УДК 631.46:504.5:574.24
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.27

БІОІНДИКАЦІЙНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ҐРУНТОВИХ МІКРООРГАНІЗМІВ У СИСТЕМІ ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ НА ТЕХНОГЕННО ТРАНСФОРМОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Панас Н.Є. (orcid.org/0000-0003-3737-6338)
Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнології імені С.З. Гжицького
вул. Пекарська, 50, 79000, м. Львів
panas.natalia.edu@gmail.com

Метою статті є наукове обґрунтування біоіндикаційного потенціалу ґрунтових мікроорганізмів у системі оцінювання забруднення ґрунту на техногенно трансформованих територіях та формування послідовності використання мікробіологічних показників для раннього виявлення негативних змін стану ґрунтового середовища. Об'єктом дослідження виступають структурні, функціональні, біохімічні та молекулярні характеристики ґрунтових мікробних угруповань, чутливі до дії важких металів, нафтопродуктів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, техногенного засолення й змішаного забруднення. Дослідження має оглядово-аналітичний характер і ґрунтується на порівнянні та систематизації результатів наукових праць, у яких мікробна біомаса, інтенсивність дихання, метаболічний коефіцієнт, ферментативна активність, чисельність окремих еколого-трофічних груп, таксономічна різноманітність та молекулярні маркери використовуються для характеристики порушених ґрунтів. Встановлено, що мікроорганізми здатні реагувати на техногенне навантаження раніше, ніж зміни стають очевидними за морфологічними ознаками ґрунту або рослинного покриву, однак інформативність окремого показника істотно залежить від кислотності, вологості, гранулометричного складу, вмісту органічної речовини та сезону відбору проб. Обґрунтовано необхідність поєднання показників, які характеризують кількість мікробної біомаси, її метаболічну активність, виконання біогеохімічних функцій і перебудову структури мікробіому. Запропоновано систематизацію біоіндикаторів за чотирма групами, а саме кількісними, функціонально-біохімічними, структурними та молекулярно-генетичними. Розроблено послідовність оцінювання, що повинна передбачати вибір референтної ділянки, одночасне визначення фізико-хімічних характеристик і забруднювачів, базове мікробіологічне тестування, оцінку ферментативної та метаболічної активності, молекулярне уточнення змін і комплексну інтерпретацію результатів. Наукова новизна полягає у формуванні системи взаємодоповнювальних критеріїв, яка дозволяє розглядати ґрунтові мікроорганізми як індикатори фактичного біологічного ефекту забруднення, а не як допоміжну характеристику хімічного аналізу. Практичне значення отриманих результатів пов'язане з можливістю використання запропонованої послідовності під час екологічного моніторингу промислових зон, територій видобування корисних копалин, транспортних вузлів, полігонів відходів, урбанізованих земель та інших ділянок із тривалим або комбінованим техногенним навантаженням. *Ключові слова*: ґрунтові мікроорганізми, біоіндикація, забруднення ґрунту, техногенно трансформовані території, мікробіоценоз, ферментативна активність, важкі метали, мікробіом, екологічний моніторинг, біологічна активність ґрунту

Bioindication potential of soil microorganisms in the system for assessing soil contamination in technogenically transformed territories. Panas N.

The purpose of the article is to scientifically substantiate the bioindication potential of soil microorganisms in the system for assessing soil contamination in technogenically transformed territories and to form a sequence for using microbiological indicators for the early detection of adverse changes in the soil environment. The object of the study is the structural, functional, biochemical and molecular characteristics of soil microbial communities that are sensitive to heavy metals, petroleum products, polycyclic aromatic hydrocarbons, technogenic salinisation and mixed contamination. The study is review-based and analytical and relies on the comparison and systematisation of peer-reviewed research in which microbial biomass, respiration intensity, the metabolic quotient, enzymatic activity, abundance of ecological and trophic microbial groups, taxonomic diversity and molecular markers are used to characterise disturbed soils. It is established that microorganisms may respond to technogenic pressure before changes become clearly visible from soil morphology or vegetation characteristics. At the same time, the diagnostic value of an individual microbial parameter is strongly affected by soil acidity, moisture, particle-size composition, organic matter content and sampling season. The study substantiates the need to combine indicators describing the amount of microbial biomass, its metabolic activity, the performance of biogeochemical functions and changes in microbiome structure. Bioindicators are systematised into four groups comprising quantitative, functional-biochemical, structural and molecular-genetic indicators. A stepwise assessment procedure is proposed. It should include the selection of a reference site, simultaneous determination of physicochemical soil properties and contaminants, basic microbiological testing, assessment of enzymatic and metabolic activity, molecular verification of community shifts, and integrated interpretation of the results. The scientific novelty lies in forming a system of complementary criteria that enables soil microorganisms to be considered indicators of the actual biological effect of contamination rather than an auxiliary characteristic of chemical analysis. The practical significance of the results is associated with the possibility of applying the proposed sequence to environmental monitoring of industrial zones, mining

© Панас Н.Є., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

areas, transport hubs, waste disposal sites, urban lands and other territories subjected to long-term or combined technogenic pressure. The proposed approach can improve the ecological interpretation of monitoring data, reveal early-stage biological stress and support the selection of priorities for remediation and further observation. *Key words*: soil microorganisms, bioindication, soil contamination, technogenically transformed territories, microbiocenosis, enzymatic activity, heavy metals, microbiome, environmental monitoring, soil biological activity

Постановка проблеми. Техногенна трансформація територій супроводжується надходженням у ґрунт важких металів, нафтопродуктів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, солей, продуктів горіння, дрібнодисперсного пилу та інших сполук, здатних тривалий час зберігатися у ґрунтовому профілі. Традиційна оцінка забруднення переважно спирається на визначення концентрацій хімічних речовин та їх порівняння з нормативними або фоновими значеннями. Такий підхід надає необхідну інформацію про наявність полютанта, однак не завжди характеризує його біодоступність, сумарну дію декількох забруднювачів і фактичну реакцію живої складової ґрунту. Ґрунтові мікроорганізми безпосередньо контактують із забруднювачами, беруть участь у трансформації органічної речовини та елементів живлення і швидко реагують на зміну фізико-хімічних умов. Саме тому їх чисельність, активність, структура угруповань та функціональні ознаки можуть бути використані для раннього виявлення деградаційних процесів і доповнення хімічного контролю біологічною інформацією [1–3].

Актуальність дослідження. Потреба у біологічно орієнтованому оцінюванні стану ґрунтів зростає разом із розширенням площ промислово порушених, урбанізованих, транспортно навантажених і рекультивованих земель. Техногенно трансформований ґрунт являється відкритою природною системою, у якій дія полютантів поєднується зі змінами кислотності, вологості, аерації, вмісту органічної речовини та рослинного покриву. При такого роду умовах однакова валова концентрація металу або органічного забруднювача може формувати різний біологічний ефект. Дослідження біомаси, дихання, ферментативної активності та структури мікробних угруповань дозволяє оцінити результат такої комплексної дії. Підтверджено, що мікробіологічні характеристики чутливо реагують на забруднення важкими металами, а одночасне використання структурних і функціональних показників суттєво підвищує інформативність оцінювання [3–6]. Разом із цим розвиток високопродуктивного секвенування та підходів meta-omics розширює можливості виявлення змін у мікробіомі, які неможливо повністю охарактеризувати культуральними методами [7].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. Дослідження відповідає сучасним завданням екологічного моніторингу та оцінки впливу антропогенних чинників на наземні екосистеми. Його спрямування узгоджується з необхідністю вдосконалення методів виявлення екотоксикологічних наслідків забруднення, оцінювання здатності ґрунту зберігати біогеохімічні функції та формування наукового підґрунтя для вибору способів відновлення порушених територій. Для практичного моніторингу особливо важливо отримувати інформацію про біологічний ефект забруднення на ранній стадії, коли деградаційні зміни ще можуть бути локалізовані або компенсовані за рахунок рекультиваційних та біоремедіаційних заходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика використання мікроорганізмів як індикаторів якості ґрунту має розвинене наукове підґрунтя. Т. Ф. Яковишина [1] обґрунтувала доцільність застосування окремих груп мікроорганізмів у біоіндикації забруднення ґрунтів важкими металами та показала зв'язок між мікробіологічними характеристиками і токсичним навантаженням. M. Schloter, P. Nannipieri, S. J. Sørensen та J. D. van Elsas [2] розглядають мікробні характеристики як важливу складову оцінювання якості ґрунту, наголошуючи на потребі пов'язувати таксономічну інформацію з функціональними процесами. У ґрунтовому моніторингу важких металів особливе значення має робота J. Tang та співавторів [3], у якій систематизовано мікробіологічні індекси діагностики забруднення та показано, що реакція мікробної біомаси, дихання, ферментів і структури угруповань змінюється залежно від типу металу й властивостей ґрунту. Експериментальні результати Y. P. Wang та співавторів [4] засвідчили зменшення мікробної біомаси й активності ферментів поблизу мідеплавильного виробництва, що підтверджує чутливість функціональних показників до промислового навантаження. C. Fajardo та співавтори [5] продемонстрували доцільність паралельного оцінювання структурних і функціональних змін мікробіому за забруднення Pb, Cd і Zn. Узагальнення D. Bhaduri та співавторів [6] охоплює мікробну біомасу, дихання, ферментативну активність, молекулярні маркери та аналіз мікробних спільнот як систему біоіндикаторів для деградованих і забруднених ґрунтів. C. Djemiel та співавтори [7] показали, що metabarcoding, metagenomics та інші meta-omics підходи надають можливість формувати сучасні показники біологічної якості ґрунту, хоча окремі методи ще потребують стандартизації для рутинного моніторингу. M. Xu та співавтори [8] встановили зміни співвідношення ферментативних процесів за дії важких металів і обґрунтували використання екологічної стехіометрії ферментів для оцінки ресурсних обмежень мікроорганізмів. Результати C. Su та співавторів [9] на територіях із вугільно-промисловим

навантаженням підтвердили виражені зміни бактеріальних і грибних угруповань, а також активності ґрунтових ферментів під впливом важких металів. На техногенно трансформованій міській території колишнього промислового використання M. P. Mejia та співавтори [10] застосували підходи eDNA для характеристики мікробіому ґрунту з комбінованим забрудненням важкими металами, нафтовими вуглеводнями та іншими речовинами. N. Chowdhury та M. M. Rasid [11] також підтвердили зв'язок між концентраціями важких металів та мікробною й ферментативною активністю ґрунтів. Окремий напрям представлений дослідженнями індикаторних фенотипових реакцій мікроорганізмів. К. С. Крупєй, О. Ф. Рильський, Н. Л. Количева та О. Д. Бобровська [12] довели придатність змін пігментоутворення дріжджів для біоіндикації солей Купруму, що додатково підтверджує можливість використання чутливих метаболічних ознак мікроорганізмів під час екотоксикологічного контролю. Отже, наукові публікації підтверджують значний потенціал мікроорганізмів, однак питання поєднання різних груп показників у єдиній послідовності оцінювання техногенно трансформованих ґрунтів потребує подальшого опрацювання.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наявні дослідження не формують універсального одиничного мікробіологічного показника, придатного для всіх типів ґрунтів і забруднювачів. Кількість мікроорганізмів може знижуватися внаслідок токсичної дії, але в окремих випадках зростає через розвиток толерантних популяцій. Інтенсивність дихання також не має однозначного трактування, оскільки її підвищення може відображати активне використання доступного субстрату або стресові витрати енергії. Зниження ферментативної активності є чутливим сигналом, проте окремі ферменти по-різному реагують на концентрацію металів, кислотність і вміст органічного вуглецю. Молекулярні методи детально характеризують структуру мікробіому, але потребують порівняння з референтними ґрунтами й функціональними тестами. Відтак, невирішеною частиною проблеми постає формування узгодженої системи оцінювання, яка повинна охоплювати декілька рівнів мікробної реакції та одночасно враховувати природні властивості ґрунту.

Новизна. а основі узагальнення сучасних досліджень систематизовано біоіндикаційні характеристики ґрунтових мікроорганізмів за чотирма взаємопов'язаними групами, а саме кількісними, функціонально-біохімічними, структурними та молекулярно-генетичними. Запропоновано послідовність їх застосування для техногенно трансформованих територій, у якій мікробіологічний результат зіставляється з референтною ділянкою, фізико-хімічними властивостями ґрунту та профілем забруднювачів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологія дослідження включає аналіз і синтез для узагальнення результатів мікробіологічних та екотоксикологічних досліджень, порівняння для встановлення переваг і обмежень окремих біоіндикаторів, систематизацію для групування показників за характером реакції, а також абстрактно-логічний метод для формування послідовності комплексного оцінювання. Загальнонаукове значення полягає у переході від ізольованого трактування окремого мікробіологічного показника до багаторівневої характеристики біологічної відповіді ґрунту.

Виклад основного матеріалу. Ґрунт являється середовищем із високою просторовою неоднорідністю, тому забруднення в ньому формується як поєднання хімічної присутності полютанта, його доступності для організмів і реакції біологічної складової. Мікроорганізми займають особливе місце в цій системі, оскільки мають короткі генераційні цикли, значну площу контакту з ґрунтовим розчином і високу метаболічну пластичність. Їхня реакція проявляється у зміні кількості клітин, співвідношення еколого-трофічних груп, швидкості дихання, активності ферментів, структури бактеріальних і грибних спільнот, поширеності генів стійкості та інтенсивності окремих метаболічних процесів. При цьому стійкі таксони можуть накопичуватися у забрудненому ґрунті, тоді як чутливі форми зникають або втрачають функціональну активність. Саме поєднання пригнічення, селекції та адаптації формує біоіндикаційний сигнал, який необхідно трактувати комплексно [2–7].

Першою групою показників є кількісні характеристики. До них належать мікробна біомаса, загальна чисельність культивованих бактерій і грибів, а також чисельність окремих еколого-трофічних груп. Зниження мікробної біомаси за високого токсичного навантаження є одним із найбільш відтворюваних сигналів, особливо на територіях металургійного та гірничодобувного впливу [3, 4, 11]. Водночас кількість колонієутворювальних одиниць не повинна використовуватися як самодостатній критерій. Культуральні методи охоплюють лише частину ґрунтового мікробіому, а зростання чисельності окремих груп може бути наслідком селекції стійких організмів. Тому кількісні показники повинні формувати початковий рівень діагностики, який далі доповнюється функціональними ознаками. Другою групою постають функціонально-біохімічні показники. Базальне дихання характеризує загальну метаболічну активність, а метаболічний коефіцієнт, що виражає співвідношення дихання до мікробної біомаси, може вказувати на підвищені енергетичні витрати мікроорганізмів за стресових умов. Особливу діагностичну цінність має активність дегідрогеназ, уреази, фосфатаз, β-глюкозидази, каталази та інших ферментів, пов'язаних із циклами вуглецю, азоту й фосфору. Важкі метали здатні взаємодіяти з ферментативними

системами, змінювати проникність мембран і посилювати оксидативний стрес, що відображається у зменшенні інтенсивності окремих біохімічних процесів [4, 8, 9]. За комбінованого забруднення важливо оцінювати декілька ферментів, оскільки їх різноспрямована реакція дозволяє точніше відокремити токсичне пригнічення від природної мінливості. Третя група охоплює структурні характеристики мікробіоценозу. До них належать співвідношення бактерій і грибів, різноманітність таксонів, відносна чисельність домінантних груп та зміни структури спільноти за даними фосфоліпідних жирних кислот, 16S rRNA, ITS та інших маркерів. Структурна перебудова є особливо інформативною для територій із тривалим техногенним навантаженням, де первинне пригнічення з часом змінюється формуванням адаптованого мікробіому. Дослідження промислових і міських забруднених територій показують, що тривала дія металів та органічних полютантів формує специфічний склад угруповань і підвищує частку толерантних таксонів [5, 9, 10]. Така адаптація не повинна автоматично трактуватися як відновлення ґрунту, оскільки висока стійкість окремих популяцій може поєднуватися зі зменшенням функціонального різноманіття. Четверта група включає молекулярно-генетичні показники. Metabarcoding дозволяє характеризувати таксономічний склад, metagenomics надає інформацію про функціональний потенціал мікробіому, а metatranscriptomics і metaproteomics можуть відображати активні процеси. Для техногенно трансформованих територій перспективним являється аналіз генів стійкості до металів, генів трансформації забруднювачів та функціональних маркерів біогеохімічних циклів. Однак висока деталізація молекулярних даних не скасовує потреби у базових фізико-хімічних і біохімічних тестах. Як наголошується у сучасних оглядах, практичне використання meta-omics повинно супроводжуватися розвитком референтних баз даних і стандартизацією процедур відбору, зберігання та обробки проб [7].

Порівняння груп показників в табл. 1 показує, що біоіндикація повинна бути багаторівневою. Кількісна реакція надає швидкий сигнал, функціональні тести характеризують збереження екологічних процесів, структурні характеристики показують напрям перебудови спільноти, а молекулярні методи розкривають механізми адаптації. На нашу думку, найбільшу практичну цінність для рутинного моніторингу має поєднання мікробної біомаси, дихання, 2–4 ферментативних тестів та одного показника структури мікробного угруповання. Молекулярно-генетичні методи доцільно залучати для ділянок із невизначеним характером впливу, комбінованим забрудненням або необхідністю встановлення механізмів стійкості.

Характер мікробної відповіді залежить від типу техногенного навантаження. Важкі метали переважно формують тривалий селективний тиск, який змінює біомасу, ферментативну активність і структуру спільнот. Нафтопродукти та поліциклічні ароматичні вуглеводні можуть пригнічувати чутливі групи, водночас створюючи субстрат для розвитку спеціалізованих деструкторів. Техногенне засолення та зміна pH обмежують осмотично чутливі

Таблиця 1

Групи мікробіологічних показників та їх біоіндикаційне значення

Група показників	Основні характеристики	Аспекти
Кількісні	Мікробна біомаса C, загальна чисельність бактерій і грибів, чисельність амоніфікаторів, нітрифікаторів, фосфатмобілізувальних та інших еколого-трофічних груп	Зменшення біомаси і чисельності чутливих груп відображає токсичне пригнічення. Зростання частки окремих груп може свідчити про селекцію толерантних популяцій або зміну доступності субстратів
Функціонально-біохімічні	Базальне і субстрат-індуковане дихання, метаболічний коефіцієнт, дегідрогеназна, уреазна, фосфатазна, β-глюкозидазна, каталазна активність, потенційна нітрифікація	Дозволяють визначити, наскільки збережена здатність мікробіоценозу забезпечувати трансформацію органічної речовини та кругообіг елементів. Підвищений метаболічний коефіцієнт може характеризувати стресові енергетичні витрати
Структурні	Співвідношення бактерій і грибів, PLFA-профіль, α- і β-різноманітність, структура бактеріальних та грибних угруповань за 16S rRNA й ITS, відносна чисельність толерантних і чутливих таксонів	Відображають перебудову мікробіоценозу під тривалим техногенним тиском, втрату чутливих груп і формування угруповань із підвищеною стійкістю до забруднювачів
Молекулярно-генетичні	Metabarcoding, metagenomics, metatranscriptomics, функціональні гени циклів C, N, P, гени стійкості до металів та органічних полютантів, маркери біодеградації	Дозволяють виявляти приховані зміни функціонального потенціалу, механізми адаптації та поширення генетично закріпленої стійкості. Формують деталізований профіль реакції мікробіому

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

популяції і змінюють доступність металів. Змішане забруднення ускладнює причинно-наслідкову інтерпретацію, тому повинно оцінюватися за сукупністю біологічних та фізико-хімічних характеристик.

Відтак, на табл. 2 узагальнено типові напрями реакції, але вони не повинні використовуватися як жорсткі порогові значення. Біоіндикація має порівняльний характер. Найбільш коректною основою є референтна ділянка зі схожим типом ґрунту, гранулометричним складом, положенням у рельєфі та режимом зволоження, але без безпосереднього джерела техногенного впливу. Якщо природний аналог відсутній, доцільно використовувати градієнт відстані від джерела або архівні дані моніторингу. Така побудова повинна зменшувати ризик віднесення природної відмінності ґрунтів до наслідків забруднення.

Окреме значення має нормування мікробіологічних результатів. Абсолютні значення біомаси або ферментативної активності суттєво відрізняються між типами ґрунтів. Тому практична оцінка повинна передбачати розрахунок відносної зміни щодо референтного значення за однакової методики. Наприклад, пригнічення ферментативної активності доцільно подавати у відсотках від контролю, а структурні зміни характеризувати через показники різноманіття та відстані між угрупованнями. Водночас збільшення показника не завжди означає покращення. Підвищене дихання за одночасного зменшення біомаси може відображати стрес, а зростання частки резистентних таксонів може свідчити про сильний селективний тиск. Відтак, комплексне трактування повинно виходити з узгодженості декількох реакцій.

Для практичного використання біоіндикаційного потенціалу ґрунтових мікроорганізмів запропоновано послідовність оцінювання, представлену в табл. 3. Її принциповою особливістю є поетапність. На першому етапі формується коректна база порівняння, далі встановлюється профіль забруднювачів і природних властивостей ґрунту, після чого здійснюється мікробіологічний скринінг. Поглиблені структурні та молекулярні методи залучаються до тих ділянок, де базові показники демонструють найбільше відхилення або різноспрямовану реакцію. Така траєкторія повинна сприяти раціональному використанню лабораторних ресурсів та одночасно зберігати достатню екологічну інформативність.

Запропонована послідовність особливо придатна для територій, де забруднення має тривалий характер або формується декількома джерелами. На промислових майданчиках це можуть бути ділянки біля складів сировини, зон розвантаження, шламонакопичувачів та місць осідання пилу. На територіях видобування корисних копалин доцільно порівнювати відвали, зони підніжжя, рекультивовані площі та умовно фонові ділянки. У транспортних вузлах доцільним є градієнт від найбільш навантажених смуг до територій із нижчим рівнем впливу. На полігонах відходів необхідно враховувати можливе надходження фільтрату та просторову неоднорідність органічного навантаження. У кожному випадку мікробіологічний моніторинг повинен бути прив'язаний до конкретного зовнішнього техногенного середовища та джерела впливу.

Важливою перевагою мікробних індикаторів є можливість застосування під час оцінки віднов-

Таблиця 2

Типові напрями реакції ґрунтових мікроорганізмів на техногенні чинники

Техногенний чинник	Механізм впливу	Очікувана мікробіологічна реакція
Важкі метали та металоїди	Зв'язування з клітинними структурами і ферментами, оксидативний стрес, порушення мембранного транспорту, селекція популяцій із механізмами резистентност	Зменшення мікробної біомаси і ферментативної активності за високих концентрацій, зміна структури бактерій і грибів, зростання частки толерантних таксонів, зміни метаболічного коефіцієнта
Нафтопродукти та поліциклічні ароматичні вуглеводні	Токсична дія ароматичних і легких фракцій поєднується з використанням частини вуглеводнів спеціалізованими мікроорганізмами як джерела вуглецю	Зниження різноманіття чутливих груп, тимчасове збільшення дихання, накопичення вуглеводень-деструкторів, перебудова бактеріально-грибного співвідношення
Техногенне засолення, лужний або кислий зсув	Осмотичний стрес і зміна кислотності впливають на мембранні процеси, доступність елементів живлення і рухомість токсичних металів	Зменшення активності чутливих груп, селекція гало- або ацидотолерантних мікроорганізмів, зміни нітрифікації та активності ферментів
Відвали, хвостосховища, промисловий пил	Механічна трансформація ґрунту поєднується з дефіцитом органічної речовини, екстремальними значеннями pH, металами та порушеним водним режимом	Низька біомаса, збіднення функціонального різноманіття, домінування стресостійких популяцій, нестійке відновлення після рекультивації
Змішане техногенне забруднення	Одночасна дія металів, органічних полютантів, солей і змінених фізичних властивостей формує синергічні або антагоністичні ефекти	Різноспрямовані реакції окремих показників, підвищена метаболічна напруга, нестабільність функцій, формування специфічного адаптованого мікробіому

Таблиця 3

Запропонована послідовність використання ґрунтових мікроорганізмів у системі оцінювання забруднення

Етап	Зміст робіт
1. Формування референтної основи	Вибір контрольної або умовно фонової ділянки зі схожими ґрунтовими характеристиками. Визначення глибини відбору, сезону, кількості повторень і просторової схеми пробовідбору
2. Хімічна і фізико-хімічна характеристика	Визначення пріоритетних забруднювачів, pH, електропровідності, вологості, органічного C, основних елементів живлення та інших параметрів, здатних впливати на мікробну активність
3. Базовий мікробіологічний скринінг	Оцінка мікробної біомаси, базального дихання, загальної чисельності та 1–3 функціонально значущих еколого-трофічних груп. Розрахунок відносного відхилення від референтної ділянки
4. Функціонально-біохімічна діагностика	Визначення декількох ферментів, пов'язаних із різними біогеохімічними циклами, та показників метаболічної ефективності. Вибір ферментів залежить від типу забруднення і властивостей ґрунту
5. Структурне та молекулярне уточнення	Застосування PLFA, 16S rRNA, ITS, metabarcoding, metagenomics або цільових функціональних генів на ділянках із найбільшими чи суперечливими змінами
6. Комплексна екологічна інтерпретація	Зіставлення хімічних концентрацій, властивостей ґрунту та набору мікробіологічних реакцій. Виділення ділянок із раннім стресом, вираженим функціональним порушенням, адаптаційною перебудовою або ознаками відновлення

лення. Після рекультивації зниження концентрації доступних форм забруднювачів повинно супроводжуватися відновленням мікробної біомаси, нормалізацією дихання, збільшенням ферментативної активності та поступовим наближенням структури спільноти до референтного стану. Якщо хімічні показники покращуються, але функціональна активність залишається пригніченою, екологічне відновлення не може вважатися завершеним. Разом із цим швидке зростання біомаси за збереження низького різноманіття також потребує обережного трактування. Тому повторні спостереження повинні формувати часовий ряд, який дозволить розрізняти короткочасну реакцію та стійку тенденцію до відновлення. Суттєвим обмеженням біоіндикації залишається методична варіабельність. Результати залежать від глибини та способу відбору, часу зберігання, температури транспортування, підготовки зразків і лабораторної процедури. Для молекулярних досліджень додатково важливими є спосіб екстракції ДНК, вибір праймерів, платформа секвенування та біоінформатичний протокол [7]. Саме тому система моніторингу повинна передбачати незмінність методики в межах одного часово-просторового ряду. Порівняння між різними територіями доцільно здійснювати за стандартизованими процедурами або після відповідної нормалізації даних.

Таким чином, біоіндикаційний потенціал ґрунтових мікроорганізмів полягає у здатності одночасно відображати токсичний ефект, функціональне порушення, селективну перебудову та адаптацію мікробіоценозу. Хімічний аналіз визначає, які речовини і в якій кількості присутні у ґрунті, а мікробіологічна оцінка показує, яким є біологічний наслідок їх присутності. Поєднання цих двох напрямів надає більш повну характеристику техногенно трансформованої території та повинно сприяти обґрунтованому вибору подальших природоохоронних заходів.

Головні висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що ґрунтові мікроорганізми мають високий біоіндикаційний потенціал у системі оцінювання техногенного забруднення, оскільки швидко реагують на зміну доступності забруднювачів, кислотності, сольового режиму та інших параметрів ґрунтового середовища. Найбільш інформативним є поєднання чотирьох груп показників, які характеризують кількість мікробної біомаси, функціонально-біохімічну активність, структуру мікробіоценозу та молекулярно-генетичні ознаки. Доведені в науковій літературі реакції на важкі метали включають зменшення біомаси й активності ферментів, зміну дихання, перебудову бактеріальних і грибних угруповань та селекцію толерантних популяцій. Визначено, що одиничний показник має обмежену діагностичну цінність, оскільки його зміна залежить від природних властивостей ґрунту та може мати декілька біологічних причин. Запропонована послідовність оцінювання повинна передбачати формування референтної основи, одночасну фізико-хімічну характеристику, базовий мікробіологічний скринінг, функціональну діагностику, структурне або молекулярне уточнення й комплексну інтерпретацію. Такий підхід дозволяє виявляти ранній біологічний стрес, встановлювати ступінь порушення екологічних функцій та оцінювати напрям відновлення ґрунту після природоохоронних заходів.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати можуть бути використані під час розроблення програм локального екологічного

моніторингу промислових зон, гірничодобувних територій, міських територій колишнього промислового використання, транспортних вузлів, полігонів відходів та рекультивованих земель. Запропонована система показників надає можливість формувати пріоритетність ділянок для поглибленого аналізу, контролювати ефективність рекультивації та обґрунтовувати потребу у біоремедіації. Перспективи подальших досліджень пов'язані з експериментальною апробацією запропонованої послідовності на різних типах ґрунтів нашої країни, визначенням найбільш стабільних комбінацій мікробіологічних показників для окремих типів техногенного навантаження та формуванням референтних діапазонів з урахуванням сезонності й ґрунтово-кліматичних особливостей.

Література

1. Яковишина Т. Ф. Використання мікроорганізмів, як біоіндикаторів забруднення важкими металами, в системі екологічного моніторингу ґрунтів. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Агрономія і біологія». 2012. Вип. 2. С. 197–201. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vsna_agro_2012_2_44.
2. Schloter M., Nannipieri P., Sørensen S. J., van Elsas J. D. Microbial indicators for soil quality. Biology and Fertility of Soils. 2018. Vol. 54, No. 1. P. 1–10. DOI: https://doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3.
3. Tang J., Zhang J., Ren L., Zhou Y., Gao J., Luo L., Yang Y., Peng Q., Huang H., Chen A. Diagnosis of soil contamination using microbiological indices: A review on heavy metal pollution. Journal of Environmental Management. 2019. Vol. 242. P. 121–130. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.061.
4. Wang Y. P., Shi J. K., Wang H., Lin Q., Chen X. C., Chen Y. X. The influence of soil heavy metals pollution on soil microbial biomass, enzyme activity, and community composition near a copper smelter. Ecotoxicology and Environmental Safety. 2007. Vol. 67, No. 1. P. 75–81. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2006.03.007.
5. Fajardo C., Costa G., Nande M., Botías P., García-Cantalejo J., Martín M. Pb, Cd, and Zn soil contamination: Monitoring functional and structural impacts on the microbiome. Applied Soil Ecology. 2019. Vol. 135. P. 56–64. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.10.022.
6. Bhaduri D., Sihi D., Bhowmik A., Verma B. C., Munda S., Dari B. A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. Article 938481. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938481.
7. Djemiel C., Dequiedt S., Karimi B., Cottin A., Horrigue W., Bailly A., Boutaleb A., Sadet-Bourgeteau S., Maron P.-A., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L., Terrat S. Potential of Meta-Omics to Provide Modern Microbial Indicators for Monitoring Soil Quality and Securing Food Production. Frontiers in Microbiology. 2022. Vol. 13. Article 889788. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.889788.
8. Xu M., Cui Y., Beiyuan J., Wang X., Duan C., Fang L. Heavy metal pollution increases soil microbial carbon limitation: Evidence from ecological enzyme stoichiometry. Soil Ecology Letters. 2021. Vol. 3. P. 230–241. DOI: https://doi.org/10.1007/s42832-021-0094-2.
9. Su C., Xie R., Liu D., Liu Y., Liang R. Ecological Responses of Soil Microbial Communities to Heavy Metal Stress in a Coal-Based Industrial Region in China. Microorganisms. 2023. Vol. 11, No. 6. Article 1392. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms11061392.
10. Mejia M. P., Rojas C. A., Curd E., Renshaw M. A., Edalati K., Shih B., Vincent J., Lin M., Nguyen M., Wayne R. K., Jessup K., Parker S. S. Soil Microbial Community Composition and Tolerance to Contaminants in an Urban Brownfield Site. Microbial Ecology. 2023. Vol. 85, No. 3. P. 998–1012. DOI: https://doi.org/10.1007/s00248-022-02061-1.
11. Chowdhury N., Rasid M. M. Heavy metal concentrations and its impact on soil microbial and enzyme activities in agricultural lands around ship yards in Chattogram, Bangladesh. Soil Science Annual. 2021. Vol. 72, No. 2. Article 135994. DOI: https://doi.org/10.37501/soilsa/135994.
12. Крупєй К. С., Рильський О. Ф., Количева Н. Л., Бобровська О. Д. Каротиносинтезувальні дріжджі як модельні організми для біоіндикації солей Купруму (II) у водних екосистемах. Екологічні науки. 2025. № 1(58). С. 199–207. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.33.
13. Криштанович, М., & Силкін, О. Оцінювання стратегічних напрямів реалізації державно-приватного партнерства в царині безпекового 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 статті до видання: 27.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026