

ВИКОРИСТАННЯ БІОТЕХНОЛОГІЙ У ЗНИЖЕННІ ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ

О. К. Накемпій

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, Україна

E-mail для листування: elena.nakempiy@mipolytech.education

Отримано: 01 грудня 2025; **Прийнято:** 22 грудня 2025

Цитувати як: Накемпій, О. К. (2025). Використання біотехнологій у зниженні техногенного забруднення ґрунтів. *Проблеми охорони праці в Україні*, 41(3–4), 92–96.

У статті розглянуто актуальне питання використання біотехнологічних методів для зменшення техногенного забруднення ґрунтів у промислових регіонах України. Показано, що техногенне перевантаження територій важкої промисловості зумовлює накопичення в ґрунтах важких металів, нафтопродуктів, фенолів та інших токсикантів, що призводить до деградації екосистем і створює загрозу для здоров'я населення. Проаналізовано сучасні біотехнологічні підходи до очищення ґрунтів – фітореMediaцію, мікробіологічну деградацію, використання змішаних мікробних консорціумів, мікоризацію та біоактивацію ґрунтів. Встановлено, що біотехнології є перспективним і екологічно безпечним інструментом відновлення техногенно трансформованих ґрунтів. У статті подано практичні рекомендації щодо впровадження біореMediaційних заходів на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Ключові слова: біотехнології, ґрунт, техногенне забруднення, біореMediaція, важкі метали, фітореMediaція, мікроорганізми.

USE OF BIOTECHNOLOGIES IN REDUCING TECHNOGENIC SOIL POLLUTION

O. K. Nakempii

Technical university «Metinvest polytechnic», LLC, Zaporizhzhia, Ukraine

E-mail for correspondence: elena.nakempiy@mipolytech.education

Received: 01 December 2025; **Accepted:** 22 December 2025

Cite as: Nakempii. O. K. (2025). Use of biotechnologies in reducing technogenic soil pollution. *Labour Protection Problems in Ukraine*, 41(3–4), 92–96

The article examines the relevant issue of applying biotechnological methods to reduce technogenic soil pollution in industrial regions of Ukraine. It is demonstrated that the technogenic overload of territories dominated by heavy industry leads to the accumulation of heavy metals, petroleum products, phenols, and other toxicants in soils, resulting in ecosystem degradation and posing risks to public health. Modern biotechnological approaches to soil remediation – phytoremediation, microbiological degradation, the use of mixed microbial consortia, mycorrhization, and soil bioactivation – are analyzed. It has been established that biotechnologies represent a promising and environmentally safe tool for restoring soils affected by technogenic transformation. The article provides practical recommendations for implementing bioremediation measures at enterprises of the mining and metallurgical sector.

Key words: biotechnology, soil, technogenic pollution, bioremediation, heavy metals, phytoremediation, microorganisms.

1. Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.

Інтенсивний розвиток промисловості, характерний для промислових регіонів України, спричиняє масштабне техногенне навантаження на ґрунти. Ґрунтовий покрив виступає кінцевим депо для більшості забруднювачів, що надходять у довкілля внаслідок діяльності підприємств гірничо-металургійного, хімічного, енергетичного та транспортного секторів.

До найбільш поширених токсикантів промислового походження належать: кадмій, свинець, мідь, нікель, хром, цинк, нафтопродукти, поліциклічні ароматичні вуглеводні, феноли, поверхнево-активні речовини, стійкі органічні забруднювачі [1–3].

Накопичення таких речовин у ґрунтах призводить до:

- деградації структури ґрунту;
- зниження родючості;
- погіршення якості врожаю;
- порушення біоти та мікробіоценозів;
- накопичення токсикантів у харчових ланцюгах;
- формування загроз для здоров'я населення [4–7].

Зростання масштабів урбанізації, індустріалізації та розширення техногенних зон зумовлює потребу пошуку інноваційних екологічно безпечних методів очищення та відновлення ґрунтів. Одним із найбільш перспективних напрямів є використання біотехнологій, що набувають значної уваги у світовій науковій практиці.

Сучасні дослідження доводять ефективність біотехнологічних підходів, таких як фітореMediaція, біодеградація та мікробне вилугування у зменшенні концентрацій токсикантів та відновленні природних властивостей ґрунтів [8–9].

2. Постановка завдання та його вирішення

Новітні виклики, пов'язані з техногенним навантаженням на навколишнє середовище, особливо на ґрунтовий покрив, диктують необхідність послідовного формування раціональних та екологічно безпечних підходів до його відновлення. Інтенсивна діяльність промислових підприємств, зокрема гірничо-металургійної, нафтохімічної та хімічної галузей, призводить до акумуляції в ґрунтах високих концентрацій важких металів, нафтопродуктів та стійких органічних забруднювачів. Це, у свою чергу, викликає порушення екологічної рівноваги у природі та становить пряму

загрозу здоров'ю населення через трансфер забруднювачів харчовими ланцюгами.

Традиційні фізико-хімічні методи ремедіації (термічна обробка, хімічне промивання, екскавція) часто є високовитратними, енергоємними, можуть призводити до вторинного забруднення та руйнувати природну структуру ґрунту, що є неприйнятним для відновлення біологічної активності земель. У зв'язку з цим, біотехнологічні методи очищення ґрунтів набувають особливої актуальності як екологічно чиста, економічно вигідна та стійка альтернатива. Біотехнологія пропонує інструменти, що використовують природний потенціал мікроорганізмів (біоремедіація) та рослин (фіторемедіація) для інактивації, деградації або вилучення забруднюючих речовин без значного порушення ґрунтової екосистеми.

Однак порівняно мало робіт присвячено комплексному екологічному моніторингу стану ґрунтів у зонах впливу промислового виробництва із застосуванням біотехнологічних рішень, а також прогнозуванню ефективності інтегрованих біосистем (наприклад, поєднання мікробної деградації органіки та фітостабілізації важких металів) у реальних умовах.

Враховуючи вищезазначене, метою цієї роботи є оцінка потенціалу та систематизація ефективних біотехнологічних підходів (біоремедіації та фіторемедіації) для зниження техногенного забруднення ґрунтів та розробка рекомендацій щодо їх інтегрованого застосування [9].

2.1. Матеріали і методи

У цьому дослідженні проводився теоретичний огляд та систематичний аналіз наукової літератури, присвяченої біотехнологіям відновлення забруднених ґрунтів. Для забезпечення об'єктивності та актуальності даних, пошук відбувався за допомогою використання провідних наукових баз даних: Elsevier (ScienceDirect), Web of Science, Scopus та Google Scholar шляхом фільтрації за період з 2018 по 2025 рік. Пошук проводився за ключовими словами двома мовами (українською, англійською): «біоремедіація ґрунтів», «фіторемедіація», «мікробна деградація нафтопродуктів», «важкі метали в ґрунті», «біоаугментація».

Використано комплекс методів:

- системний аналіз для узагальнення інформації про різні біотехнологічні механізми (фітоекстракція, біостимуляція, фітостабілізація);
- порівняльний аналіз для оцінки переваг і недоліків окремих методів залежно від типу забруднювача (органічні речовини vs. неорганічні);
- узагальнення для формування практичних рекомендацій щодо вибору та інтеграції біотехнологічних рішень.

Таблиця 1 – Основні стратегії мікробної біоремедіації та їх ефективність

Стратегія	Сутність	Приклади мікроорганізмів	Зниження концентрації*	Примітки
Біостимуляція	Додавання поживних речовин (N, P, K) для активізації аборигенної мікрофлори ґрунту	Місцеві штами <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , дріжджі	40–70 % (за 3–6 міс.)	Ефективна для помірних забруднень. Залежить від активності мікрофлори
Біоаугментація	Внесення спеціально підібраних або генетично модифікованих технологічних штамів-деструкторів	<i>Rhodococcus erythropolis</i> , <i>Pseudomonas putida</i> (для ПАВ)	70–95 % (за 2–4 міс.)	Потребує попередньої адаптації штамів до умов ґрунту
Комбінована	Біостимуляція + Біоаугментація + використання біосурфактантів	Комплексні біопрепарати	До 98 % (за 2 міс.)	Найвища ефективність, але вища вартість впровадження

*Дані у відсотках є узагальненими і відображають діапазон ефективності у лабораторних та пілотних дослідженнях при очищенні ґрунтів від середніх концентрацій нафтопродуктів.

Були вивчені найбільш важливі доступні звіти та наукові публікації, а також проведені консультації з колегами-експертами у сфері ґрунтознавства та екологічної біотехнології.

2.2. Результати досліджень та їх обговорення.

В умовах інтенсивного техногенного впливу на ґрунтові екосистеми актуальним є питання зниження забруднення ґрунтів і відновлення їх природної функціональної активності. Аналіз наукових досліджень показує, що домінуючими забруднювачами ґрунтів у промислових та урбанізованих територіях України є важкі метали, органічні сполуки та нафтопродукти [10,11].

Систематичний аналіз фізико-хімічних показників забруднених ґрунтів показав:

- підвищені концентрації важких металів: Pb – 110–350 мг/кг, Cd – 2–8 мг/кг, Zn – 250–520 мг/кг [12];
- наявність органічних токсикантів: нафтопродукти – 3,5–12 г/кг, ПАВ – 0,5–2,4 мг/кг, залишки агрохімікатів – до 1,8 мг/кг;
- порушення кислотно-лужного балансу (рН 5,2–6,1), що негативно впливає на мікробіологічну активність [13].

Ці дані узгоджуються з міжнародними дослідженнями, які показують, що поєднання органічних і неорганічних забруднювачів створює мультистресові умови для ґрунтових мікроорганізмів і знижує природну самовідновлюваність ґрунту [11–13].

Біотехнологічні методи є ключовим напрямом екологізації процесів рекультивації та відновлення ґрунтів (Ali et al., 2018; Fayiga et al., 2019). Висока ефективність цих методів зумовлена здатністю використовувати природні біологічні процеси для знешкодження, деградації або іммобілізації забруднювачів без суттєвого порушення ґрунтової біоти.

Техногенне забруднення ґрунтів органічними речовинами, такими як нафтопродукти, ПАВ та деякі пестициди, потребує застосування мікробної біоремедіації. Ключові механізми очищення – біодеградація та біотрансформація [14].

Лабораторні експерименти показали, що використання консорцій *Pseudomonas putida*, *Bacillus subtilis*, *Rhodococcus erythropolis*, а також грибів *Trichoderma harzianum* та *Aspergillus niger*, забезпечує:

- зниження концентрації нафтопродуктів на 58–72 % за 30 днів;
- деградацію ПАВ на 45–63 %;
- зменшення залишків пестицидів на 40–55 % [15].

Для ілюстрації потенціалу та порівняння основних стратегій мікробної біоремедіації ґрунтів від нафтопродуктів та ПАВ, нижче представлена таблиця 1, що узагальнює ключові характеристики методів та очікуваний діапазон ефективності.

На відміну від органічних сполук, важкі метали не можуть бути деградовані. Тому біотехнології, зокрема фітореMediaція, зосереджуються на їх іммобілізації або вилученні. ФітореMediaція є особливо актуальною для земель навколо промислових об'єктів, де домінує забруднення Pb, Cd, Ni та Cr. Ключовими підходами фітореMediaції є: фітоекстракція (вилучення металу),

фітостабілізація (знерухомлення) та різкофільтрація (очищення води). Вибір методу залежить від цільової задачі: знизити загальну токсичність та запобігти міграції (фітостабілізація) чи знизити загальну концентрацію у ґрунті (фітоекстракція). У таблиці 2 наведено порівняння цих основних методів фітореMediaції з огляду на їхнє практичне застосування [16,17].

Таблиця 2 – Методи фітореMediaції та їх застосування для очищення ґрунтів

Метод	Механізм дії	Основні забруднювачі	Приклади рослин-агентів	Переваги
Фітоекстракція	Поглинання важких металів коренями та їх накопичення у надземній біомасі	Cd, Ni, Zn, Cu	<i>Thlaspi caerulescens</i> , Соняшник (<i>Helianthus annuus</i>), Гірчиця індійська (<i>Brassica juncea</i>)	Зменшення загальної концентрації металів, можливість вилучення та утилізації забруднювача
Фітостабілізація	Знерухомлення забруднювачів (іммобілізація) у кореневій зоні (ризосфері), запобігання їх вимиванню	Pb, As, Cr	Вівсяниця очеретяна (<i>Festuca arundinacea</i>), різні види тополь, верба	Швидке запобігання поширенню токсикантів, відновлення ґрунтового покриву
Різкофільтрація	Адсорбція/осадження металів на поверхні коренів водних рослин, використовується для очищення ґрунтових та стічних вод	Cd, Pb, U	Соняшник, Водяний гіацинт, Ірис	Висока ефективність для очищення рідких середовищ

У зонах, забруднених Pb і Cr, де повне видалення металу є дорогим і не завжди необхідним, перевагу віддають фітостабілізації. Цей метод є швидким, відносно недорогим і відновлює ґрунт від ерозії.

Натомість, для вилучення Cd та Ni (які добре поглинаються рослинами) найбільш доцільною є фітоекстракція. Результати показують, що, наприклад, Гірчиця індійська може накопичувати Cd у концентраціях, що в 100–500 разів перевищують його вміст у незабрудненому ґрунті. Проте цей процес є тривалим (кілька вегетаційних циклів) і потребує подальшої безпечної утилізації забрудненої біомаси [18,19].

Сучасне техногенне забруднення має комплексний характер (наприклад, ґрунти містять одночасно нафтопродукти та важкі метали). У цьому випадку необхідна інтеграція методів.

Інтегрований біотехнологічний підхід може включати методи:

1. Біоаугментація для швидкої деградації органічної фракції (нафтопродуктів).
2. Фітостабілізація залишків важких металів для запобігання їх міграції.

Такий підхід дозволяє використовувати синергійний ефект, де мікроорганізми не лише очищують органіку, але й можуть підвищувати біодоступність важких металів для рослин, тим самим збільшуючи ефективність фітоекстракції.

Застосування біотехнологічних методів підтвердило свою ефективність у знешкодженні органічних і неорганічних токсикантів. Мікробна біореMediaція на основі функціональних консорцій *Pseudomonas putida*, *Rhodococcus erythropolis*, *Bacillus subtilis* та *Trichoderma harzianum* забезпечує інтенсивну деградацію нафтопродуктів, ПАВ та залишків пестицидів. Висока деструктивна активність зазначених мікроорганізмів пов'язана із синтезом специфічних ферментів – оксидоредуктаз, монооксигеназ та діоксигеназ, що дозволяють ефективно розкладати складні органічні

молекули та перетворювати їх на менш токсичні або повністю мінералізовані сполуки.

ФітореMediaційні методи, зокрема застосування *Helianthus annuus*, *Brassica napus*, *Miscanthus × giganteus* та *Salix alba* підтвердили значну ефективність щодо накопичення та стабілізації важких металів у ґрунті. Здатність цих рослин акумулювати Zn, Cu, Pb та Cd у надземній та кореневій біомасі формує передумови для довготривалого та екологічно безпечного очищення територій з підвищеним техногенним навантаженням. При цьому фітореMediaція сприяє структурному відновленню ґрунтового профілю, поліпшенню аерації та формуванню стійких мікробних співтовариств, що забезпечує відновлення екосистемних функцій ґрунтів у середньо- та довгостроковій перспективі.

Комбіноване застосування мікробних і фітореMediaційних технологій продемонструвало найбільш виражений синергійний ефект, що проявляється у підвищенні швидкості деградації органічних забруднювачів, збільшенні ступеня фіксації або накопичення важких металів у фітомасі, а також у загальному покращенні фізико-хімічних показників ґрунту. Така взаємодія методів дозволяє досягати більш глибокої детоксикації ґрунтового середовища та прискорює процеси реабілітації деградованих територій. Сформований інтегрований підхід може бути покладений в основу біоінженерних систем очищення ґрунтів, що відзначаються високою екологічною безпечністю, економічною доцільністю та відповідністю принципам сталого природокористування.

Висновки

Проведений аналіз сучасних наукових джерел, експериментальних зведень та результатів моделювання засвідчив, що техногенне забруднення ґрунтів є однією з ключових екологічних загроз для урбанізованих і промислових територій, що характеризуються накопиченням важких металів, нафтопродуктів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів, синтетичних поверхнево-активних речовин і залишків агрохімікатів.

Комплексний характер забруднення формують мультистресові умови для ґрунтових мікроорганізмів та рослинних угруповань, що істотно знижує природну здатність ґрунту до самоочищення та відновлення біотичних зв'язків.

Отримані результати свідчать про те, що біотехнологічні методи є перспективним і науково обґрунтованим інструментом мінімізації техногенного впливу на ґрунтові екосистеми. Їх широке впровадження у практику

екологічної реабілітації промислових зон України сприятиме відновленню природних властивостей ґрунтів, зменшенню екологічних ризиків та формуванню стійких систем управління забрудненими територіями. Подальші дослідження у цьому напрямі мають бути зосереджені на створенні оптимізованих біопрепаратів, адаптивних фітоценозів та інтегрованих технологічних рішень, що дозволить підвищити ефективність очищення та відновлення ґрунтів у різних геоекологічних умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lung-Chi Chen, Polina Maciejczyk, George D. Thurston. (2022). Handbook on the Toxicology of Metals (Fifth Edition) V. I (6). 137–182. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823292-7.00004-8>
2. Яцук І. П. (2014). Сучасний стан ґрунтів України: проблеми та їх вирішення. *Агрохімія і ґрунтознавство. Спецвипуск*. Кн. 1. Харків. 2014. 184–191.
3. Металургійна галузь України: фактори зростання та напрями державного регулювання : монографія (2022). В. В. Венгер; НАН України, ДУ «Ін-т екон. та прогноз. НАН України». Київ. 324. URL: <http://ief.org.ua/wp-content/uploads/2022/06/Металургійна-галузь-України.pdf>
4. Hernández-Blanco, M., Costanza, R., Chen, H., de Groot, D., Jarvis, D., Kubiszewski, I., Montoya, J., Sangha, K., Stoeckl, N., Turner, K., & van 't Hoff, V. (2022). Ecosystem health, ecosystem services, and the well-being of humans and the rest of nature. *Global change biology*, 10.1111/gcb.16281. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/gcb.16281>
5. Накемпій О. К. (2023). Оцінка впливу металургійної промисловості на стан атмосферного повітря та шляхи його зменшення. *Зб. наук. пр. Проблеми охорони праці в Україні*, 39 (1–2), 87–93.
6. Самойленко Н. М., Аверченко В. І., Байрачний В. Б. (2020). Системи технологій та промислова екологія. Ч. І. Металургійний та енергетичний комплекс : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПІ», Лідер. 212.
7. Фещенко О. Л., Каменева Н. В. (2016). Оцінка впливу діяльності металургійних підприємств на навколишнє природне середовище України. *Інвестиції: практика та досвід*. 2. 28–32.
8. Vakhnyak, V., Khomovyi, M., Trach, I., Yavorov, V., & Petryshche, O. (2025). The role of restoring degraded soils in ensuring food security in the agro-industrial sector. *Scientific Horizons*, 28(2), 73–88 <https://doi.org/10.48077/scihor.2.2025.73>
9. Цицюра Я. Г., Шкагула Ю. М., Забарна Т. А., Пелех Л. В. (2022). Інноваційні підходи до фіторемедіації та фіторекультиваци у сучасних системах землеробства: монографія. Вінниця: ТОВ «Друк», 2022. 1200.
10. Гнатів С. В. (2021). Біотехнології у відновленні деградованих ґрунтів. Львів : ЛНУ, 2021. 145.
11. Berezniak, E., Naumovska, O., & Berezniak, M. (2022). Degradation processes in the soils of Ukraine and their negative consequences for the environment. *Biological Systems: Theory and Innovation*, 13(3-4), 96–109. [https://doi.org/10.31548/biologiya13\(3-4\).2022.014](https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014)
12. Kaplan N. O., Akay A. The determination of Cd and Zn phytoremediation potential of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Desalination and Water Treatment*. 2018. Vol. 133. 146–152.
13. EPA. (2021). Soil Remediation and Sustainable Practices. United States Environmental Protection Agency, 2021. 112.
14. Дацько О. М., Яценко В. М. (2024). Сучасні методи ремедіації ґрунтів. Фіторемедіація як ключ до очищення ґрунтів та збереження екосистем. *Аграрні інновації*. 2024. 25. 20–24 <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.25.3>
15. Singh, R., Sharma, P., & Gupta, A. (2021). Microbial remediation of hydrocarbons in soil: Current trends and perspectives // *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 23. 101630.
16. Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2018). Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications. *Chemosphere*. 2018. 167. 41–49.
17. Du, J., Guo, Z., Li, R., Ali, A., Guo, D., Lahori, A. H., Wang, P., Liu, X., Wang, X., & Zhang, Z. (2020). Screening of Chinese mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars for the phytoremediation of Cd and Zn based on the plant physiological mechanisms. *Environmental Pollution*, 261, 114213. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114213>
18. Samokhvalova V. L. (2014). Biological methods of remediation soil contaminated by heavy metals. *Studia Biologica*. 2014. Vol. 8. No 1. P. 217–236. <https://doi.org/10.30970/sbi.0801.337>
19. Slima D. F., Ahmed D. A. E.-A. (2020). Trace Metals Accumulated in Pea Plant (*Pisum sativum* L.) as a Result of Irrigation with Wastewater. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2020. Vol. 20, No 4. P. 2749–2760. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00341-8>

REFERENCES

1. Lung-Chi Chen, Polina Maciejczyk, George D. Thurston. (2022). Handbook on the Toxicology of Metals (Fifth Edition) V. I (6). 137–182. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823292-7.00004-8>
2. Yatsuk, I. P. (2014). Suchasnyy stan hruntiv Ukrainy: problemy ta yikh vyrishennya. *Aghrokhimiya i hruntoznavstvo, Spetsvyppusk*, 1, 184–191.
3. Металурhiina haluz Ukrainy: faktory zrostannia ta napriamy derzhavnoho rehuliuвання : monohrafiia (2022). V. V. Venher; NAN Ukrainy, DU «Ін-т екон. та prohnozuv. NAN Ukrainy». Kyiv. 324. URL: <http://ief.org.ua/wp-content/uploads/2022/06/Metalurhiina-haluz-Ukrainy.pdf>
4. Hernández-Blanco, M., Costanza, R., Chen, H., deGroot, D., Jarvis, D., Kubiszewski, I., Montoya, J., Sangha, K., Stoeckl, N., Turner, K., & van 't Hoff, V. (2022). Ecosystem health, ecosystem services, and the well-being of humans and the rest of nature. *Global change biology*, 10.1111/gcb.16281. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/gcb.16281>
5. Nakempii O. K. (2023). Otsinka vplyvu metalurhiynoyi promyslovosti na stan atmosfernoho povitria ta shlyakhyy yogo zmenshennya. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini*, 39(1-2), 87–93.
6. Samoylenko, N. M., Averenchenko, V. I., & Bayrachniy, V. B. (2020). Systemy tekhnolohiy ta promyslova ekolohiya. Ch. I. Metalurhiynyy ta enerhetychnyy kompleks: navch. posib. Kharkiv: NTU "KPI", Lider. 2020. 212.

7. Feschenko O. L., & Kameneva N. V. (2016). Otsinka vplyvu diyal'nosti metalurhiynykh pidpryyemstv na navkolyshe pryrodne seredovyshe Ukrainy. *Investytsiyi: praktyka ta dosvid*, 2, 28–32.
8. Vakhnyak, V., Khomovyi, M., Trach, I., Yavorov, V., & Petryshche, O. (2025). The role of restoring degraded soils in ensuring food security in the agro-industrial sector. *Scientific Horizons*, 28(2), 73–88 <https://doi.org/10.48077/scihor2.2025.73>
9. Tsytysura, Y. H., Shkatula, Y. M., Zabarna, T. A., & Pelekh, L. V. (2022). Inovatsiyni pidkhody do fitoremediatsiyi ta fitorekul'tivatsiyi u suchasnykh systemakh zemlerobstva: monohrafiya. Vinnytsya: TOV "Druk". 2022. 1200.
10. Hnatyv, S. V. (2021). Biotekhnolohiyi u vidnovlenni dehradovanykh hruntiv. Lviv: LNU. 2021. 145.
11. Berezhniak, E., Naumovska, O., & Berezhniak, M. (2022). Degradation processes in the soils of Ukraine and their negative consequences for the environment. *Biological Systems: Theory and Innovation*, 13(3-4), 96–109. [https://doi.org/10.31548/biologiya13\(3-4\).2022.014](https://doi.org/10.31548/biologiya13(3-4).2022.014)
12. Kaplan N. O., Akay A. The determination of Cd and Zn phytoremediation potential of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Desalination and Water Treatment*. 2018. Vol. 133. 146–152.
13. EPA. (2021). Soil Remediation and Sustainable Practices. United States Environmental Protection Agency, 2021. 112.
14. Datsko, O. M., & Yatsenko, V. M. (2024). Suchasni metody remediatsii hruntiv. Fitoremediatsiia yak kliuch do ochyshchennia hruntiv ta zberezhennia ekosystem. *Ahrarni innovatsii*, 25, 20-24. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.25.3>
15. Singh, R., Sharma, P., & Gupta, A. (2021). Microbial remediation of hydrocarbons in soil: Current trends and perspectives. *Environmental Technology & Innovation*. 2021. Vol. 23. 101630.
16. Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2018). Phytoremediation of heavy metals – concepts and applications. *Chemosphere*. 2018. 167. 41–49.
17. Du, J., Guo, Z., Li, R., Ali, A., Guo, D., Lahori, A. H., Wang, P., Liu, X., Wang, X., & Zhang, Z. (2020). Screening of Chinese mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars for the phytoremediation of Cd and Zn based on the plant phys-iological mechanisms. *Environmental Pollution*, 261, 114213. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114213>
18. Samokhvalova V. L. (2014). Biological methods of remediation soil contaminated by heavy metals. *Studia Biologica*. 2014. Vol. 8. No 1. P. 217–236. <https://doi.org/10.30970/sbi.0801.337>
19. Slima D. F., Ahmed D. A. E.-A. (2020). Trace Metals Accumulated in Pea Plant (*Pisum sativum* L.) as a Result of Irrigation with Wastewater. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2020. Vol. 20, No 4. P. 2749–2760. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00341-8>