

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ СПОСОБІВ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ НА ДОВКІЛЛЯ

Панас Н.Є.

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій

імені С.З. Гжицького

вул. Пекарська, 50, 79010, м. Львів

panas.natalia.edu@gmail.com

Метою статті є наукове обґрунтування екологічних та мікробіологічних наслідків різних способів поводження з відходами та оцінка їхнього впливу на біорізноманіття, зокрема мікроорганізмів, що виконують ключові функції в екосистемах. Об'єктом дослідження виступають сучасні практики управління твердими та органічними відходами, а також їх взаємозв'язок із динамікою стану ґрунтових і водних мікробіоценозів. У статті обґрунтовано екологічну та біологічну важливість системного оцінювання впливу різних способів поводження з відходами на стан довкілля, зокрема з урахуванням функціонування мікроорганізмів як чутливих індикаторів порушення екологічної рівноваги. Визначено, що сучасні практики утилізації та захоронення відходів істотно впливають на склад і життєдіяльність мікробіоценозів у ґрунтових і водних середовищах. Доведено, що неконтрольоване спалювання, скидання та тривале захоронення відходів призводить до пригнічення автотрофних і сапрофітних мікроорганізмів, зміщення біохімічних циклів і формування токсичного середовища для природного відновлення екосистем. Охарактеризовано роль мікроорганізмів у біодеструкції органічних сполук, участі в кругообігу речовин, забезпеченні родючості ґрунтів і самоочищенні води. Встановлено, що органічні технології, такі як компостування, біоконверсія або анаеробне зброджування, можуть створити умови для підтримки активності корисної мікрофлори, однак потребують належного контролю параметрів середовища. Особливу увагу приділено впливу цифровізації на систему екологічного моніторингу. Доведено, що використання цифрових технологій, включно з сенсорними станціями, біоінформатикою та супутниковими даними, значно розширює можливості вивчення стану мікробних спільнот та оперативного реагування на критичні зміни в екосистемах. Стаття формує теоретико-науковий базис для подальших досліджень з урахуванням екологічної мікробіології, цифрових інструментів і стратегії сталого й безпечного розвитку. *Ключові слова:* поводження з відходами, мікроорганізми, екосистема, цифровізація, біобезпека, забруднення, ґрунт, вода, біомоніторинг, мікробіоценоз

Ecological assessment of the impact of waste management methods on the environment. Panas N.

The purpose of the article is to scientifically substantiate the ecological and microbiological consequences of various waste management methods and assess their impact on biodiversity, in particular microorganisms that perform key functions in ecosystems. The object of the study is modern practices of solid and organic waste management, as well as their relationship with the dynamics of the state of soil and aquatic microbiocenoses. The article substantiates the ecological and biological importance of a systematic assessment of the impact of various waste management methods on the state of the environment, in particular, taking into account the functioning of microorganisms as sensitive indicators of ecological imbalance. It is determined that modern practices of waste utilization and disposal significantly affect the composition and vital activity of microbiocenoses in soil and aquatic environments. It has been proven that uncontrolled burning, dumping and long-term burial of waste leads to the suppression of autotrophic and saprophytic microorganisms, the displacement of biochemical cycles and the formation of a toxic environment for the natural restoration of ecosystems. The role of microorganisms in the biodestruction of organic compounds, participation in the cycle of substances, ensuring soil fertility and self-purification of water has been characterized. It has been established that organic technologies, such as composting, bioconversion or anaerobic digestion, can create conditions for maintaining the activity of beneficial microflora, but require proper control of environmental parameters. Particular attention is paid to the impact of digitalization on the environmental monitoring system. It has been proven that the use of digital technologies, including sensor stations, bioinformatics and satellite data, significantly expands the possibilities of studying the state of microbial communities and responding promptly to critical changes in ecosystems. The article forms a theoretical and scientific basis for further research taking into account environmental microbiology, digital tools and strategies for sustainable and safe development. *Key words:* waste management, microorganisms, ecosystem, digitalization, biosafety, pollution, soil, water, biomonitoring, microbiocenosis

Постановка проблеми. Зростання обсягів побутових, промислових та аграрних відходів створює серйозне навантаження на екосистеми, змінюючи умови існування багатьох біологічних агентів, включаючи мікроорганізми. Саме мікроорганізми відіграють ключову роль у процесах самоочищення ґрунтів, води та атмосферного повітря, регулюють колообіг елементів (азоту, вуглецю, сірки) та впливають на стабільність біогеохімічних процесів. Але за наявності токсичних сполук, важких мета-

лів чи полімерів, які потрапляють у довкілля внаслідок неефективного або неконтрольованого поводження з відходами, мікробіоценози змінюються. Відтак, зменшується різноманіття, пригнічуються природні функції, активізуються патогенні або умовно-патогенні види. Це може призвести до глибоких порушень природного середовища, зниження родючості ґрунтів, погіршення якості води та формування небезпечних біологічних «гарячих точок».

Актуальність дослідження. Біологічний підхід до аналізу впливу поводження з відходами на довкілля дозволяє не лише оцінити безпосередню шкоду, але й зрозуміти довготривалі наслідки для екологічної рівноваги. Наприклад, застосування біодеградабельних матеріалів або компостування органічних відходів активізує діяльність ґрунтових мікроорганізмів, сприяє біоремедіації та відновленню природних біоценозів. У той час як спалювання або захоронення великої кількості органічних відходів на полігонах може створювати анаеробні умови, що сприяють розмноженню метаноутворювальних архей та інших мікроорганізмів, здатних змінювати газовий баланс атмосфери. Таким чином, розуміння і науково обґрунтоване оцінювання способів поводження з відходами з біологічної точки зору дозволяє формувати ефективні екологічні стратегії, які базуються не лише на технологіях, але й на підтримці біологічної рівноваги, збереженні активності природних мікробних угруповань та мінімізації антропогенного впливу на живу природу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. наукове обґрунтування екологічних та мікробіологічних наслідків різних способів поводження з відходами та оцінка їхнього впливу на біорізноманіття, зокрема мікроорганізмів, що виконують ключові функції в екосистемах та безпосередній вплив цифровізації на цей процес оцінки досі залишається важливим науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впливу способів поводження з відходами на довкілля дедалі активніше досліджується у вітчизняній науковій літературі з міждисциплінарних позицій, зокрема в контексті біоекологічної безпеки, економіки природокористування, мікробіологічних процесів та цифровізації систем моніторингу [1-10]. У роботі Купалової, Гончаренко, Андрусів, Олешко та Демченко [1] охарактеризовано важливість екологічної модернізації виробництва в контексті інноваційного розвитку, що передбачає не лише впровадження технологій зменшення шкідливих викидів, а й врахування біологічної реакції довкілля на залишкові компоненти. Зокрема, автори наголошують на потребі врахування мікробіологічних змін у зоні впливу промислових відходів як основи сталого розвитку підприємств. Особливу увагу дослідники приділяють аграрному сектору, який продукує значну кількість біорозкладних відходів. У праці Карбовської, Мазура, Железняка та ін. [2] визначено організаційно-фінансові аспекти управління аграрними відходами, що мають прямий вплив на якість ґрунтової мікрофлори та здатність мікроорганізмів до самоочищення середовища. Водночас Хільчевський, Забокрицька та Кравчинський [3] у своїй ґрунтовній праці доводять, що стандартизація управління відходами має включати мікробіологічні критерії, оскільки порушення екологічного

балансу мікроорганізмів є раннім індикатором деградації екосистем. Це узгоджується з підходами циркулярної економіки, представленими у дослідженні Горбаль, Адамів та Чумака [4], де обґрунтовано ефективність впровадження замкнених біологічних циклів поводження з органічними залишками. Регіональний вимір управління відходами, з урахуванням локальної екологічної ситуації, проаналізовано в монографії Колодійчука [5], де встановлено важливість мікрорівневого моніторингу, зокрема за участю мікроорганізмів, для забезпечення біобезпеки. Сафранов, Шаніна, Губанова та Приходько [6] акцентують увагу на класифікації небезпечної складової твердих побутових відходів, яка має токсичний вплив на мікробіоту ґрунту і води, включаючи здатність деяких хімічних сполук блокувати метаболічну активність корисних мікроорганізмів. На цьому фоні Залознова, Сердюк і Петрова [7] доводять, що інтерналізація зовнішніх негативних ефектів у виробничому середовищі має враховувати біоіндикаторні дані про деградацію мікробіоценозів як економічно значущий чинник втрати екологічних функцій довкілля. Ю. Маковецька [8] зазначає, що адаптація українського законодавства до вимог Європейського Союзу у сфері управління відходами наразі відбувається нерівномірно, що ускладнює системний облік біологічних наслідків таких процесів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою статті є наукове обґрунтування екологічних та мікробіологічних наслідків різних способів поводження з відходами та оцінка їхнього впливу на біорізноманіття, зокрема мікроорганізмів, що виконують ключові функції в екосистемах. Об'єктом дослідження виступають сучасні практики управління твердими та органічними відходами, а також їх взаємозв'язок із динамікою стану ґрунтових і водних мікробіоценозів.

Новизна. Із залученням даних наукової літератури проведено поглиблений аналіз джерел, виокремлено основні причини проведення екологічної оцінки впливу способів поводження з відходами на довкілля, охарактеризовано вплив поводження з відходами на водне середовище та мікробіоценози, визначено напрямки застосування цифрових технологій для оцінювання впливу поводження з відходами на довкілля.

Методологія. Методологія даного дослідження включає використання різноманітних методів, зокрема: метод індукції та дедукції для аналізу сутності та змісту оцінювання впливу способів поводження з відходами на довкілля; метод порівняння і систематизації при оцінці впливу способів поводження з відходами на довкілля; метод синтезу і аналізу при дослідженні ключових напрямків застосування цифрових технологій для оцінювання впливу способів поводження з відходами на довкілля; графічний та табличний методи для наочного представ-

лення даних для кращої характеристики отриманих результатів; абстрактно-логічний метод для формування теоретичних узагальнень та висновків.

Виклад основного матеріалу. Поводження з відходами є одним із головних чинників, що формують стан довкілля в умовах зростаючого антропогенного навантаження. Від того, яким чином суспільство організовує збирання, перероблення, зберігання або утилізацію відходів, значною мірою залежить стан ґрунтів, водних екосистем і атмосфери. Багато сучасних практик, зокрема неконтрольоване захоронення або спалювання твердих побутових і промислових відходів, спричиняють викид токсичних сполук, що мають здатність накопичуватись у ланцюгах живлення. Відтак, це завдає шкоди не лише вищим тваринам і рослинам, а й мікроорганізмам які є основою функціонування екосистем. Мікроорганізми виконують безліч важливих функцій у довкіллі, зокрема регулюють кругообіг речовин, розкладають органічні рештки та нейтралізують забруднювальні сполуки. У процесі біодеградації мікроорганізми розкладають складні органічні сполуки до простих речовин. Саме завдяки їхній діяльності ґрунт зберігає свою родючість а водойми не перетворюються на непридатні до життя зони. Однак наявність шкідливих речовин у відходах таких як важкі метали, синтетичні полімери, фармацевтичні залишки або феноли чинить сильний тиск на мікробні спільноти. Це проявляється у зниженні видової різноманітності мікроорганізмів зміні співвідношення автотрофних і гетеротрофних форм порушенні механізмів само-

регуляції екосистем. Наприклад, у ґрунтах поблизу полігонів побутових відходів часто фіксують домінування стійких до токсичних сполук мікроорганізмів що водночас втрачають здатність до участі в природних біохімічних циклах (рис. 1).

Особливу тривогу викликає вплив поведінки з відходами на водне середовище. Через інфільтрацію фільтратів зі сміттєзвалищ і забруднення стічними водами до річок і озер потрапляє величезна кількість органіки, фосфатів, нітратів і токсичних речовин. У відповідь мікроорганізми активізують процеси біохімічного розкладання що супроводжується зниженням вмісту кисню і розвитком анаеробних умов. Така ситуація сприяє розмноженню анаеробних бактерій у тому числі патогенних, а також водоростей що викликають цвітіння води і масову загибель риби. Біологічні наслідки забруднення можуть бути тривалими і невідворотними особливо якщо порушується рівновага між трофічними рівнями та руйнуються стійкі ланцюги живлення. На додаток слід наголосити на важливості дослідження впливу методів утилізації органічних відходів з точки зору збереження активності природних мікробіоценозів. Такі методи як компостування, анаеробне зброджування або біоконверсія за участі дощових черв'яків і бактеріальних культур мають потенціал не лише зменшувати обсяги відходів але й повертати в біосферу корисні продукти у вигляді біогазу гумусу або біодобрив. За правильно підібраних умов мікроорганізми прискорюють розклад органіки зберігають мікрофлору ґрунту і зменшують навантаження на

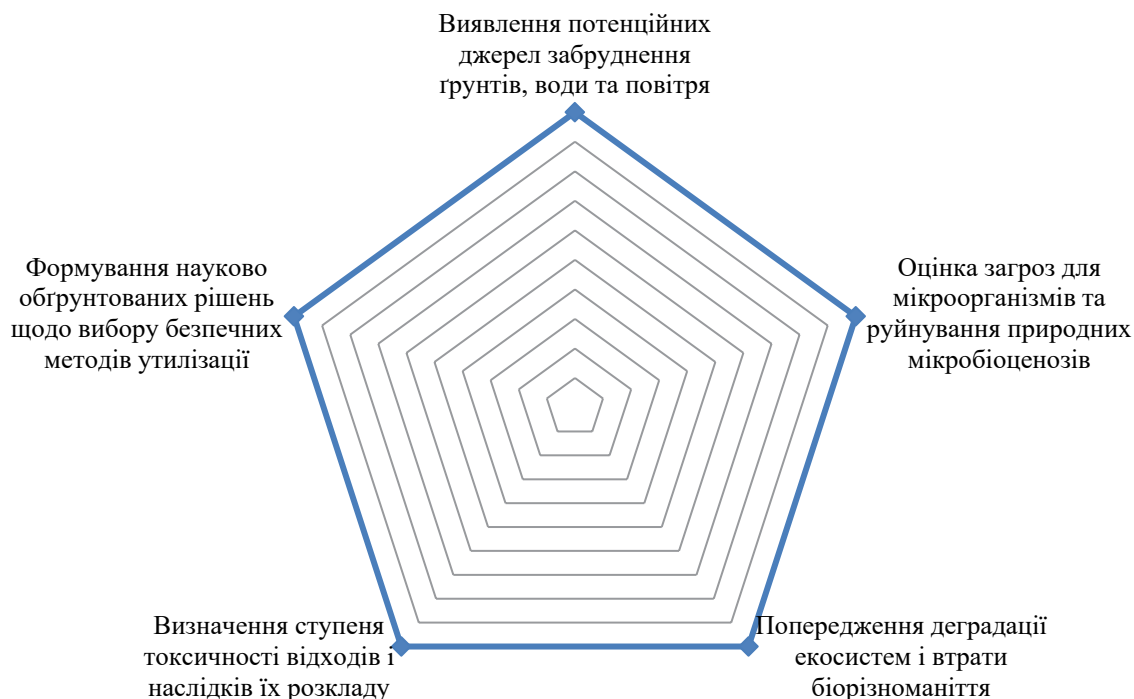


Рис. 1. Основні причини проведення екологічної оцінки впливу способів поводження з відходами на довкілля

полігони. Водночас при недотриманні температурного або вологості режиму компост може стати джерелом інфекцій або летких органічних сполук що мають негативний вплив на здоров'я людей (табл. 1).

Цифровізація значно посилила ефективність оцінювання впливу способів поводження з відходами на довкілля, відкривши нові можливості для моніторингу та аналізу мікробіологічних процесів. Завдяки використанню сенсорних систем, супутникових знімків, автоматизованих станцій спостереження та програмного забезпечення для обробки великих даних стало можливим у режимі реального часу відстежувати зміну складу мікроорганізмів у ґрунті й воді, виявляти токсичні забруднення та моделювати вплив різних сценаріїв утилізації на екологічну рівновагу. Біоінформатика та цифрові бази даних дозволяють швидко ідентифікувати патогенні штами, а також оцінити адаптаційні механізми природних мікробіоценозів у відповідь на різні типи відходів. Внаслідок цього цифрові технології стали критично важливими інструментами не лише в прогнозуванні екологічних ризиків, але й у розробці біологічно безпечних методів утилізації з урахуванням біоактивності довкілля (табл. 2).

Отже біологічний аспект оцінювання впливу поводження з відходами на довкілля дозволяє виявити критичні точки у функціонуванні природних систем та запропонувати ефективні рішення на основі підтримки мікробної рівноваги. Саме мікроорганізми є індикаторами екологічного благополуччя території а також агентами відновлення і очищення. Їхня чутливість до змін навколишнього середовища дозволяє оцінювати якість води, ґрунтів і повітря. У зв'язку з цим інтеграція мікробіологічного моніторингу в стратегії поводження з відходами є не лише актуальним завданням але й запорукою сталого розвитку екосистем.

Головні висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що способи поводження з відходами мають глибокий і багатовекторний вплив на довкілля, особливо через зміну структури та активності мікроорганізмів. Визначено, що саме мікробіота ґрунтів і водних екосистем першою реагує на токсичні впливи, порушення балансу органіки та наявність важких металів, пластиків чи агресивних сполук у відходах. Охарактеризовано, що пригнічення природної мікрофлори веде до порушення біогеохімічних циклів, деградації родючості ґрунтів, зниження здатності водойм до самоочищення та

Таблиця 1

Вплив поводження з відходами на водне середовище та мікробіоценози

Проблема або явище	Біологічна реакція мікроорганізмів	Можливий екологічний наслідок
Інфільтрація фільтратів і стічні води	Активізація анаеробного розкладу	Зниження вмісту кисню, розвиток анаеробних умов
Надлишок фосфатів і органіки	Масове розмноження водоростей і бактерій	Цвітіння води, загибель риби, порушення трофічних ланцюгів
Порушення трофічної рівноваги	Зміна складу мікробіоценозів, зникнення чутливих видів	Деградація екосистем, незворотні біологічні зрушення
Компостування та біоконверсія	Стимуляція корисної мікрофлори, вироблення гумусу	Відновлення ґрунтів, зменшення потреби в полігонах
Неправильні умови компостування	Поява патогенів, утворення летких органічних речовин	Потенційна загроза здоров'ю людей, додаткове забруднення повітря

Таблиця 2

Напрямки застосування цифрових технологій для оцінювання впливу поводження з відходами на довкілля

Цифрова технологія	Можливості застосування в екологічному оцінюванні
Сенсорні моніторингові системи	Фіксація концентрацій шкідливих речовин у ґрунті, повітрі та воді в реальному часі
Біоінформатика та моделювання мікробіоценозів	Аналіз змін у структурі мікроорганізмів під впливом токсинів або змін вологості, рН та температури
Геоінформаційні системи (GIS)	Картографування екологічно небезпечних зон з урахуванням джерел відходів та локальної біоактивності
Штучний інтелект і машинне навчання	Прогнозування ризиків деградації довкілля та автоматизований аналіз великих екологічних і мікробіологічних баз даних
Супутникові дані та дистанційне зондування Землі	Виявлення змін у рослинному покриві, вологості ґрунтів і якості води, пов'язаних із накопиченням відходів

активізації патогенних мікроорганізмів. Доведено, що органічні та біологічні методи утилізації відходів, за умови науково обґрунтованого підходу, сприяють відновленню мікроорганізмів і мінімізації екологічних ризиків.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані для підвищення рівня екологічної безпеки та

задоволення інформаційних потреб основних суб'єктів здійснення екологічної оцінювання.

Перспективи подальших досліджень. У подальших наукових розвідках доцільно зосередити увагу на глибшому вивченні конкретних штамів мікроорганізмів, які здатні до біодеструкції небезпечних сполук із відходів, та створенні мікробіологічних карт забруднених територій.

Література

1. Купалова, Г., Гончаренко, Н., Андрусів, У., Олешко, Є., & Демченко, К. Екологічна модернізація виробництва в забезпеченні інноваційного розвитку промислових підприємств. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 1(60), 2025, 512–521. <https://doi.org/10.55643/fcaptr.1.60.2025.4606>
2. Карбовська, Л., Мазур, Ю., Железняк, К., Козлова, А., Мельник, Б., & Скрипцов, С. Формування системи управління відходами в аграрному секторі економіки України: організаційний та фінансовий аспекти. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 5(58), 2024, 367–379. <https://doi.org/10.55643/fcaptr.5.58.2024.4462>
3. Хільчевський В.К., Забокрицька М.Р., Кравчинський Р.Л. Екологічна стандартизація та запобігання впливу відходів на довкілля. К.: ВПЦ «Київський університет». 2016. 192 с.
4. Горбаль Н., Адамів М., Чумак А. Адаптування принципів циркулярної економіки до управління відходами в Україні. Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Проблеми економіки та управління». 2020; Вип. 4, № 1. С. 159-166. <https://doi.org/10.23939/semi2020.01.159>
5. Колодійчук І. А. Формування територіально збалансованих систем управління відходами: регіональний вимір : монографія. Львів : ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України», 2020. 524 с.
6. Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Губанова О. Р., Приходько В. Ю. Небезпечна складова твердих побутових відходів: класифікація та проблема поводження. Зб. наук. праць V Всеукр. з'їзду екологів з міжнародною участю. Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2015. С. 27.
7. Залознова, Ю., Сердюк, О., & Петрова, І. Інтерналізація негативних зовнішніх ефектів промислового виробництва. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 4(51), 2023, 368–382. <https://doi.org/10.55643/fcaptr.4.51.2023.4070>
8. Маковецька Ю. М. Поточний стан адаптації українського законодавства до європейського у сфері управління відходами. *Ефективна економіка*. 2022. № 5. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2022.5.84>
9. Михайлова Є.О., Панчева Г.М., Резніченко Г.М. Ефективні механізми поводження з твердими побутовими відходами в Україні. *Комунальне господарство міст*, 2019, том 5, випуск 151, с. 37-44. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-5-151-37-44>
10. Криштанович, М., & Силкін, О. Оцінювання стратегічних напрямів реалізації державно-приватного партнерства в царині безпечного розвитку агропромислового сектора. *Socio-Economic Relations in the Digital Society*, 1(55), 2025, 44-55. <https://doi.org/10.55643/ser.5.55.2025.587>

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації: