
ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ

УДК 504

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.31>

ВІДНОВЛЕННЯ ДЕГРАДОВАНИХ ЛАНДШАФТІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ БІОТЕХНОЛОГІЙ

Ящук Л.Б.¹, Бурлака В.С.¹, Пашенко Г.В.²

¹Черкаський державний технологічний університет

бульв. Шевченка, 460, 18006, м. Черкаси

²Київська академія декоративно-прикладного мистецтва і дизайну імені Михайла Бойчука

вул. Михайла Бойчука, 32, 01014, м. Київ

l_yashchuk@ukr.net, vladimirburlaka77@gmail.com, anne_2010@ukr.net

Ґрунтовий покрив – важливий компонент екосистеми, що є сукупністю ареалів ґрунтової біоти, збалансоване функціонування якої лежить в основі самого існування екосистем. Тривала інтенсифікація землекористування сприяла широкому застосуванню хімічних речовин у ґрунті, що призвело до засолення, ерозії та виснаження органічного вмісту. Варто зауважити, що ґрунтові ресурси вичерпні, і у разі сильно виражених деградаційних процесів часто не підлягають регенерації. Процеси природного відродження та самоочищення є складними та довготривалими і не забезпечують повного відновлення деградованих природних ландшафтів, що зумовлює необхідність підтримки та оптимізації стану ґрунтів, а у разі необхідності – їх інтенсивного відновлення. У зазначеному контексті особливої ваги набувають біотехнології, що передбачають використання мікробних консорціумів для ґрунту, фітореMediaцію та біореMediaцію, біологізацію процесів оброблення землі та застосування генетичних методів для підвищення стійкості екосистем. У дослідженні обґрунтовано, що стимулювання природних процесів регенерації деградованих ландшафтів, підкріплена біотехнологічними засобами, дозволяє покращити структуру ґрунту, нейтралізувати забруднення, стимулювати ріст рослинності та підвищувати резильєнтність ландшафтних екосистем до впливу стресорів. Особлива увага в дослідженні приділена біореMediaції. Доведено, що доповнюючи природну мікробіоту в середовищі ґрунту, біостимуляція підвищує її здатність розкласти забруднюючі речовини. Натомість, біоаугментація є більш доцільною до застосування в разі, коли місцеве мікробне середовище не володіє необхідними можливостями для ефективного розкладання поллютантів. У дослідженні запропоновано загальний алгоритм впливу технологічних інновацій на рівень стійкості деградованих ландшафтів. Розглянуто довгострокові наслідки точного землеробства для екосистеми: захист від процесів ерозії та засолення, регенерація деградованих ґрунтів, покращення гідрологічного режиму. *Ключові слова:* методи захисту, технології захисту, хімічні речовини, відновлення, нормування вмісту хімічних речовин, вітрова та водна ерозії ґрунтів, протиерозійні заходи і засоби, мінімізація обробітку ґрунтів.

Restoration of degraded landscapes using biotechnology. Yashchuk L., Burlaka V., Pashchenko H.

Soil cover is an important component of the ecosystem, and its balance depends on its proper functioning. Natural regeneration and self-cleaning processes do not ensure the restoration of degraded natural landscapes, which necessitates the need to maintain and optimize the state of soils, and if necessary, their intensive restoration. In this context, biotechnology, which involves the use of microbial consortia for soil, phytoremediation and bioremediation, biologization of land cultivation processes and the use of genetic methods to increase the stability of ecosystems, is of particular importance. The study substantiates that stimulating natural processes of regeneration of degraded landscapes, supported by biotechnological means, allows to improve soil structure, neutralize pollution, stimulate vegetation growth and increase the resilience of landscape ecosystems to the effects of stressors. It is proven that by supplementing the natural microbiota in the soil environment, biostimulation increases its ability to decompose pollutants. In contrast, bioaugmentation is more appropriate for use in cases where the local microbial environment does not have the necessary capabilities for effective decomposition of pollutants. The study proposes a general algorithm for the impact of technological innovations on the level of sustainability of degraded landscapes. The long-term consequences of precision agriculture for the ecosystem are considered: protection from erosion and salinization processes, regeneration of degraded soils, improvement of the hydrological regime. *Key words:* protection methods, protection technologies, chemicals, restoration, standardization of chemical content, wind and water erosion of soils, anti-erosion measures and means, minimization of soil cultivation.

Постановка проблеми. Забруднення ґрунтів та їх виснаження внаслідок тривалого нераціонального використання призводять до небажаних екологічних наслідків для ландшафтних екосистем. Низький поріг природної стійкості земельних ресурсів до деградації зумовлений вузьким гомеостатичним діа-



© Ящук Л.Б., Бурлака В.С., Пашенко Г.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

пазоном, специфічним характером її природно-ресурсного потенціалу та обмеженими адаптивними можливостями. На природне відновлення необхідний значний часовий ресурс, йому характерна неконтрольованість та значна залежність від супутніх факторів навколишнього середовища.

Процес регенерації деградованих ландшафтів включає етапи дослідження ґрунтового покриву та вивчення агрохімічних показників, фіксацію наявності горизонтальної та вертикальної міграції та рівнів забруднення ґрунтово-водних горизонтів забруднювачами, вибір технік та технологій відновлення з врахуванням специфічних індивідуальних властивостей середовища, реалізацію технологічних заходів з біоремедіації, налагодження системи моніторингу загальних параметрів стану ландшафту.

Актуальність дослідження. Зважаючи на зростання рівня деградованості сучасних ландшафтів, що підсилюється впливом військових дій в Україні, необхідно розробляти нові методи відновлення земель безпечними методами, серед яких чільне місце відводиться застосуванню біоеннологій, котрі здатні забезпечити швидкий та пролонгований позитивний ефект впливу на ландшафти, сприяють підвищенню загальної стійкості екосистем.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Численні сучасні наукові праці та дослідження присвячені вдосконаленню методів раціонального використання в умовах деградації земель. Здебільшого, сучасний глобальний науковий дискурс зосереджений в даній галузі на стратегіях технологічної модернізації господарства та мінімізації обробітку ґрунту, що підвищують економічну ефективність та екологічну безпеку використання ландшафтів. Водночас, питання відновлення деградованих земель залишається невирішеним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах сучасних авторів P. Skvortsova та ін. [1], N. Nnaji та ін. [2], M. Usman та ін. [3] наголошується на практичних аспектах органічного виробництва через інноваційні технологічні рішення, які є шадними для ґрунту та доповнюють принципи «зеленої» економіки. Вчені V. Yamini, V. Rajeswari [4], Y. Chernysh та ін. [5] проаналізували деструктивні зміни земельних ресурсів, які важко відновити традиційними методами. Автори переконані, що деградація спричинена тривалим накопиченням токсичних хімічних речовин у ґрунтах внаслідок екстенсивної діяльності.

Продовжуючи, Sh. Chen, M. Zhong [6], P. Yaashikaa, P. Kumar [7], A. Khokhlov та ін. [8] досліджують біотехнології в контексті регулятора загального здоров'я екосистеми. Вчені приділяють особливу увагу потенціалу трансферу технологій як перспективного вектору інноваційної трансформації екологічного управління ландшафтами.

Дослідники D. Rose та ін. [9], J. Clapp [10] обґрунтовують функціональність систем моніторингу, які

вони позиціонують як основу екосистемного підходу до господарської діяльності на деградованих ландшафтах, що забезпечує превентивний захист від негативних наслідків для навколишнього середовища. Водночас, L. Rocchi та ін. [11], D. Hou та ін. [12] у своїх дослідженнях пропонують комплексний підхід до оптимізації стану деградованих земель у рамках програм сталого розвитку та зеленого економічного курсу. Такий підхід включає заходи щодо нейтралізації негативного впливу антропогенних навантажень, максимального усунення забруднення, регенерації природних ресурсів та відновлення природних ландшафтних комплексів шляхом використання сучасних рішень у галузі біотехнологій.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Не нівелюючи значимість висновків вчених, багато питань у галузі вдосконалення методів раціонального використання ландшафтів в умовах деградації земель вимагають деталізації та пошуку оптимальних рішень. Зокрема, процеси інтеграції біотехнологій у системи органічного та точного землеробства вивчені фрагментарно. Метою дослідження є аналіз потенціалу інноваційних біотехнологій для раціонального використання та регенерації деградованих ландшафтів.

Новизна. У дослідженні запропоновано поєднання технік та технологій біологічного спрямування: біоремедіації, використання мікробних консорціумів для ґрунту, біологізації процесів оброблення землі та застосування генетичних методів для підвищення стійкості екосистем.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований підхід може бути успішно використаний для вдосконалення систем органічного землеробства, що передбачає заборону на агресивну агрохімізацію в процесі виробництва продукції, збереження природної мікрофлори ґрунту, мінімізацію технологічного обробітку, захист від водної та вітрової ерозії.

Виклад основного матеріалу. Модернізація методів раціонального землекористування в межах деградованих ландшафтів має на увазі, в основному, інтеграцію інноваційних агротехнологій, оптимізацію системи добрив та хімізації з пріоритетністю біологічних способів захисту рослин та органічних добрив. Точне землеробство передбачає нерозривний моніторинг стану ґрунту, що дає можливість стратегічного планування системи оптимізації параметрів деградованих земель, а також впровадження біоенергетичних стратегій їх регенерації [13]. Основою біо-підходу позиціонується переконання, що методи, які є толерантними для природного довкілля, зберігають стан ґрунту в межах екологічних норм.

З метою аналізу ефективності впровадження технології точного землеробства було проаналізовано темпи імплементації її елементів у європейських країнах, що дозволяє прогнозувати позитивну динаміку впливу технології (рис. 1).

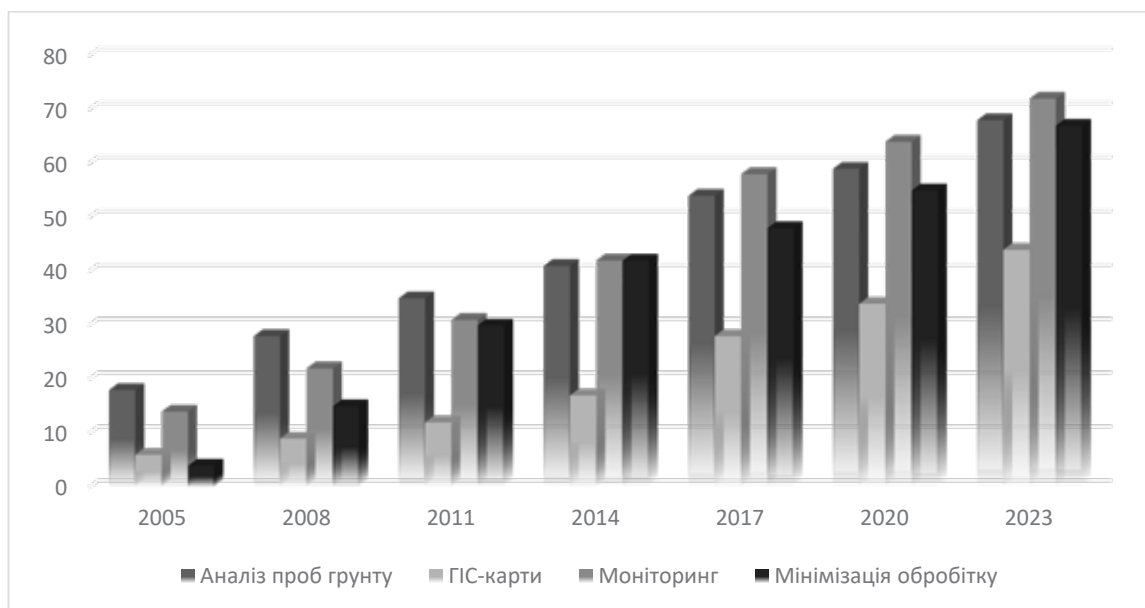


Рис. 1. Темпи імплементації елементів точного землеробства у ЄС, %

Джерело: узагальнено авторами на основі [14]

Як свідчить європейська практика, превентивний захист ландшафтів від забруднення та деградації має здійснюватися за допомогою:

а) регулярного достовірного та незалежного лабораторного контролю наявності потенційних забруднювачів у ґрунті;

б) організації буферних зон та екологічних майданчиків;

в) впровадження системи моніторингу ерозійних процесів;

г) рекультиватії та регенерації деградованих ґрунтів [2, 15].

Практичний досвід свідчить про значну ефективність біотехнологій для відновлення деградованих ландшафтів. Особливої уваги потребує потенціал біоремедіації, при цьому доповнюючи природну мікробіоту в середовищі, біостимуляція підвищує її здатність розкласти забруднюючі речовини, а біоаугментація є більш доцільною до застосування в разі, коли місцеве мікробне середовище не володіє необхідними можливостями для ефективного розкладання поллютантів [16].

Варто відзначити, що сукупність факторів навколишнього середовища, таких, як температура, солоність, рівень кислотності та вміст кисню, можуть суттєво впливати на проходження процесів біологічної ремедіації. Зокрема, існує зворотній зв'язок між солоністю та розчинністю окремих речовин, так як збільшення концентрації солі провокує їх підвищене поглинання [17]. Воночас біоремедіація передбачає відновлення порушених земель не лише за допомогою асоціацій мікроорганізмів, але й з залученням методів:

– фітоекстракції, що передбачає використання спеціальних рослин для акумуляції важких металів;

– фітоволатілізації – випаровування окремих хімічних елементів через листя рослин;

– фітостимуляції, що являє собою стимулювання розвитку симбіотичних мікроорганізмів, що відіграють важливу роль в процесах очищення;

– фітостабілізації – переведення хімічних з'єднань важких металів у менш активну і рухому форму, що може знизити ризики поширення забруднення;

– фітодеградації, що забезпечує деструкцію органічних складників забруднень симбіотичними мікроорганізмами та рослинами.

Популяризація та активне застосування широких можливостей методу біоремедіації відкриють можливість комплексного вирішення проблеми забруднення ґрунтового покриву [18]. Серед численних переваг ефективного використання біоремедіації як дієвого методу детоксикації та деконтамінації хімічно забруднених ґрунтів, варто виділити екологічну безпечність застосовуваних методів і мінімізацію залишкового впливу на екосистему, мінімальне втручання до хімічного та фізичного складу ґрунтового покриву, високі показники ефективності за низьких концентрацій речовини-забруднювача, відповідність методу засадам сталого управління, виключення використання небезпечних хімічних сполук, можливість повного розщеплення забруднень, значний економічний ефект. Загалом, переваги біологічної ремедіації позиціонують її як оптимальний та цілком реальний до використання підхід для очищення забруднених ландшафтів, що дає змогу отримувати екологічно чисте, ефективне рішення одного з проблемних наслідків деструктивного впливу антропогенної діяльності на ландшафтні екосистеми [3, 15].

Водночас необхідно зацентувати увагу на окремих недоліках методу, що все ж мають місце поруч із численними перевагами. Серед них – можливість акумулятивного ефекту продуктів розпаду та біонакопичення через харчові ланцюги; відсутність ретельних досліджень потенційних токсичності та біодоступності побічних продуктів, що утворюються під час процесів біодеградації; складнощі у застосуванні методу для обробки глибоких шарів ґрунту; залежність результату від кліматичного та сезонного впливів. Враховуючи зазначені недоліки, можна стверджувати про необхідність ретельної оцінки та моніторингу стану екосистем під час реалізації заходів з біоремедіації, що дозволить забезпечити високу ефективність процесу рекультивації при мінімізації потенційних ризиків для навколишнього середовища [8].

Розвиток екологічної стійкості ландшафтів містить у підґрунті вдосконалення концепції органічного землеробства. Окрім систем точного та ощадливого обробітку площ, мінімізації хімічного впливу та вдосконалення сівозмін, важлива роль відводиться процесам моніторингу та контролю. Необхідно активно залучати можливості моніторингу та геоінформаційних систем для визначення найбільш пошкоджених ділянок, щоб надалі інтегрувати системи біоіндикації на постійній моніторинговій основі. Симбіотичні асоціації з грибним компонентом позиціонуються важливими біомаркерами для практичної та достовірної оцінки якості компонентів навколишнього природного середовища – зокрема, води та ґрунту. Певні методи, такі як сівозмінна та сучасні методи зрошення, можуть сприяти ефективності біоіндикаційних процесів, покращують здоров'я ґрунту, що є вирішальними для розробки стійких та ефективних стратегій захисту ландшафтів [12].

Доцільно також запропонувати використовувати гриби як ефективні інструменти для біомоніторингу та послідувочої мікоремедіації. Так, мікоіндикатори є інноваційним засобом для більш точної та доступної ранньої діагностики токсичності навколишнього середовища. Окрім того, необхідно враховувати у перспективі можливості інтеграції генної інженерії та методів редагування генів. Зокрема, актуальними є створення або модифікація рослин, стійких до засолення, посухи або з підвищеною здатністю до очищення ґрунтів (гіпернакопичувачі).

Використання способів біологічної індикації та ремедіації у комплексному моніторингу ландшафтів сприятиме реалізації екологобезпечного

шляху регенерації ґрунтового середовища, забезпеченню екологічної стабільності з одночасною нейтралізацією негативних процесів забруднення. При цьому забезпечується збереження природних біологічних властивостей ґрунту, утворюються оптимальні умови функціонування компонентів системи «ґрунт – ґрунтова біота – рослина» [4]. При цьому потенціал біотестування для визначення параметрів забруднення ґрунтового середовища доцільно використовувати і щодо якості води в контексті розвитку біоіндикаційного моніторингу в природних умовах агроландшафтів України.

Стратегія удосконалення системи моніторингу та регенерації деградованих ландшафтів має поєднувати екологічну безпеку та економічну ефективність. Інноваційні можливості інформаційних технологій, що передбачають залучення потенціалу геоінформаційних технологій, спостережень за допомогою дронів та інших науково-технічних досягнень, спроможні у майбутньому доповнити та розширити можливості біоіндикації та біотестування.

Головні висновки. Використання способів біологічної ремедіації сприятиме реалізації екологобезпечного шляху регенерації ґрунтового середовища за допомогою використання інноваційних біопрепаратів, що сприятиме забезпеченню екологічної стабільності середовища, з одночасною нейтралізацією негативних процесів забруднення та оптимізацією екологічного стану ґрунту. Такий процес можливий завдяки активізації природного біологічного потенціалу ґрунту та продуктивності рослин. При цьому забезпечується збереження природних біологічних властивостей ґрунту, формуються оптимальні умови для формування мікро- та мікобіоти ґрунту з високим рівнем біологічної активності, в результаті чого утворюються оптимальні умови функціонування компонентів системи «ґрунт – ґрунтова біота – рослина». Зазначені процеси формують передумови для здійснення ефективної біоремедіації деградованих ландшафтів та регенерації їх якості, превентивних заходів щодо біологічної та хімічної деградації ґрунтів.

Перспективи використання результатів дослідження. Розширені можливості методу біоремедіації ґрунтового покриття вбачаються оптимальними для активного використання в агроекології, мікробіології ґрунтів, екологічному менеджменті ландшафтів, в ході реалізації екологічного моніторингу техногенно забруднених ландшафтів різного цільового призначення, а також у науково-дослідній практиці.

Література

1. Skvortsova P., Ablieieva I., Boiko A., Chernysh Y., Batalov Y., Kuzomenska K., Roubik H. Assessment of ecological safety and economic efficiency of biosorption technology for soil protection after hostilities. *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2025. Vol. 18. 100677. DOI: 10.1016/j.hazadv.2025.100677
2. Nnaji N., Onyeaka H., Miri T., Ugwa C. Bioaccumulation for heavy metal removal: a review. *SN Applied Sciences*. 2023. Vol. 5, No. 5. DOI: 10.1007/s42452-023-05351-6.

3. Usman M., Jellali S., Anastopoulos I., Charabi Y., Hameed B., Hanna K. Fenton oxidation for soil remediation: A critical review of observations in historically contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 424. 127670. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127670.
4. Yamini V., Rajeswari V. D. Metabolic capacity to alter polycyclic aromatic hydrocarbons and its microbe-mediated remediation. *Chemosphere*. 2023. Vol. 329. 138707. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138707.
5. Chernysh Y., Plyatsuk L., Roubik H., Yakhnenko O., Skvortsova P., Bataltsev Y. Application of Technological Solutions for Bioremediation of Soils Contaminated with Heavy Metals. *Journal of Engineering Sciences*. 2021. Vol. 8, Issue 2. P. H8–H16. DOI: 10.21272/jes.2021.8(2).h2.
6. Chen Sh., Zhong M. Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil. In: Noreña H.A.S. (ed.): *Environmental Chemistry and Recent Pollution Control Approaches*, 2019. DOI: 10.5772/intechopen.90289
7. Yaashikaa P. R., Kumar P. S. Bioremediation of hazardous pollutants from agricultural soils: A sustainable approach for waste management towards urban sustainability. *Environmental Pollution*. 2022. Vol. 312. 120031. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.120031
8. Khokhlov A. V., Khokhlova L. Y., Titarenko M. V. Development of Bio Sorption Composites of a Destructive Type for Purification of Soil Contaminated with Pesticides. *Nauka ta innovacii*. 2020. Vol. 16, No. 3. P. 69–80. DOI: 10.15407/scin16.03.069.
9. Rose D., Wheeler R., Winter M., Lobley M., Chivers C. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. *Land Use Policy*. 2021. Vol. 100. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104933>
10. Clapp J. Explaining Growing Glyphosate Use: The Political Economy of Herbicide-Dependent Agriculture. *Global Environmental Change*. 2021. Vol. 67. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102239>.
11. Rocchi L., Boggia A., Paolotti L. Sustainable Agricultural Systems: A Bibliometrics Analysis of Ecological Modernization Approach. *Sustainability*. 2020. Vol. 12(22). <https://doi.org/10.3390/su12229635>
12. Hou D., O'Connor D., Igalavithana A.D. Metal contamination and bioremediation of agricultural soils for food safety and sustainability. *Nat Rev Earth Environ*. 2020. Vol. 1. Pp. 366–381. URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0061-y>
13. Xie H., Zhang Y., Wu Z. A bibliometric analysis on land degradation: Current status, development, and future directions. *Land*. 2020. Vol. 9(1), 28. <https://doi.org/10.3390/land9010028>
14. The agricultural European Innovation Partnership (EIP-AGRI). <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/about.html>
15. Mahata S., Sharma V. N. The global problem of land degradation: A review. *Natl. Geogr. J. India*. 2021. Vol. 67. Pp. 216-231. DOI : 10.48008/ngji.1773
16. Hossain A., Krupnik T. J., Timsina J., Mahboob M. G., Chaki A. K., Farooq M., Hasanuzzaman M. Agricultural land degradation: processes and problems undermining future food security. In *Environment, climate, plant and vegetation growth*. Pp. 17-61. Cham: Springer International Publishing, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49732-3_2
17. Hermans K., McLeman R. Climate change, drought, land degradation and migration: exploring the linkages. *Current opinion in environmental sustainability*. 2021. Vol. 50. Pp. 236-244. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2021.04.013>
18. Petrukha S., Petrukha N. State regulation of agrarian-construction clusters under conditions of demencia of rural development. *VĚDA A PERSPEKTIVY*. 2021. № 5 (5). P. 42–56. DOI: [https://doi.org/10.52058/2695-1592-2021-5\(5\)-42-56](https://doi.org/10.52058/2695-1592-2021-5(5)-42-56) URL: <http://perspectives.pp.ua/index.php/vp/article/view/568/572>

Дата першого надходження статті до видання: 05.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026