/іонних асоціатів) і впливати на теплову поведінку сумішей через поверхневі взаємодії, теплопровідність та структуроутворення. Однак у більшості випадків аналіз зосереджений на

умов може трансформувати локальну проблему управління відходами у джерело комплексного екологічного навантаження.

Доведено доцільність розгляду термічної деструкції виключно як завершальної стадії оброблення залишкових потоків відходів після реалізації потенціалу матеріальної та біологічної переробки. Такий підхід забезпечує узгодженість із ієрархією поводження з відходами та мінімізує ризик технологічної конкуренції з пріоритетними методами циркулярної економіки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при формуванні державної та регіональної політики управління відходами, обґрунтуванні рішень у процедурах оцінки впливу на довкілля та розробленні програм сталого розвитку з урахуванням кліматичних цілей.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісну оцінку кліматичних та екологічних ефектів термічної деструкції з використанням повноцінного аналізу життєвого циклу для різних морфологічних складів відходів та регіональних умов, що дозволить підвищити обґрунтованість управлінських рішень у сфері поводження з відходами.

Література

1. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX // *Відомості Верховної Ради України*. – 2022.
2. Національний план управління відходами до 2030 року

: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.02.2019 № 117-р // *Офіційний вісник України*. – 2019.

3. Національна економічна стратегія на період до 2030 року : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 № 179 // *Урядовий кур'єр*. – 2021.

4. Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року : затв. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.10.2021 № 1363-р // *Офіційний вісник України*. – 2021.

5. Бондар О. І., Шевченко Р. І. Управління відходами в Україні в контексті переходу до циркулярної економіки // *Екологічні науки*. – 2019. – № 2. – С. 5–12.

6. Кравченко О. В., Ляшенко О. А. Екологічні аспекти термічних методів поводження з відходами // *Вісник екологічної безпеки та збалансованого природокористування*. – 2020. – № 1. – С. 41–48.

7. Мельник Л. Г., Дегтярьова І. Б. Циркулярна економіка як інструмент сталого розвитку: екологічні обмеження та перспективи // *Економіка природокористування і охорони довкілля*. – 2018. – № 4. – С. 3–11.

8. Сахно С. М., Коваленко В. О. Оцінка впливу технологій знешкодження відходів на довкілля // *Екологічні науки*. – 2021. – № 4. – С. 77–85.

9. Хвесик М. А., Бистряков І. К. Кліматична політика та екологічна трансформація економіки України // *Економіка України*. – 2020. – № 10. – С. 23–34.

10. Про затвердження Методичних рекомендацій з оцінки впливу на довкілля : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 08.09.2021 № 590. – Київ, 2021.

11. Жукова В. М., Поліщук А. О. Аналіз екологічних ризиків при застосуванні термічних технологій у сфері поводження з відходами // *Наукові праці Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Екологія.* – 2022. – № 322. – С. 112–120.

12. Директива 2008/98/ЄС про відходи (у редакції зі змінами) : переклад укр. мовою // *Офіційний сайт Європейського Союзу.* – Актуаліз. версія, 2018.

13. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions // *Resources, Conservation and Recycling.* – 2017. – Vol. 127. – P. 221–232.

14. Astrup T. F., Tonini D., Turconi R., Boldrin A. Life cycle assessment of thermal waste treatment technologies: A systematic review // *Waste Management.* – 2018. – Vol. 76. – P. 203–215.

15. European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2019. Union, 2019.

УДК 504.064:628.4:502.131.1

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-12>

ТЕРМІЧНА ДЕСТРУКЦІЯ ВІДХОДІВ У СИСТЕМІ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ ТА КЛІМАТИЧНОЇ ПОЛІТИКИ

Власенко Олег, Коваленко Даниїл, Ковтунов Олександр
Державна екологічна академія післядипломної освіти та менеджменту,
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, Київ

Анотація

У статті розглянуто термічну деструкцію відходів у контексті реалізації принципів циркулярної економіки та кліматичної політики як одного з найбільш дискусійних інструментів сучасної системи управління відходами. Актуальність дослідження зумовлена зростанням обсягів утворення відходів, обмеженими можливостями їх екологічно безпечного захоронення, а також необхідністю скорочення викидів парникових газів відповідно до національних і міжнародних кліматичних зобов'язань. У цьому контексті термічна деструкція розглядається не як універсальне рішення, а як елемент інтегрованої системи поводження з відходами, застосування якого потребує науково обґрунтованих екологічних та кліматичних критеріїв.

Метою статті є аналіз ролі термічної деструкції відходів у системі циркулярної економіки та кліматичної політики з урахуванням її екологічних переваг, обмежень і потенційних ризиків. У процесі дослідження використано методи аналізу та узагальнення наукових джерел, нормативно-правового аналізу, системного та ризик-

орієнтованого підходів, а також елементи аналізу життєвого циклу для оцінювання екологічної та кліматичної ефективності термічної деструкції.

У роботі обґрунтовано, що термічна деструкція може сприяти зменшенню обсягів захоронення відходів і стабілізації небезпечних компонентів, проте її відповідність принципам циркулярної економіки та кліматичної нейтральності є обмеженою і залежить від технологічних рішень, ефективності систем очищення та дотримання принципів найкращих доступних технологій (ВАТ) [15]. Показано, що екологічна та кліматична доцільність застосування термічної деструкції визначається співвідношенням між досягнутим екологічним ефектом і залишковими ризиками. Отримані результати можуть бути використані при розробленні політик управління відходами, підготовці матеріалів оцінки впливу на довкілля та формуванні регіональних програм сталого розвитку.

Ключові слова: термічна деструкція відходів; циркулярна економіка; кліматична політика; управління відходами; екологічна безпека; парникові гази; ВАТ.

Abstract

The article examines thermal waste destruction within the framework of circular economy principles and climate policy, considering it as one of the most controversial instruments in modern waste management systems. The relevance of the study is driven by the continuous growth of waste generation, limited capacities for environmentally safe landfilling, and the need to reduce greenhouse gas emissions in line with national and international climate commitments. In this context, thermal destruction is not treated as a universal solution but as a component of an integrated waste management system whose application requires scientifically substantiated environmental and climate-related criteria.

The purpose of the article is to analyze the role of thermal waste destruction in the system of circular economy and climate policy, taking into account its environmental benefits, limitations, and potential risks. The research methodology is based on the analysis and synthesis of scientific literature, regulatory and legal analysis, systemic and risk-oriented approaches, as well as elements of life cycle assessment to evaluate the environmental and climate efficiency of thermal destruction technologies.

The study substantiates that thermal waste destruction can contribute to reducing landfill disposal volumes and stabilizing hazardous components; however, its compliance with circular economy principles and climate neutrality remains limited and

highly dependent on technological solutions, the efficiency of emission control systems, and adherence to Best Available Techniques (BAT). It is demonstrated that the environmental and climate feasibility of thermal destruction is determined by the balance between the achieved environmental benefits and the residual ecological and climate risks. The results obtained can be applied in the development of waste management policies, preparation of environmental impact assessment documentation, and the design of regional strategies for sustainable development.

Ключові слова: thermal destruction of waste; circular economy; climate policy; waste management; environmental safety; greenhouse gases; BAT.

Вступ

Сучасний етап соціально-економічного розвитку характеризується одночасним зростанням обсягів утворення відходів та посиленням екологічних і кліматичних обмежень, що формує нові виклики для системи управління відходами. Лінійна модель економіки, заснована на принципах «виробництво – споживання – захоронення», виявила свою екологічну та ресурсну неспроможність, що зумовило перехід до концепції циркулярної економіки як домінуючої парадигми сталого розвитку [7, 13]. У межах цієї концепції управління відходами розглядається не лише як проблема знешкодження, а як інструмент збереження ресурсів, зниження техногенного навантаження та

мінімізації негативного впливу на довкілля.

Паралельно з трансформацією економічних моделей зростає роль кліматичної політики, спрямованої на скорочення викидів парникових газів і досягнення кліматичної нейтральності. Сектор поводження з відходами є важливою складовою національних і міжнародних кліматичних стратегій, оскільки процеси захоронення, оброблення та перероблення відходів безпосередньо пов'язані з утворенням метану, діоксиду вуглецю та інших кліматично активних газів. У цьому контексті вибір технологій поводження з відходами набуває не лише екологічного, але й кліматичного значення [4, 9].

Термічна деструкція відходів займає особливе місце в сучасних системах управління відходами. З одного боку, вона дозволяє суттєво зменшити обсяги захоронення, стабілізувати небезпечні компоненти та обмежити довгострокові екологічні ризики. З іншого боку, застосування термічних технологій супроводжується утворенням атмосферних викидів, твердих залишків і споживанням енергетичних ресурсів, що викликає дискусії щодо її відповідності принципам циркулярної економіки та цілям кліматичної політики. Таким чином, термічна деструкція не може розглядатися як універсальне рішення, а потребує науково обґрунтованої оцінки її екологічної та кліматичної доцільності.

Аналіз наукових досліджень свідчить, що більшість робіт зосереджена на технологічних і енергетичних аспектах термічної деструкції, тоді як її роль у системі циркулярної економіки та взаємодія з кліматичною політикою часто розглядаються фрагментарно. Водночас відсутність комплексного підходу до оцінювання екологічної та кліматичної ефективності термічної деструкції ускладнює формування обґрунтованих управлінських рішень і екологічної політики у сфері поводження з відходами.

Метою цієї статті є науковий аналіз термічної деструкції відходів у системі циркулярної економіки та кліматичної політики з урахуванням її екологічних переваг, обмежень і потенційних ризиків. Об'єктом дослідження є процеси термічної деструкції відходів у сучасних системах управління відходами, а предметом — екологічні та кліматичні аспекти їх застосування. У роботі використано методи аналізу та узагальнення наукових джерел, нормативно-правового аналізу, системного та ризик-орієнтованого підходів, а також елементи аналізу життєвого циклу для оцінювання екологічної й кліматичної ефективності термічної деструкції [14].

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному розгляді термічної деструкції відходів як складової циркулярної економіки з одночасним урахуванням вимог кліматичної політики та принципів найкращих доступних технологій. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх

використання при формуванні державної та регіональної політики управління відходами, підготовці матеріалів оцінки впливу на довкілля та обґрунтуванні екологічно допустимих технологічних рішень.

Теоретичні та методологічні засади дослідження

Формування наукових підходів до оцінювання ролі термічної деструкції відходів у системі циркулярної економіки та кліматичної політики потребує поєднання концептуальних, нормативних і прикладних методів дослідження. Такий підхід зумовлений міждисциплінарним характером проблеми, що охоплює екологічну економіку, кліматичну політику, технології поводження з відходами та екологічну безпеку.

У сучасних наукових дослідженнях циркулярна економіка розглядається як системна модель, спрямована на зменшення первинного ресурсоспоживання, мінімізацію утворення відходів і збереження вартості матеріалів упродовж максимально тривалого життєвого циклу. У межах цієї концепції технології поводження з відходами оцінюються не лише за ефективністю знешкодження, а й за здатністю сприяти замиканню матеріальних і енергетичних потоків. Термічна деструкція в такому контексті розглядається як допоміжний інструмент, призначений для оброблення залишкових потоків відходів, які не можуть бути залучені до матеріальної переробки без

створення додаткових екологічних ризиків.

Кліматична політика, у свою чергу, формує додаткові критерії оцінки технологій поводження з відходами, зосереджуючись на скороченні викидів парникових газів і досягненні кліматичної нейтральності. Екологічні інструменти реалізації кліматичної політики, зокрема регулювання промислових викидів, запровадження принципів найкращих доступних технологій та оцінка впливу на довкілля, безпосередньо впливають на допустимість і масштаби застосування термічної деструкції. У цьому контексті технології термічної обробки відходів мають оцінюватися з урахуванням як екологічних, так і кліматичних наслідків, включно з прямими та непрямыми викидами парникових газів.

У сучасних наукових концепціях термічна деструкція відходів трактується неоднозначно. З одного боку, вона визнається ефективним способом зменшення обсягів захоронення та стабілізації небезпечних компонентів. З іншого боку, її обмежена відповідність принципам циркулярної економіки та потенційний кліматичний вплив зумовлюють необхідність чіткого наукового обґрунтування умов її застосування. Це вимагає використання методології, здатної інтегрувати екологічні, кліматичні та нормативні аспекти в єдину систему аналізу.

Методологічну основу дослідження становить поєднання якісних і аналітичних методів, що

дозволяє комплексно оцінити роль термічної деструкції відходів у сучасних системах управління відходами. Основні методи

дослідження, їх призначення та наукова функція узагальнені в таблиці

Таблиця 1 – Методи дослідження та їх наукове призначення

Метод дослідження	Сутність методу	Наукове призначення у дослідженні
Аналіз наукових джерел	Опрацювання фахових публікацій і монографій	Формування теоретичної бази та визначення наукових підходів
Нормативно-правовий аналіз	Аналіз законодавства та регуляторних документів	Оцінка відповідності термічної деструкції екологічним і кліматичним вимогам
Системний підхід	Розгляд технології як елемента цілісної системи	Визначення ролі термічної деструкції в управлінні відходами
Ризик-орієнтований підхід	Ідентифікація та оцінка екологічних ризиків	Обґрунтування екологічної допустимості застосування
Елементи аналізу життєвого циклу (LCA)	Оцінка впливів на різних етапах життєвого циклу	Порівняння кліматичних та екологічних ефектів альтернативних рішень
Порівняльний аналіз	Зіставлення різних методів поводження з відходами	Виявлення переваг і обмежень термічної деструкції

Узагальнення результатів, отриманих із використанням зазначених методів, здійснюється в межах інтегрованої методологічної схеми дослідження. Вона передбачає послідовний перехід від аналізу теоретичних концепцій циркулярної економіки та кліматичної політики до оцінювання екологічної й кліматичної ефективності термічної деструкції та формування науково обґрунтованих висновків щодо умов її застосування.

Методологічна схема дослідження включає такі етапи: аналіз характеристик відходів → оцінку нормативних та

кліматичних обмежень → вибір підходів до термічної деструкції → оцінювання екологічних і кліматичних ризиків → інтеграцію результатів та формування рекомендацій.

Подальший аналіз ролі термічної деструкції у системі циркулярної економіки доцільно здійснювати через оцінку її потенціалу щодо скорочення обсягів захоронення відходів. Захоронення залишається найбільш проблемним способом поводження з відходами з точки зору екологічної безпеки та кліматичної політики, оскільки супроводжується довготривалим негативним

впливом на ґрунти, водні об'єкти та атмосферне повітря, а також утворенням значних обсягів метану. У цьому контексті скорочення потоків відходів, що спрямовуються на полігони, є одним із ключових завдань сучасних систем управління відходами.

Термічна деструкція забезпечує істотне зменшення маси та об'єму відходів, що підлягають остаточному видаленню. За результатами узагальнення наукових досліджень, редукція об'єму відходів у процесі термічної обробки може досягати 70–90 %, що дозволяє значно знизити навантаження на полігонну інфраструктуру та подовжити строк її експлуатації. Особливо важливим є застосування термічної деструкції для відходів з високим рівнем небезпеки або складним морфологічним складом, для яких матеріальна переробка є технічно неможливою або економічно необґрунтованою.

Зменшення обсягів захоронення шляхом термічної деструкції має також непрямий кліматичний ефект, пов'язаний із запобіганням утворенню метану на полігонах. Біорозкладні компоненти відходів, що за умов захоронення стають джерелом парникових газів, у процесі термічної обробки зазнають необоротної трансформації, що дозволяє усунути один із ключових кліматичних ризиків сектору відходів. Водночас такий ефект не є автоматичним і залежить від структури відходів, технологічних параметрів процесу та ефективності екологічного контролю.

Разом з тим потенціал термічної деструкції щодо зменшення захоронення не слід розглядати ізольовано від загальної логіки циркулярної економіки. Надмірне орієнтування на термічні технології може створювати конкуренцію матеріальній і біологічній переробці та знижувати стимули до впровадження заходів із запобігання утворенню відходів. Тому екологічно обґрунтоване застосування термічної деструкції передбачає її використання виключно для залишкових потоків відходів після реалізації пріоритетних заходів циркулярної економіки.

Подальший аналіз ролі термічної деструкції у системі циркулярної економіки доцільно здійснювати через оцінку її потенціалу щодо скорочення обсягів захоронення відходів. Захоронення залишається найбільш проблемним способом поводження з відходами з точки зору екологічної безпеки та кліматичної політики, оскільки супроводжується довготривалим негативним впливом на ґрунти, водні об'єкти та атмосферне повітря, а також утворенням значних обсягів метану. У цьому контексті скорочення потоків відходів, що спрямовуються на полігони, є одним із ключових завдань сучасних систем управління відходами.

Термічна деструкція забезпечує істотне зменшення маси та об'єму відходів, що підлягають остаточному видаленню. За результатами узагальнення наукових досліджень, редукція об'єму відходів у процесі термічної

обробки може досягати 70–90 %, що дозволяє значно знизити навантаження на полігонну інфраструктуру та подовжити строк її експлуатації. Особливо важливим є застосування термічної деструкції для відходів з високим рівнем небезпеки або складним морфологічним складом, для яких матеріальна переробка є технічно неможливою або економічно необґрунтованою.

Зменшення обсягів захоронення шляхом термічної деструкції має також непрямий кліматичний ефект, пов'язаний із запобіганням утворенню метану на полігонах. Біорозкладні компоненти відходів, що за умов захоронення стають джерелом парникових газів, у процесі термічної обробки зазнають необоротної трансформації, що дозволяє усунути один із ключових кліматичних ризиків сектору відходів. Водночас такий ефект не є автоматичним і залежить від структури відходів, технологічних параметрів процесу та ефективності екологічного контролю.

Разом з тим потенціал термічної деструкції щодо зменшення захоронення не слід розглядати ізольовано від загальної логіки циркулярної економіки. Надмірне орієнтування на термічні технології може створювати конкуренцію матеріальній і біологічній переробці та знижувати стимули до впровадження заходів із запобігання утворенню відходів. Тому екологічно обґрунтоване застосування термічної деструкції передбачає її використання виключно для залишкових потоків

відходів після реалізації пріоритетних заходів циркулярної економіки.

Межі відповідності термічної деструкції принципам циркулярної економіки визначаються передусім характером трансформації матеріальних потоків у процесі високотемпературної обробки. На відміну від матеріальної та біологічної переробки, які спрямовані на збереження або відновлення функціональної цінності матеріалів, термічна деструкція передбачає необоротне руйнування органічної складової відходів. Це обумовлює її обмежену здатність до замикання матеріальних циклів у класичному розумінні циркулярної економіки.

З позицій ключових принципів циркулярності термічна деструкція не сприяє запобігання утворенню відходів і лише опосередковано пов'язана з повторним використанням ресурсів. Її екологічна доцільність полягає не у відновленні матеріальної вартості, а у мінімізації негативних наслідків поводження з відходами, які не можуть бути залучені до пріоритетних циклів переробки. Таким чином, термічна деструкція функціонує як інструмент управління залишковими потоками, а не як повноцінний елемент циркулярного виробничо-споживчого циклу.

Водночас повна невідповідність термічної деструкції принципам циркулярної економіки також є спрощеним трактуванням. Часткове повернення ресурсної цінності можливе за рахунок використання мінеральної

фракції твердих залишків, а також через енергетичний ефект у разі заміщення первинних енергоносіїв. Однак ці аспекти мають допоміжний характер і не можуть компенсувати втрату матеріальної цінності органічної складової відходів.

Оцінка відповідності термічної деструкції принципам

Таблиця 2 – Відповідність термічної деструкції ключовим принципам циркулярної економіки

Принцип циркулярної економіки	Зміст принципу	Роль термічної деструкції	Оцінка відповідності
Запобігання утворенню відходів	Мінімізація утворення відходів на джерелі	Не впливає на стадію утворення	Відсутня
Повторне використання	Збереження функціональної цінності продукції	Не забезпечується	Відсутня
Матеріальна переробка	Повернення матеріалів у виробничі цикли	Обмежена (мікральні залишки)	Низька
Біологічна переробка	Відновлення біогенних компонентів	Неможлива	Відсутня
Скорочення захоронення	Мінімізація потоків на полігони	Забезпечується	Висока
Зниження екологічних ризиків	Обмеження довгострокового впливу	Забезпечується	Висока
Ресурсна ефективність	Збереження матеріальної вартості	Частково (енергетичний ефект)	Обмежена

Отже, межі відповідності термічної деструкції принципам циркулярної економіки полягають у неможливості повноцінного замикання матеріальних циклів та відновлення ресурсної цінності відходів. Її застосування є виправданим лише у випадках, коли вичерпано потенціал запобігання

циркулярної економіки потребує диференційованого підходу, що враховує стадію ієрархії поводження з відходами, тип відходів та наявність альтернативних методів переробки. Узагальнення такої оцінки наведено в таблиці.

утворенню відходів, повторного використання та матеріальної або біологічної переробки. У такому форматі термічна деструкція виступає як інструмент екологічної стабілізації системи управління відходами, а не як базовий механізм циркулярної економіки.

Межі відповідності термічної деструкції принципам циркулярної економіки визначаються передусім характером трансформації матеріальних потоків у процесі високотемпературної обробки. На відміну від матеріальної та біологічної переробки, які спрямовані на збереження або відновлення функціональної цінності матеріалів, термічна деструкція передбачає необоротне руйнування органічної складової відходів. Це обумовлює її обмежену здатність до замикання матеріальних циклів у класичному розумінні циркулярної економіки.

З позицій ключових принципів циркулярності термічна деструкція не сприяє запобіганню утворенню відходів і лише опосередковано пов'язана з повторним використанням ресурсів. Її екологічна доцільність полягає не у відновленні матеріальної вартості, а у мінімізації негативних наслідків поводження з відходами, які не можуть бути залучені до пріоритетних циклів переробки. Таким чином, термічна деструкція функціонує як інструмент

управління залишковими потоками, а не як повноцінний елемент циркулярного виробничо-споживчого циклу.

Водночас повна невідповідність термічної деструкції принципам циркулярної економіки також є спрощеним трактуванням. Часткове повернення ресурсної цінності можливе за рахунок використання мінеральної фракції твердих залишків, а також через енергетичний ефект у разі заміщення первинних енергоносіїв. Однак ці аспекти мають допоміжний характер і не можуть компенсувати втрату матеріальної цінності органічної складової відходів.

Оцінка відповідності термічної деструкції принципам циркулярної економіки потребує диференційованого підходу, що враховує стадію ієрархії поводження з відходами, тип відходів та наявність альтернативних методів переробки. Узагальнення такої оцінки наведено в таблиці.



Рисунок 1 – Взаємодія термічної деструкції з матеріальною та біологічною переробкою в системі циркулярної економіки.

Термічна деструкція відходів у контексті кліматичної політики

Кліматична політика є одним із ключових чинників, що визначають сучасні підходи до управління відходами, оскільки сектор поводження з відходами робить суттєвий внесок у формування викидів парникових газів. Основними джерелами кліматичного впливу у цьому секторі є захоронення біорозкладних відходів, утворення метану на полігонах, а також викиди діоксиду вуглецю під час термічної обробки. У цьому контексті оцінка ролі термічної деструкції потребує зіставлення її кліматичних ефектів з альтернативними методами поводження з відходами.

З позицій кліматичної політики Європейського Союзу та України пріоритет надається таким рішенням, які забезпечують скорочення сукупних викидів

парникових газів упродовж усього життєвого циклу відходів. Захоронення відходів, особливо з високим вмістом органічної фракції, розглядається як кліматично несприятливий варіант через довготривале утворення метану, що має значно вищий потенціал глобального потепління порівняно з діоксидом вуглецю. У цьому аспекті термічна деструкція може виконувати компенсуючу функцію, зменшуючи потоки відходів, які спрямовуються на полігони, та обмежуючи утворення метану.

Водночас термічна деструкція супроводжується прямими викидами діоксиду вуглецю, походження яких залежить від складу відходів. Біогенний вуглець, що утворюється під час спалювання органічних компонентів, у кліматичній політиці зазвичай розглядається окремо від викидів викопного походження, пов'язаних

зі спалюванням пластиків та інших синтетичних матеріалів. Це зумовлює необхідність диференційованого підходу до оцінки кліматичного впливу термічної деструкції з урахуванням морфологічного складу відходів.

Застосування елементів аналізу життєвого циклу дозволяє комплексно оцінити кліматичну ефективність термічної деструкції шляхом урахування як прямих, так і непрямих викидів парникових газів. До непрямих ефектів належать скорочення викидів унаслідок зменшення захоронення, заміщення первинних енергоносіїв та зниження екологічних ризиків, пов'язаних із довготривалим зберіганням відходів. Саме співвідношення між цими ефектами визначає кліматичну доцільність використання термічної деструкції в конкретних умовах.

З точки зору реалізації кліматичної політики термічна деструкція може розглядатися як перехідний інструмент у процесі трансформації системи управління відходами. Її застосування є виправданим у випадках, коли вона сприяє скороченню сукупних викидів парникових газів порівняно з базовим сценарієм захоронення та не створює перешкод для розвитку матеріальної й біологічної переробки. У протилежному разі надмірне використання термічних технологій може вступати в суперечність із довгостроковими цілями кліматичної нейтральності та циркулярної економіки.

Таким чином, у контексті кліматичної політики термічна деструкція відходів повинна

оцінюватися як інструмент із обмеженою, але потенційно важливою роллю. Її ефективність визначається не абсолютним рівнем викидів, а здатністю зменшувати сумарний кліматичний вплив системи поводження з відходами за умови дотримання екологічних стандартів і принципів найкращих доступних технологій.

Екологічні ризики та обмеження термічної деструкції відходів

Застосування технологій термічної деструкції відходів супроводжується формуванням комплексу екологічних ризиків, що зумовлює необхідність їх системного аналізу та врахування при прийнятті управлінських і технологічних рішень. На відміну від матеріальної та біологічної переробки, які орієнтовані на відновлення ресурсної цінності, термічна деструкція передбачає глибоку трансформацію відходів, унаслідок чого основний екологічний ефект досягається за рахунок зменшення обсягів і стабілізації небезпечних компонентів. Водночас саме характер цієї трансформації зумовлює появу специфічних ризиків для окремих компонентів довкілля.

Найбільш значущими є ризики, пов'язані з викидами забруднюючих речовин в атмосферне повітря. У процесі термічної обробки можуть утворюватися оксиди азоту, сірки, тверді частинки, а за певних умов — діоксини та фурани [6, 11]. Рівень таких викидів істотно залежить від морфологічного складу відходів,

температурного режиму, тривалості перебування в реакційній зоні та ефективності систем очищення димових газів. Порушення технологічних параметрів або недостатній екологічний контроль здатні призвести до локального або регіонального погіршення якості атмосферного повітря.

Окрему групу екологічних ризиків становить утворення твердих залишків у вигляді золи та шлаків. Хімічний склад цих залишків визначається складом вихідних відходів і може включати важкі метали та інші токсичні компоненти. За відсутності належної стабілізації та контролю поводження з такими матеріалами виникає ризик вторинного забруднення ґрунтів і водних об'єктів, що обмежує можливості їх подальшого використання в господарській діяльності.

Водні екосистеми можуть зазнавати опосередкованого впливу термічної деструкції внаслідок утворення стічних вод, що формуються під час очищення газів або з технологічних майданчиків. За

неналежного очищення такі стоки можуть містити розчинені забруднювачі, що створює ризики для поверхневих і підземних вод. Крім того, розміщення об'єктів термічної деструкції без урахування територіальних та гідрогеологічних умов може посилювати екологічну вразливість прилеглих територій.

Екологічні обмеження застосування термічної деструкції пов'язані також із соціально-екологічними чинниками, зокрема сприйняттям таких об'єктів місцевими громадами та необхідністю дотримання принципів превентивності й прозорості екологічних рішень. У цьому аспекті екологічні ризики виходять за межі суто технологічних і потребують урахування в процесі стратегічного планування систем управління відходами.

Систематизація основних екологічних ризиків та відповідних обмежень наведена в таблиці, що дозволяє узагальнити характер впливів і визначити напрями їх мінімізації.

Таблиця 3 – Основні екологічні ризики термічної деструкції відходів

Компонент довкілля	Джерело ризику	Потенційний вплив	Характер обмеження
Атмосферне повітря	Викиди продуктів згоряння	Погіршення якості повітря	Необхідність багатоступеневої газоочистки
Ґрунти	Осідання золи та пилу	Акумуляція токсичних речовин	Обмеження використання територій
Поверхневі води	Стічні води з установок	Вторинне забруднення	Вимоги до очищення стоків
Підземні води	Неналежне поводження з залишками	Інфільтрація забруднювачів	Контроль захоронення золи

Компонент довкілля	Джерело ризику	Потенційний вплив	Характер обмеження
Біота	Комплексний вплив	Порушення екосистем	Територіальні обмеження
Населення	Локальні викиди та шум	Соціально-екологічні ризики	Необхідність громадського контролю

Для комплексного розуміння екологічних наслідків доцільно розглядати формування впливів термічної деструкції як послідовний процес, що охоплює всі етапи

поводження з відходами — від їх підготовки до остаточного розміщення залишків. Узагальнена схема формування екологічних впливів наведена нижче.

Схема формування екологічних впливів термічної деструкції відходів



Рисунок 2 – Формування екологічних впливів термічної деструкції відходів.

Таким чином, екологічні ризики та обмеження термічної деструкції відходів мають багатокомпонентний характер і потребують інтегрованого підходу до управління. Екологічна допустимість застосування термічних технологій визначається рівнем контролю викидів, поводженням з твердими залишками та відповідністю принципам найкращих доступних технологій, що дозволяє знизити

негативний вплив до прийнятного рівня.

Узагальнення екологічних вигод, обмежень та умов екологічно допустимого застосування термічної деструкції відходів наведено в інтегральній таблиці.

Узагальнення екологічних вигод, обмежень та умов екологічно допустимого застосування термічної деструкції відходів наведено в інтегральній таблиці

Таблиця 3 – Екологічні вигоди, обмеження та умови застосування термічної деструкції відходів

Екологічний аспект	Екологічні вигоди	Основні обмеження	Умови екологічно допустимого застосування
Скорочення обсягів захоронення	Значне зменшення маси та об'єму відходів, зниження навантаження на полігони	Неможливість повного усунення залишкових фракцій	Застосування виключно до залишкових потоків після переробки
Зниження довгострокових екологічних ризиків	Стабілізація небезпечних компонентів, обмеження інфільтрації забруднювачів	Утворення золи та шлаків з потенційною токсичністю	Контроль складу залишків, стабілізація перед розміщенням
Вплив на атмосферне повітря	Скорочення викидів метану порівняно із захороненням	Викиди NO _x , SO ₂ , пилу, можливе утворення діоксинів	Багатоступенева газоочистка, дотримання ВАТ
Кліматичний ефект	Потенційне зменшення сумарних викидів ПГ у системі управління відходами	Викиди CO ₂ , особливо викопного походження	Оцінка повного життєвого циклу, мінімізація викопної фракції
Ресурсна ефективність	Часткове використання мінеральної фракції залишків	Втрата органічної матеріальної цінності	Вилучення придатних до переробки фракцій до термічної обробки

Екологічний аспект	Екологічні вигоди	Основні обмеження	Умови екологічно допустимого застосування
Взаємодія з циркулярною економікою	Доповнення матеріальної та біологічної переробки	Обмежена відповідність принципам циркулярності	Чітке позиціонування як завершальної стадії
Територіальні та соціальні аспекти	Централізація оброблення складних відходів	Соціальне неприйняття, локальні екологічні ризики	Прозорі процедури ОВД, громадський контроль
Нормативна відповідність	Можливість регульованого впровадження	Високі регуляторні вимоги	Повна відповідність законодавству та БАТ

Висновки

Проведене дослідження дозволило комплексно оцінити роль термічної деструкції відходів у системі циркулярної економіки та кліматичної політики з урахуванням екологічних вигод, обмежень і умов екологічно допустимого застосування. Отримані результати свідчать, що термічна деструкція не може розглядатися як універсальний або пріоритетний інструмент циркулярної економіки, однак за певних умов вона є важливим елементом сучасних систем управління відходами.

Встановлено, що основним екологічним ефектом термічної деструкції є суттєве скорочення обсягів захоронення та стабілізація небезпечних компонентів відходів, що дозволяє зменшити довгострокові екологічні ризики для ґрунтів, водних об'єктів та атмосферного повітря. Водночас необоротний характер матеріальних трансформацій

обмежує її відповідність принципам циркулярної економіки, зокрема щодо збереження ресурсної цінності органічної складової відходів.

Показано, що кліматична доцільність застосування термічної деструкції є умовною і залежить від порівняння з альтернативними сценаріями поводження з відходами, насамперед із захороненням. Потенційні кліматичні вигоди можуть бути досягнуті за рахунок запобігання утворенню метану, однак вони нівелюються за відсутності ефективних систем очищення викидів і належного врахування частки викопного вуглецю у складі відходів.

Обґрунтовано, що екологічна допустимість термічної деструкції визначається рівнем контролю атмосферних викидів, поводженням з твердими залишками та відповідністю принципам найкращих доступних технологій. Недотримання цих

умов може трансформувати локальну проблему управління відходами у джерело комплексного екологічного навантаження.

Доведено доцільність розгляду термічної деструкції виключно як завершальної стадії оброблення залишкових потоків відходів після реалізації потенціалу матеріальної та біологічної переробки. Такий підхід забезпечує узгодженість із ієрархією поводження з відходами та мінімізує ризик технологічної конкуренції з пріоритетними методами циркулярної економіки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при формуванні державної та регіональної політики управління відходами, обґрунтуванні рішень у процедурах оцінки впливу на довкілля та розробленні програм сталого розвитку з урахуванням кліматичних цілей.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісну оцінку кліматичних та екологічних ефектів термічної деструкції з використанням повноцінного аналізу життєвого циклу для різних морфологічних складів відходів та регіональних умов, що дозволить підвищити обґрунтованість управлінських рішень у сфері поводження з відходами.

Література

1. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX // *Відомості Верховної Ради України*. – 2022.
2. Національний план управління відходами до 2030 року

: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.02.2019 № 117-р // *Офіційний вісник України*. – 2019.

3. Національна економічна стратегія на період до 2030 року : затв. постановою Кабінету Міністрів України від 03.03.2021 № 179 // *Урядовий кур'єр*. – 2021.

4. Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року : затв. розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.10.2021 № 1363-р // *Офіційний вісник України*. – 2021.

5. Бондар О. І., Шевченко Р. І. Управління відходами в Україні в контексті переходу до циркулярної економіки // *Екологічні науки*. – 2019. – № 2. – С. 5–12.

6. Кравченко О. В., Ляшенко О. А. Екологічні аспекти термічних методів поводження з відходами // *Вісник екологічної безпеки та збалансованого природокористування*. – 2020. – № 1. – С. 41–48.

7. Мельник Л. Г., Дегтярьова І. Б. Циркулярна економіка як інструмент сталого розвитку: екологічні обмеження та перспективи // *Економіка природокористування і охорони довкілля*. – 2018. – № 4. – С. 3–11.

8. Сахно С. М., Коваленко В. О. Оцінка впливу технологій знешкодження відходів на довкілля // *Екологічні науки*. – 2021. – № 4. – С. 77–85.

9. Хвесик М. А., Бистряков І. К. Кліматична політика та екологічна трансформація економіки України // *Економіка України*. – 2020. – № 10. – С. 23–34.

10. Про затвердження Методичних рекомендацій з оцінки впливу на довкілля : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 08.09.2021 № 590. – Київ, 2021.

11. Жукова В. М., Поліщук А. О. Аналіз екологічних ризиків при застосуванні термічних технологій у сфері поводження з відходами // *Наукові праці Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Екологія.* – 2022. – № 322. – С. 112–120.

12. Директива 2008/98/ЄС про відходи (у редакції зі змінами) : переклад укр. мовою // *Офіційний сайт Європейського Союзу.* – Актуаліз. версія, 2018.

13. Kirchherr J., Reike D., Hekkert M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions // *Resources, Conservation and Recycling.* – 2017. – Vol. 127. – P. 221–232.

14. Astrup T. F., Tonini D., Turconi R., Boldrin A. Life cycle assessment of thermal waste treatment technologies: A systematic review // *Waste Management.* – 2018. – Vol. 76. – P. 203–215.

15. European Commission. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2019. Union, 2019.

УДК 504.3.054:351.777

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-13>

СУЧАСНА СТРАТЕГІЯ УПРАВЛІННЯ ЕМІСІЄЮ ТВЕРДИХ МІКРОЧАСТИНОК: АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТА НОРМАТИВНОЇ БАЗИ

Вадим Гончарук¹, Василь Петрук²¹ПП «Інтер-Еко», вул. Київська, 16, м. Вінниця, 21009, Україна²Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна

АНОТАЦІЯ

Забруднення атмосферного повітря дрібнодисперсними частинками (PM₁₀, PM_{2.5}) визнано ВООЗ пріоритетним фактором екологічного ризику, що зумовило глобальну трансформацію управлінських стратегій. У статті розкрито сутність еволюції світових стандартів: від контролю загального пилу до цілеспрямованого управління саме дрібними, найбільш небезпечними фракціями. Проаналізовано природу утворення мікрочастинок, зокрема специфіку формування вторинних аерозолів в урбанізованому середовищі, що вимагає впровадження новітніх природоохоронних технологій та комплексного контролю газів-прекурсорів. Особливу увагу приділено тому, як розвинені країни, керуючись європейською Директивою 2008/50/ЄС, переходять від жорстких короткострокових нормативів до дворівневої системи нормування та довгострокових референтних оцінок експозиції. Це дозволяє реагувати на хронічні ризики для здоров'я людей, а не просто фіксувати разові перевищення. На основі глибокого аналізу нормативно-правового поля України у роботі виявлено ключові колізії вітчизняної системи екологічного менеджменту. Доведено, що спроби

імплементції європейських Планів поліпшення якості повітря блокуються застарілою метричною базою — орієнтацією на гранично допустимі концентрації (ГДК) недиференційованого загального пилу та гострим дефіцитом затверджених на державному рівні методик виконання вимірювань безпосередньо для дрібнодисперсних фракцій. Такий розрив унеможливорює створення достовірних кадастрів емісії та застосування сучасного математичного моделювання розсіювання забруднювачів. Обґрунтовано критичну необхідність комплексної адаптації національної дозвільної системи до європейських стандартів. Гармонізація цих підходів та стимулювання впровадження сучасних технологій захисту навколишнього середовища дозволить не лише усунути методичні розбіжності, а й перейти до більш ефективного управління якістю повітря задля реального зниження шкідливих викидів у містах, що є базовою умовою забезпечення екологічної безпеки держави.

Ключові слова: технології захисту навколишнього середовища, екологічна безпека, управління якістю повітря, тверді мікрочастинки (PM₁₀, PM_{2.5}), екологічне нормування, загальний пил, гранично допустимі концентрації (ГДК), оцінка експозиції, плани поліпшення якості повітря.

MODERN STRATEGY FOR SOLID PARTICULATE MATTER EMISSION MANAGEMENT: AN ANALYTICAL REVIEW OF METHODS AND REGULATORY FRAMEWORKS

ABSTRACT

Air pollution by fine particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) has been recognized by the WHO as

a priority environmental risk factor, prompting a global transformation in air quality management strategies. The article reveals the essence of the

evolution of global standards: from controlling "total suspended particles" to specifically managing the finer, most hazardous fractions. The study analyzes the nature of microparticle formation, particularly the specifics of secondary aerosol formation in urban environments, which requires the implementation of the latest environmental protection technologies and comprehensive control of precursor gases. Special attention is given to how developed countries, guided by European Directive 2008/50/EC, are transitioning from rigid short-term limit values to a two-level regulatory system and long-term reference assessments of exposure. This enables proactive responses to chronic human health risks rather than merely recording singular regulatory exceedances. Based on an in-depth analysis of Ukraine's regulatory framework, the paper identifies key contradictions in the national environmental management system. It is proven that attempts to implement European Air Quality Improvement Plans are hindered by an outdated metric base—specifically, the reliance on Maximum Permissible Concentrations (MPC) of undifferentiated total dust and an acute shortage of state-approved measurement techniques specifically for fine fractions. This gap precludes the creation of reliable emission inventories and the application of modern mathematical dispersion modeling of pollutants. The study substantiates the critical need for a comprehensive adaptation of the national permitting system to European standards. Harmonizing these approaches and stimulating the implementation of modern environmental protection technologies will not only eliminate methodological discrepancies but also facilitate a transition toward more effective air quality management, ultimately leading to a tangible reduction of harmful emissions in urban areas, which is a fundamental condition for ensuring the ecological safety of the state.

Keywords: environmental protection technologies, ecological safety, air quality management, particulate matter (PM10, PM2.5), environmental regulation, total suspended particles (TSP), maximum permissible concentrations (MPC), exposure assessment, air quality improvement plans.

1. ВСТУП

Якість атмосферного повітря сьогодні є одним із головних індикаторів екологічної безпеки урбанізованих територій. За даними

Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), забруднене повітря щороку стає причиною мільйонів передчасних смертей, причому лівова частка цих випадків пов'язана саме з впливом дрібнодисперсних твердих частинок (Particulate Matter — PM).

Довгий час у світовій практиці, і в Україні зокрема, основним критерієм забруднення вважався так званий «загальний пил» (Total Suspended Particles — TSP). Цей підхід передбачав контроль валової маси всіх твердих домішок, що знаходяться у повітрі, без розрізнення їхнього розміру чи хімічного складу. Проте сучасна наука довела, що такий метод є недостатньо інформативним, а іноді й помилковим з точки зору оцінки реальної загрози.

Ключова небезпека полягає не стільки в кількості пилу, скільки в його дисперсності. Частинки з аеродинамічним діаметром менше 10 мкм (PM10) здатні проникати глибоко в легені, а фракція PM2.5 (менше 2,5 мкм) потрапляє безпосередньо в кровоносну систему, викликаючи серцево-судинні та респіраторні захворювання. Саме тому «великий» пил, який затримується верхніми дихальними шляхами, становить значно меншу загрозу, ніж невидимі оком аерозолі.

Це розуміння призвело до зміни управлінської парадигми в усьому світі. Розвинені країни відмовилися від боротьби з пилом «взагалі» і перейшли до цілеспрямованого управління емісією конкретних дрібнодисперсних фракцій. Для України, яка знаходиться на етапі імплементації європейських екологічних директив, перехід на ці нові рейки є не просто вимогою законодавства, а питанням національної безпеки в сфері громадського здоров'я.

2. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Проблема забруднення атмосферного повітря мікрочастинками (PM10, PM2.5) є предметом інтенсивних досліджень провідних міжнародних інституцій, зокрема Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), Європейського агентства з довкілля (EEA) та Агентства з охорони довкілля США (USEPA) [1, 2]. Аналіз сучасного світового наукового дискурсу свідчить про остаточну зміну дослідницької парадигми: від простої оцінки валових викидів до глибокого вивчення дисперсного складу аерозолів та їхнього впливу на здоров'я населення.

Фундаментальну роль у цій трансформації відіграли дослідження впливу дрібнодисперсних фракцій на рівень захворюваності та смертності. Зокрема, класичні праці С. А. Pore та D. W. Dockery [3] науково обґрунтували прямий епідеміологічний зв'язок між забрудненням дрібними частинками та кардіоваскулярними ризиками. Спираючись на подібні дослідження, низка європейських та американських вчених у своїх роботах [4, 5] переконливо довела неефективність традиційного контролю «недиференційованого пилу» (TSP) та необхідність переходу до управління на основі довгострокової експозиції.

В українському науковому просторі проблема якості повітря висвітлюється достатньо широко. Вітчизняні науковці активно досліджують санітарно-гігієнічні аспекти та безпосередній вплив забруднення повітря на розвиток серцево-судинних захворювань, зокрема артеріальної гіпертензії [6]. Окрім того, з'являються сучасні емпіричні дослідження, присвячені безпосередньому інструментальному моніторингу та аналізу динаміки забруднення саме мікрочастинками PM_{2.5} в українських містах [7].

Проте більшість вітчизняних досліджень у сфері екологічного управління традиційно зосереджені на констатації перевищень гранично допустимих концентрацій (ГДК) загального пилу. При цьому питанням розробки сучасних управлінських стратегій щодо зниження емісії саме дрібнодисперсних фракцій приділяється недостатньо уваги. Відчувається брак комплексних досліджень щодо проблематики гармонізації національної нормативної бази з європейськими стандартами, зокрема з механізмами імплементації Директиви 2008/50/ЄС на рівні муніципального управління. [8] [9] [10].

Наявність зазначених нормативних та методологічних прогалин зумовлює актуальність цього дослідження.

Метою статті є комплексний аналіз наукових та нормативно-правових засад сучасного управління якістю повітря в частині РМ-забруднення, а також виявлення ключових суперечностей у вітчизняній системі екологічного менеджменту для обґрунтування шляхів її адаптації до європейських стандартів.

3. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

3.1. Природа утворення та фізико-хімічні властивості мікрочастинок

Для формування ефективної стратегії управління якістю повітря критично важливо розуміти природу об'єкта управління. На відміну від більшості класичних забруднювачів (наприклад, чадного газу чи діоксиду сірки), тверді мікрочастинки (РМ) не є окремою хімічною речовиною. Це складна гетерогенна суміш твердих і рідких частинок органічного та неорганічного походження, що знаходяться у зваженому стані в атмосфері.

З управлінської точки зору принциповим є поділ аерозолів за генезисом на первинні та вторинні. **Первинні частинки** емітуються в атмосферу безпосередньо з джерел (сажа від згоряння палива, мінеральний пил від будівництва, знос автомобільних шин та гальмівних колодок). Натомість **вторинні частинки** утворюються безпосередньо в атмосфері внаслідок складних фотохімічних реакцій між газами-прекурсорами, насамперед діоксидом сірки (SO₂), оксидами азоту (NO_x), аміаком (NH₃) та леткими органічними сполуками (VOCs). Урбанізовані території характеризуються високою часткою саме вторинних аерозолів, що робить традиційні методи пилоочищення на джерелах викидів недостатніми: управління забрудненням РМ_{2.5} вимагає одночасного контролю емісії газоподібних прекурсорів.

Джерела емісії мікрочастинок також мають суттєві відмінності порівняно із «загальним пилом» (TSP). Якщо валові викиди великого пилу традиційно асоціюються з промисловими гігантами (металургія, теплоенергетика, гірничозбагачувальні комбінати), то ключовим джерелом дрібнодисперсних фракцій у містах є неорганізовані та муніципальні джерела: вихлопні та невихлопні викиди автотранспорту, а також індивідуальне опалення у приватному секторі.

Саме дисперсність та фізико-хімічні властивості визначають рівень небезпеки РМ для здоров'я, що робить їх пріоритетним об'єктом нормування. Частинки фракції РМ₁₀ (аеродинамічний діаметр менше 10 мкм) осідають переважно у верхніх дихальних шляхах. Натомість фракція РМ_{2.5} (менше 2,5 мкм) здатна

долати альвеолярно-капілярний бар'єр і потрапляти безпосередньо в кровоносну систему. Крім механічного пошкодження тканин, експоненційне зростання питомої площі поверхні при зменшенні розміру частинок робить PM2.5 ідеальним сорбентом для високотоксичних сполук — важких металів та поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ). Це пояснює парадокс, встановлений сучасними дослідженнями: навіть при суттєвому зниженні валової маси викидів загального пилу (TSP), рівень захворюваності населення може не зменшуватися, якщо концентрація найнебезпечнішої фракції PM2.5 залишається високою.

3.2. Еволюція світових підходів: від ГДК загального пилу до дворівневого нормування мікрочастинок

Ще декілька десятиліть тому екологічні нормативи більшості країн світу фокусувалися на контролі валових викидів. Логіка була простою: чим менше пилу вилітає з труби, тим краще. Однак, наукові дослідження кінця XX століття довели, що цей підхід є хибним. З'ясувалося, що зниження маси викидів загального пилу (TSP) часто не призводило до покращення здоров'я населення. Причина крилася у тому, що системи очистки ефективно вловлювали великі важкі частинки, але пропускали дрібні фракції, які є найбільш токсичними.

Це стало поштовхом до першого глобального зрушення у стандартах — зміни об'єкта нормування. Провідну роль тут відіграла Всесвітня організація охорони здоров'я (ВООЗ), яка переглянула свої рекомендації, чітко виокремивши нормативи для PM10 та PM2.5. Сьогодні саме ці фракції, а не загальний пил, є базовими індикаторами екологічної безпеки у всіх розвинених країнах.

Другим фундаментальним зрушенням у світовій практиці стала зміна підходів до самого нормування якості повітря. Традиційна система, орієнтована переважно на жорсткі гранично допустимі концентрації (ГДК) короткочасної дії (максимальні разові концентрації), виявилася недостатньою для захисту населення від РМ-забруднення. Оскільки мікрочастинки мають здатність накопичуватися в організмі, критично важливим фактором безпеки є не лише разовий сплеск концентрації пилу в повітрі, а й

тривалість постійного фонового впливу (експозиція).

Саме тому сучасні європейські стратегії, зокрема Директива 2008/50/ЄС, запровадили дворівневу архітектуру нормування, яка поєднує контроль за короткочасними та довгостроковими показниками. З одного боку, встановлюються середньодобові граничні величини для запобігання гострим впливам на здоров'я під час локальних пікових забруднень. З іншого — ключову роль відіграють середньорічні ліміти та спеціальні цільові показники зменшення експозиції населення, що дозволяють контролювати хронічний вплив мікрочастинок. Такий комплексний підхід змушує не просто констатувати разові перевищення, а розробляти довгострокові Плани поліпшення якості повітря (Air Quality Plans), спрямовані на системне зниження загального фонового забруднення.

3.3. Українські реалії: нормативні колізії та проблеми імплементації європейських стандартів

Вітчизняна система управління якістю атмосферного повітря нині перебуває у стані глибокої і складної трансформації. Історично в Україні сформувалася модель, орієнтована переважно на санітарно-гігієнічний контроль. Базовим інструментом цієї системи тривалий час залишалися гранично допустимі концентрації (ГДК), зокрема максимальні разові, які фіксують короткочасні пікові забруднення. При цьому головним об'єктом контролю твердих домішок у дозвільній системі досі виступає показник «речовини у вигляді суспендованих твердих частинок» (недиференційований пил, аналог TSP), що суперечить сучасним світовим підходам щодо пріоритетності управління фракціями PM10 та PM2.5.

Масштаб нормативної прогалини посилюється відсутністю цілісного метрологічного та методологічного забезпечення. Незважаючи на спроби імплементації європейських норм, в Україні досі спостерігається гострий дефіцит затверджених на державному рівні сучасних методик виконання вимірювань (МВВ) саме для дрібнодисперсних фракцій. Це стосується як інструментального контролю викидів безпосередньо на стаціонарних джерелах (для проведення інвентаризації), так і розширення мережі референтного моніторингу фонового забруднення. Крім того, нові санітарні

гігієнічні регламенти для PM10 та PM2.5, хоч і задекларовані на рівні охорони здоров'я, досі повноцінно не інтегровані в екологічну дозвільну систему: при встановленні нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ) для підприємств продовжують оперувати загальним пилом.

У рамках євроінтеграційних зобов'язань Україна здійснила важливий крок, прийнявши у 2019 році Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря (Постанова КМУ № 827). Цей документ формально запровадив обов'язок для органів місцевого самоврядування та місцевих органів виконавчої влади розробляти Плани поліпшення якості повітря у разі перевищення граничних величин мікрочастинок у відповідних зонах та агломераціях.

Однак на практиці виник управлінський парадокс: спроба накласти сучасні європейські інструменти на застарілу вітчизняну метричну базу. Органи влади на місцях зобов'язані розробляти заходи зі зниження концентрацій PM10 та PM2.5, проте вони позбавлені достовірних вихідних даних. Через відсутність затверджених методик виконання вимірювань (МВВ) та відповідних нормативів емісії (ГДВ) для дрібнодисперсних фракцій, підприємства продовжують звітувати про викиди недиференційованого пилу.

Цей розрив унеможливорює створення точних емісійних кадастрів. Без них неможливо застосувати сучасні інструменти математичного моделювання розсіювання, а отже — достовірно визначити частку впливу кожного окремого емітента (транспорту, конкретного промислового об'єкта чи приватного сектору) у формуванні небезпечної експозиції PM2.5. Таким чином, декларовані європейські цілі блокуються відсутністю базового інструментарію на нижньому рівні екологічного нормування.

ВИСНОВКИ

Світова практика екологічного менеджменту демонструє остаточну зміну парадигми управління якістю атмосферного повітря: перехід від контролю валових викидів недиференційованого пилу (TSP) до цілеспрямованого управління емісією дрібнодисперсних фракцій (PM10 та PM2.5). Ця трансформація супроводжується фундаментальною зміною архітектури

нормування. Замість традиційної фіксації короткочасних пікових концентрацій (разових ГДК), розвинені країни впроваджують механізми управління довгостроковою експозицією та оцінки комплексних ризиків для здоров'я населення.

Аналіз вітчизняної нормативно-правової бази засвідчив наявність глибокого системного парадоксу. Україна перебуває на етапі декларованої імплементації європейських механізмів, зокрема впровадження Планів поліпшення якості повітря для зон та агломерацій. Проте ефективність цих сучасних управлінських інструментів повністю нівелюється застарілим нормативним базисом. Чинна дозвільна система, нормативи гранично допустимих викидів (ГДВ) та відсутність затверджених на державному рівні методик виконання вимірювань (МВВ) для PM-фракцій змушують підприємства продовжувати звітувати за показником «загального пилу».

Такий розрив унеможливорює створення достовірних кадастрів емісії мікрочастинок, що є критично необхідним для ідентифікації реальних джерел забруднення в містах. Для подолання цієї колізії Україні необхідна не фрагментарна, а комплексна синхронізація екологічного законодавства на всіх рівнях: від труби підприємства до муніципального управління фоновими концентраціями.

Пріоритетним напрямком для подальших наукових досліджень у цій сфері є розробка сучасних природоохоронних технологій, адаптованих методологічних підходів до інструментального моніторингу емісії мікрочастинок та впровадження сучасних систем математичного моделювання їх просторового розсіювання в умовах українських міст.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Geneva: World Health Organization.
2. European Environment Agency. (2023). *Air quality in Europe 2023*. EEA Report No 10/2023. Publications Office of the European Union.
3. Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air

pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742.

4. Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 360(9341), 1233-1242.

5. Dominici, F., Greenstone, M., & Sunstein, C. R. (2014). Particulate matter matters. *Science*, 344(6181), 257-259.

6. Волкова Ю. В. Дрібнодисперсний пил як фактор ризику для здоров'я населення м. Запоріжжя. *Екологічні та гігієнічні проблеми сфери життєдіяльності людини : матеріали наук.-практ. конф. (15 берез. 2023 р.)*. 2023. URL: <http://ir.librarynmu.com/handle/123456789/7089>

7. Гринчишин Н. М. Якість атмосферного повітря за вмістом твердих мікрочастинок (PM_{2,5}) у містах України в умовах карантину та воєнного стану. *Вісник ЛДУБЖД*. 2023. № 27. С. 6–15. DOI: <https://doi.org/10.32447/20784643.27.2023.01>

8. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря : постанова Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 № 827. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>

9. Про затвердження Порядку розроблення та затвердження планів поліпшення якості атмосферного повітря : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 01.08.2022 № 268. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1071-22#n15>

Про затвердження Порядку розроблення та затвердження короткострокових планів дій : наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 01.08.2022 № 267. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1086-22#n15>

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Андрійчук Ю.М. (м. Київ) - Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

Yurii M. Andriiuchuk
State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management
35, Mytropolyta Lypkivskoho St., bld. 2
Kyiv, 03035, Ukraine

Власенко Олег Васильович (м. Київ) – аспірант, науковий співробітник. Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна.
SCOPUS: 59266912500
<https://orcid.org/0000-0001-9802-0322>

Гончарук Вадим, (м. Вінниця) - ПП «Інтер-Еко», вул. Київська, 16, м. Вінниця, 21009, Україна
Vadym Honcharuk, PE “Inter-Eco”, Vinnytsia, Ukraine.
<https://orcid.org/0009-0000-6395-853X>

Грицуляк Галина Михайлівна (м. Івано-Франківськ) - д.с.-г. наук, професор. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.
Hrytsulyak Galina Mykhailivna, Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
<https://orcid.org/0000-0003-2463-4772>

Дичко Аліна Олегівна (м. Київ). д.т.н., проф., Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, вул. Джона Маккейна, 33, м. Київ, 01042
<https://orcid.org/0000-0003-4632-3203>

Довгалюк Орест Вікторович (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Dovgalyuk Orest Viktorovych, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Заріцький Віталій Богданович (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський

національний університет нафти і газу
Zaritskyi Vitaly Bogdanovych, Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas
<https://orcid.org/0009-0005-5748-5867>

Калин Тетяна Іванівна (м. Івано-Франківськ) - кандидат хім. наук, доцент, Івано-Франківський національний університет нафти і газу
Kalyn Tetiana Ivanivna, Ph.D. chemical Sciences, associate Professor, Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas
<https://orcid.org/0000-0003-2343-3733>

Коваленко Данійл (м. Київ)- здобувач вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна.
<https://orcid.org/0009-0001-0908-5181>

Ковтунов Олександр Володимирович (м. Київ)- здобувач вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

Копаниця О.Б. (м. Київ) - провідний судовий експерт Лабораторії досліджень об'єктів навколишнього середовища та екологічних досліджень Київського науково-дослідного інституту судових експертиз Міністерства юстиції України; здобувач вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища, Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна. м. Київ,
Koranytsia O.B. leading forensic expert of the Laboratory of environmental and ecological research of the Kyiv Research institute of forensic expertise of the Ministry of justice of Ukraine;
<https://orcid.org/0009-0003-8939-2919>

Коцюбинський Андрій Олегович (м. Івано-Франківськ) - канд. фіз.-мат. наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Kotsyubynsky Andrew Olegovych, Ph.D. physics and mathematics Sciences, associate professor. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

<https://orcid.org/0000-0003-1135-3568>

Линник Діана Олександрівна (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.

Lynnyk Diana Oleksandrivna, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.

<https://orcid.org/0009-0008-5907-6209>

Лясковська Марія Романівна (м. Івано-Франківськ) - кандидат хім. наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Liaskovska Mariia Romanivna, Ph.D. chemical Sciences, associate Professor, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

<https://orcid.org/0009-0004-1625-3261>

Марич Володимир Михайлович (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний університет нафти і газу

Marych Volodymyr Mykhailovych. Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

<https://orcid.org/0009-0006-7028-1639>

Маркіна Людмила Миколаївна (м. Київ) - д.т.н., професор, Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0003-3632-1685>

Машков Олег Альбертович (м. Київ) - д.т.н., професор., старший науковий співробітник, Заслужений діяч науки і техніки України, Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки. Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-9227-4647>

Медвідь Марія Миколаївна (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і

газу

Medvid Maria Mykolaivna, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Морозова Тетяна Василівна (м. Київ) - кандидат біологічних наук, доцент,

Національний транспортний університет

<https://orcid.org/0000-0003-4836-1035>

Некос Алла Наумівна (м. Харків) - Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Д. геогр. Н., професор, зав. Кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти

<https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

Оводенко Тамара Сергіївна (м. Київ) - здобувачка вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища, Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

Петрук Василь Григорович (м. Вінниця), професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, вул. Хмельницьке шосе, 95, 21021, м. Вінниця, Вінницька область, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-0834-7338>

Покішевницька Тетяна Василівна (м. Київ) - здобувачка вищої освіти III освітньо-наукового рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища, кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища Національного транспортного університету, 01010, м. Київ, вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, е-;

<https://orcid.org/0009-0008-6606-5073>

Присяжний Володимир Ілліч (м. Київ) - к.т.н. старший науковий співробітник, начальник Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

<https://orcid.org/0000-0001-7825-9037>

Рижов Гліб Олегович (м. Київ) - здобувач вищої освіти III освітньо-наукового рівня за

спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0003-7772-7398>

Ромасевич Дарина (м. Київ) - здобувачка вищої освіти III освітньо-наукового рівня рівня за спеціальністю 183 Технології захисту навколишнього середовища Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

Ромасевич Ірина Петрівна (м. Київ) - здобувачка вищої освіти II освітньо-професійного рівня за спеціальністю 183

Технології захисту навколишнього середовища Державна екологічна Академія післядипломної освіти та управління, вул. Митрополита Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ, Україна

Турчин Олег Романович (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Turchyn Oleg Romanovych, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Угриновський Іван Тарасович (м. Івано-Франківськ) - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Ugrynovsky Ivan Tarasovych, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Редакція журналу також вдячна авторам які прийняли участь у підготовці чергового номеру:
Машкову О.А., Грицуляк Г.М., Покшевницькій Т.В., Морозовій Т.В., Рижову Г. О.

Ми щиро вдячні кожному з вас за внесок у нашу спільну справу

ВИМОГИ ДО ЗМІСТУ СТАТТІ

наукового журналу «ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ»

затверджено в Переліку наукових фахових видань рішенням Атестаційної колегії Міністерства освіти і науки України (категорія Б) (наказ №894 від 10. 10. 2022 р.)

Обсяг статті не менше 10-15-ти повних сторінок.

Структура статті має відповідати вимогам до наукових статей й складатися з таких частин:

- **УДК**;
- назва статті;
- прізвище автора (авторів), науковий ступінь, назва кафедри, посада, назва установи (організації) та міста;
- контакти автора (телефон, електронна адреса);
- анотація **1800** знаків без пробілів;
- ключові слова;
- загальна суть проблеми;
- аналіз останніх досліджень та публікацій;
- формулювання мети статті;
- виклад основного матеріалу;
- висновки;
- список використаної літератури

Статті публікуються українською, англійською, польською або російською мовами.

Автор зазначає рубрику, в якій публікується стаття, індекс за універсальною десятиковою класифікацією. В кінці статті наводить повну назву організації, де виконане дослідження, свою поштову і електронну адресу та номер телефону та ID SCOPUS/ORCID.

Фізичні величини наводяться в одиницях СІ.

Повна назва статті, анотація, ключові слова, а також написання прізвищ додаються українською, англійською, польською мовами.

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

1. Текстовий редактор – Word for Windows.
 2. Розмір сторінки: А4, 210х297.
 3. Поля: верхнє, лівє, праве – 1,5 см, нижнє – 1,7 см.
 4. Розмір шрифту «Times New Roman».
 - Для УДК – 10 кегель, великі літери, жирний шрифт.
 - Для заголовку статті 10 кегель, великі літери, жирний шрифт.
 - Для прізвища авторів – 10 кегель, жирний шрифт.
 - Для назви організації і міста – 10 кегель, нормальний шрифт.
 - Для анотації, ключових слів (3-4 рядки через 1 інтервал) 10 кегель, жирний шрифт.
 - Для заголовків розділів в тексті – 10 кегель, жирний шрифт.
 - Для основного тексту – 10 кегель, нормальний шрифт.
 - Для переліку використаних джерел (через 1 інтервал, слово Література) – 9 кегель, нормальний шрифт.
 5. Текст друкується через 1 інтервал і вирівнюється на ширину листа.
 6. Абзацний відступ від основного тексту – 0,5 см.
 7. УДК, прізвище (-а) автора (-ів), назва статті, рядки тексту анотації, номери джерел вирівнюються по лівому краю сторінки.
 8. Формули необхідно друкувати по центру, нумерація формул в кінці рядка.
 9. Розмір формул такий: основний . – 12; крупний індекс –7; дрібний індекс – 5; крупний символ – 18; дрібний символ – 12.
 10. Якщо рисунок один чи таблиця одна на статтю, то підпис здійснюється «Рисунок. Назва» чи відповідно «Таблиця», а продовження «продовження таблиці». Якщо декілька, то «Рис.1. Назва» чи відповідно «Таблиця 1», а продовження «продовження табл. 1».
 11. Між рядком з вказаним індексом УДК і рядком з прізвищем автора (-ів), рядком з прізвищем автора (-ів) та назвою, назвою та анотацією, анотацією та текстом, текстом та переліком джерел – віддаль повинна бути в 2 інтервали.
 12. Переноси в назві статті не допускаються.
 13. Нумерований перелік літератури подати в кінці статті одним абзацем, через крапку і оформлюється згідно ДСТУ 7,1:2006 (див. Бюлетень ВАК України №3, 2008). Нумерація джерел йде підряд і номер джерела виділяється жирним шрифтом. В переліку повинна вказуватись сучасна англомовна література з ретроспективою не більше 5 років.
- До статті подається рецензія від фахівця з науковим ступенем доктора наук і витяг з протоколу засідання кафедри про рекомендацію статті до друку.

Довідково (інтернет ресурси):

<https://vak.in.ua/>

<https://www.grafiati.com/uk/info/dstu-7-1-2006/examples/>

https://www.narodnaosvita.kiev.ua/?page_id=105

<http://www.ukrbook.net/biblzak.html>

http://www.library.ukma.edu.ua/fileadmin/documents/Bibliography/26_DCTU3582-97.pdf

«Про підвищення вимог до фахових видань, внесених до переліків ВАК України» від 15 січня 2003 № 7-05/1.

Онлайн-конвертер з української мови для транслітерації: <http://translit.kh.ua/?passport>

Для транслітерації латиницею україномовних текстів можна скористатися програмами на відповідних сайтах: <http://litopys.org.ua/links/intrans.htm>

ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання»
ДСТУ 3582-97
ДСТУ 7.1:2006

Екологічна безпека та технології захисту довкілля

Вул. Вознесенський узвіз 10а,
прим. 602. м. Київ, 04055

Тел: +380980625787
(контактна особа-Печений Володимир)

Corporation_office@ukr.net
<https://ecocorptzd.com.ua>
<https://facebook.com/SIAS.Techecosafety/>