УДК 635.21:361.523
DOI DOI https://doi.org/10.32848/0135-2369.2026.86.4

БІОЧАР-АСИСТОВАНА ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ ҐРУНТІВ ЯК ІННОВАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВІДНОВЛЕННЯ АГРОЕКОСИСТЕМ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

КРАВЧЕНКО Н.В. – доктор сільськогосподарських наук, професор
orcid.org/0000-0001-6072-2652
Державний університет «Житомирська політехніка»
ГНІТЕЦЬКИЙ М.О. – доктор PhD з агрономії, доцент
orcid.org/0000-0002-8088-2677
МОЖАРІВСЬКА І.А. – кандидат сільськогосподарських наук
orcid.org/0000-0003-0564-4457
Державний університет «Житомирська політехніка»

Постановка проблеми. Біочар-асистована фіторемедіація є перспективним напрямом відновлення ґрунтів, забруднених важкими металами, що поєднує сорбційні властивості вуглецевих матеріалів із ремедіаційним потенціалом рослин [1–2]. Інтегроване застосування біочару та фіторемедіантів дає змогу регулювати біодоступність потенційно токсичних елементів, покращувати властивості ґрунту та сприяти відновленню функціональної стійкості агроекосистем [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Забруднення ґрунтів важкими металами та іншими потенційно токсичними елементами є одним із чинників деградації агроекосистем і створює довготривалі ризики для рослинництва та продовольчої безпеки [11, 13]. Особливу небезпеку становлять кадмій (Cd), свинець (Pb), цинк (Zn), мідь (Cu), нікель (Ni) і хром (Cr), які за підвищених концентрацій можуть негативно впливати на біологічні процеси у ґрунті, ріст і розвиток рослин та надходити до трофічних ланцюгів [12, 14, 18].

На відміну від багатьох органічних забруднювачів, важкі метали не піддаються біологічному розкладанню [15], тому основними завданнями ремедіації є їх вилучення, зменшення рухомості, біодоступності або переведення у стабільніші форми [16]. Традиційні фізико-хімічні методи очищення забруднених ґрунтів можуть потребувати значних матеріальних та енергетичних витрат, саме тому дедалі більшого значення набувають природоорієнтовані технології, серед яких перспективною є фіторемедіація [4, 6] та її поєднання з органічними меліорантами [17].

Одним із таких матеріалів є **біочар (biochar)** – стабільний вуглецевмісний пористий продукт, який отримують у процесі термохімічного перетворення біомаси за обмеженого доступу кисню. Сировиною для його виробництва можуть бути деревина, солома, рослинні рештки, відходи харчової промисловості, гній та інші види органічної біомаси [7, 10].

Метою дослідження є наукове обґрунтування перспектив застосування інтегрованого підходу, що поєднує внесення пірогенного вуглецевого матеріалу рослинного походження з культивуванням толерантних рослин-ремедіаторів для екологічної реабілітації техногенно порушених сільськогосподарських територій [5, 8]. Особливу увагу приділено механізмам іммобілізації потенційно токсичних елементів у субстраті, зниженню їх біодоступності та надходження до рослин, а також можливості одночасного поліпшення фізико-хімічних властивостей едафічного середовища.

Методи досліджень. У роботі застосовано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів: системний та порівняльний аналіз сучасних наукових публікацій, узагальнення результатів експериментальних досліджень, аналіз закономірностей сорбції та трансформації забруднювачів у системі «субстрат–рослина», оцінювання змін кислотно-лужних і сорбційних характеристик середовища та порівняння ефективності використання різних видів рослин-ремедіаторів [9]. Проаналізовано механізми взаємодії вуглецевого сорбенту з катіонами Pb, Cd, Zn, Cu та іншими потенційно токсичними елементами, а також чинники, що визначають результативність їх стабілізації.

Результати досліджень. Характеристики біочару значною мірою визначаються видом вихідної сировини та режимом піролізу. Температура піролізу впливає на пористість, питому поверхню, pH, ароматичність вуглецю та кількість поверхневих функціональних груп. Біочар, одержаний за вищих температур, як правило, характеризується більшою площею поверхні, пористістю та стабільністю вуглецевої матриці, тоді як матеріали, одержані за нижчих температур, можуть містити більшу кількість кисневмісних функціональних груп (рис. 1) [1].



Рис. 1. Різні види біочару (https://surl.li/ryuwjg)

Особливо цікаво для ремедіації становить здатність біочару впливати на рухомість потенційно токсичних елементів. Основними механізмами їх взаємодії з поверхнею біочару є фізична адсорбція, електростатична взаємодія, іонний обмін, комплексоутворення з функціональними групами, поверхневе осадження та зміна кислотно-лужних умов ґрунтового середовища [3]. Завдяки цьому частина рухомих форм металів може переходити у менш доступний для рослин стан. Таким чином, принцип біочар-асистованої фіторемедіації можна представити, як функціональну систему:

біочар → зміна властивостей ґрунту → іммобілізація потенційно токсичних елементів → зміна ризосферного середовища → зниження фітотоксичності → покращення росту рослин → фітостабілізація забрудненої території.

Особливо показовими є результати Diquattro et al. [5], які досліджували ґрунти, забруднені Cd, Pb та Zn, із використанням біочару з деревини хвойних порід у дозі 5% маси ґрунту. Початкові концентрації Cd у досліджуваних ґрунтах становили 4,8 та 74 мг/кг, Pb -318 та 1899 мг/кг, Zn– 622 та 3803 мг/кг. Як рослинні компоненти системи використовували кардон (*Cynara cardunculus* L.), ріпак (*Brassica napus* L.) та сафлор (*Carthamus tinctorius* L.). Встановлено, що внесення біочару позитивно впливало на формування біомаси рослин. Маса кореневої системи кардону збільшувалася приблизно на 14–22%, сафлору – на 71–98%, а ріпаку – до 17% залежно від досліджуваного ґрунту [5]. Водночас у більшості варіантів застосування біочару сприяло зменшенню концентрації потенційно токсичних елементів у коренях, пагонах або насінні та їх переважному утриманню у підземній частині рослин. Ці результати принципово важливі для розуміння механізму технології. Біочар не обов'язково повинен збільшувати вилучення металу надземною біомасою. Навпаки, у багатьох випадках його найбільш цінною функцією є **асистована фітостабілізація** – зменшення рухомості металів у ґрунті та обмеження їх транслокації до надземних органів рослин (табл. 1).

Важливо, що позитивний вплив біочару не обмежується фізико-хімічною іммобілізацією металів. Його внесення може змінювати структуру ґрунтового мікробіому, ферментативну активність та процеси трансформації азоту. У дослідженні Diquattro et al. [5] було встановлено збагачення окремих бактеріальних таксонів, пов'язаних із трансформацією азоту, а активність уреази в забруднених ґрунтах після внесення біочару зростала.

Отже, формується складніша система взаємодій **«біочар – ґрунт – мікробіом – коренева система – забруднювач»**, що принципово відрізняє цю технологію від звичайного внесення сорбенту. Перспективним розвитком технології *є поєднання біочару з ризосферними мікроорганізмами, що стимулюють ріст рослин* (PGPR). У сучасних експериментальних дослідженнях комбіноване застосування біочару та PGPR у ґрунті, забрудненому Cd, Pb і Zn, сприяло істотному зниженню обмінних форм металів. Для ґрунту, обробленого біочаром, повідомлялося про зменшення обмінних фракцій Cd, Pb і Zn відповідно на 56, 60 та 81% порівняно з необробленим ґрунтом. Поєднання біочару з PGPR також забезпечувало збільшення біомаси однорічного райграсу приблизно на 31% порівняно з контролем [6]. Це дозволяє говорити вже про наступне покоління ремедіаційних технологій:

біочар + рослина-фіторемедіант + корисні ризосферні мікроорганізми.

Перспективним є також *використання модифікованих біочарів*. Хімічна, або фізична модифікація поверхні може змінювати порову структуру, кількість активних центрів та спорідненість матеріалу до конкретного металу. Зокрема, сучасні дослідження свідчать про перспективність сіркомодифікованих матеріалів для зв'язування Cd, лужної модифікації для збільшення пористості та композитних біочарів для підвищення сорбційної здатності [4]. Однак застосування біочару не можна розглядати як універсальну технологію з однаковою ефективністю для всіх забруднювачів. Результат залежить від виду металу, його хімічної форми, pH і гранулометричного складу ґрунту, вихідної сировини біочару, температури піролізу, дози внесення, виду рослини та тривалості взаємодії матеріалу з ґрунтом [3, 7].

Метааналіз екологічних ефектів застосування біочару в забруднених важкими металами ґрунтах показує загалом позитивний ефект щодо зменшення токсичності катіонних металів та покращення родючості ґрунту, однак реакція окремих елементів може суттєво відрізнятися. Зокрема, для Cr встановлені ефекти, які не дозволяють автоматично переносити закономірності, характерні для Cd, Pb або Zn [7]. Отже, вибір типу біочару повинен здійснюватися відповідно до конкретного типу забруднення. Наразі особливий інтерес становить поєднання біочару з непродовольчими та енергетичними культурами: кардон, сафлор, ріпак та інші толерантні види здатні створювати рослинний покрив на деградованих зем-

Таблиця 1 – Результати застосування біочару у системах ремедіації ґрунтів

Показник	Умови/результат	Практичне значення
Cd	у досліджених ґрунтах – 4,8–74 мг/кг	біочар сприяв зниженню біодоступності та надходження до рослин
Pb	318–1899 мг/кг	переважне утримання у ґрунті та кореневій зоні
Zn	622–3803 мг/кг	зменшення надходження потенційно токсичних форм до рослин
Кардон	коренева біомаса +14–22%	формування стійкого рослинного покриву
Сафлор	коренева біомаса +71–98%	високий потенціал для асистованої фіторемедіації
Ріпак	приріст кореневої біомаси до 17%	можливість використання непродовольчої біомаси

Складено за результатами Diquattro et al. [5],

лях і водночас формувати біомасу, що потенційно може бути використана у технічних, або енергетичних напрямах [5]. Такий підхід переводить ремедіацію від концепції «очищення забрудненої ділянки» до концепції **керованого фітоменеджменту деградованих земель**. Додатковою перевагою технології є можливість використання сільськогосподарських відходів для виробництва самого біочару. Солома, деревні відходи, лушпиння, обрізки рослин та інша залишкова біомаса можуть бути перетворені на стабільний вуглецевий матеріал і повторно залучені до агроекосистеми. У такий спосіб формується циркулярний технологічний ланцюг:

рослинні відходи → піроліз → біочар → внесення у забруднений ґрунт → іммобілізація металів → вирощування фіторемедіантів → відновлення функцій ґрунту.

Це дає підстави розглядати біочар-асистовану фіторемедіацію не лише як природоохоронний захід, а як складову кліматично орієнтованого та циркулярного землеробства. Висока стабільність частини вуглецю біочару забезпечує також потенціал його довготривалого збереження у ґрунті [1, 3]. Разом із тим практичне впровадження технології потребує попереднього аналізу властивостей біочару та забрудненого ґрунту. Недоцільно рекомендувати однакову дозу і тип біочару незалежно від умов ділянки. Необхідними є визначення pH, вмісту органічної речовини, катіонообмінної здатності, рухомих форм забруднювачів, а також оцінювання довгострокової стабільності іммобілізованих елементів [3, 7].

Встановлено, що інтегроване використання вуглецевого сорбенту та рослинного компонента створює синергетичний ефект, за якого фізико-хімічне зв'язування забруднювачів доповнюється біологічними механізмами їх вилучення, накопичення або стабілізації. Пориста структура, значна питома поверхня та наявність функціональних груп у пірогенному матеріалі сприяють сорбції й комплексоутворенню потенційно токсичних елементів, тоді як зміна реакції середовища та катіонообмінної здатності може обмежувати їх рухомість і біодоступність. Одночасно покращуються умови водно-мінерального живлення, функціонування кореневої системи та розвитку рослин на деградованих територіях. Результативність технології залежить від походження сировини, температури піролізу, норми внесення сорбенту, властивостей субстрату, виду забруднювача та біологічних особливостей рослин. Обґрунтовано доцільність диференційованого добору комбінацій «сорбент–рослина» відповідно до типу та рівня техногенного навантаження.

Висновки. Поєднання сорбційних властивостей пірогенного вуглецевого матеріалу з ремедіаційним потенціалом рослин є перспективним природоорієнтованим рішенням для реабілітації деградованих сільськогосподарських територій. Такий підхід здатний одночасно зменшувати міграційну активність токсикантів, обмежувати їх включення до трофічних ланцюгів, покращувати властивості едафічного середовища та створювати передумови для відновлення його продуктивних і екологічних функцій. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію доз сорбенту, добір рослинних видів і оцінювання довгострокової стабільності іммобілізованих елементів за різних ґрунтово-кліматичних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Majewska M., Hanaka A. Biochar in the bioremediation of metal-contaminated soils. *Agronomy*. 2025. №15(2). Art. 273. DOI: 10.3390/agronomy15020273

2. Singh S. V., Raghuvanshi S., Singh Y., Yadav K. K., Gacem A., Nandipamu T. M. K., Khalid M., Hameed R., Sharma R., Datta D., Ghosh S., Kumari A., Singh A. K., Pramanick B., Zhang X., Wang C., Alreshidi M. A. Biochar's multifaceted role in bioremediation of emerging contaminants and heavy metals in complex rhizospheric ecosystem. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2025. № 198. Art. 106005. DOI: 10.1016/j.ibiod.2025.106005

3. Mei Y., Zhuang S., Wang J. Adsorption of heavy metals by biochar in aqueous solution: A review. *Science of the Total Environment*. 2025. №968. Art. 178898. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178898

4. Qian R., Yu K., Chen N., Li R., Tang K. H. D. Adsorptive immobilization of cadmium and lead using unmodified and modified biochar: A review of the advances, synthesis, efficiency and mechanisms. *Chemosphere*. 2025. № 370. Art. 143988. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143988

5. Diquattro S., Pinna M. V., Garau M., Pulina A., Obinu L., Porceddu A., Roggero P. P., Castaldi P., Garau G. Valuable non-food crops for biochar-assisted phytoremediation of contaminated soils: The case of cardoon, rapeseed and safflower. *Applied Soil Ecology*. 2024. № 198. Art. 105349. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105349

6. Pinna M. V., Diquattro S., Ventorino V., Magaraci G., Romano I., Garau M., Porfido C., Spagnuolo M., Roggero P. P., Garau G., Castaldi P. Combining biochar, plant growth-promoting rhizobacteria, and annual ryegrass for the recovery of a PTEs multi-contaminated soil. *Applied Soil Ecology*. 2025. № 215. Art. 106447. DOI: 10.1016/j.apsoil.2025.106447

7. Ren J., Ren X., Deng Z., Zhang H., Wang J., Zhang C., Lu F., Shi J. Ecological effects of biochar in heavy metal-contaminated soils from multidimensional perspective: Using meta-analysis. *Bioresource Technology*. 2025. № 432. Art. 132695. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132695

8. Ye L., Gao G., Li F., Sun Y., Yang S., Qin Q., Wang J., Bai N., Xue Y., Sun L. A comprehensive review on biochar-based materials for the safe utilization and remediation of heavy metal-contaminated agricultural soil and associated mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025. № 13(3). Art. 116179. DOI: 10.1016/j.jece.2025.116179

9. Meng F., Wang Y., Wei Y. Advancements in biochar for soil remediation of heavy metals and/or organic pollutants. *Materials*. 2025. №18(7). Art. 1524. DOI: 10.3390/ma18071524

10. Imran S., Sumi M. J., Harine I. J., Paul N. C., Mahamud M. A., Rabbi R. H. M., Brestic M., Rhaman M. S. Biochar amendments in soil: A sustainable approach for mitigating heavy metal stress in plants. *Phyton – International Journal of Experimental Botany*. 2025. №94(4). P. 1073–1109. DOI: 10.32604/phyton.2025.064046

11. Романчук Л. Д., Матвійчук Н. Г., Матвійчук Б. В. Фіторемедіація ґрунтів шляхом вирощування енергетичних культур. *Український журнал природничих наук*. 2025. №11. С. 223–234. DOI: 10.32782/naturaljournal.11.2025.24

12. Борецька І. Ю., Джура Н. М., Романюк О. І. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6 (39). С. 72–76. DOI: 10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11

13. Кулик М. І., Галицька М. А., Самойлік М. С., Жорник І. І. Фіторемедіаційні аспекти використання енергетичних культур в умовах України. *Agrology*. 2019. Т. 2, № 1. С. 65–73. DOI: 10.32819/2617-6106.2018.14020

14. Самохвалова В. Л., Фатєєв А. І., Зуза С. Г., Погромська Я. А., Зуза В. О., Панасенко Є. В., Горпинченко П. Ю. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів. *Агроекологічний журнал*. 2015. № 1. С. 92–100. DOI: 10.33730/2077-4893.1.2015.272192

15. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Найдьонова О. Є. Еколого-токсикологічна оцінка якості ґрунтів території Харківського району Харківської області. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. С. 25–32. DOI: 10.32782/naturaljournal.7.2024.3

16. Асмаковський Є. В., Яковенко О. І. Фіторемедіаційні властивості деревних видів рослин у складі полезахисних лісосмуг Чернігівської області. *Український журнал природничих наук*. 2026. № 17. С. 7–20. DOI: 10.32782/naturaljournal.17.2026.1

17. Гапоненко А. М., Гнатюк А. М., Кулик М. В., Бондарь В. І., Блюм О. Б. Ртуть у надземних частинах *Trifolium repens* L. та *Trifolium pratense* L.: накопичення та перспективи фітоекстракції. *Агроекологічний журнал*. 2025. № 4. С. 173–181. DOI: 10.33730/2077-4893.4.2025.345457

18. Kireitseva H., Demchyk L., Paliy O., Kahukina A. Toxic impacts of the war on Ukraine. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. №80(2). P. 267–276. DOI: 10.1080/00207233.2023.2170582

REFERENCES:

1. Majewska M., Hanaka A. (2025). Biochar in the bioremediation of metal-contaminated soils. Agronomy. №15(2). Art. 273. DOI: 10.3390/agronomy15020273

2. Singh S. V., Raghuvanshi S., & Alreshidi M. A. (2025). Biochar's multifaceted role in bioremediation of emerging contaminants and heavy metals in complex rhizospheric ecosystem. International Biodeterioration & Biodegradation. № 198. Art. 106005. DOI: 10.1016/j.ibiod.2025.106005

3. Mei Y., Zhuang S., Wang J. (2025). Adsorption of heavy metals by biochar in aqueous solution: A review. Science of the Total Environment. № 968. Art. 178898. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178898

4. Qian R., Yu K., & Tang K. H. D. (2025). Adsorptive immobilization of cadmium and lead using unmodified and modified biochar: A review of the advances, synthesis, efficiency and mechanisms. Chemosphere. № 370. Art. 143988. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.143988

5. Diquattro S., Pinna M. V., & Garau G. (2024). Valuable non-food crops for biochar-assisted phytoremediation of contaminated soils: The case of cardoon, rapeseed and safflower. Applied Soil Ecology. № 198. Art. 105349. DOI: 10.1016/j.apsoil.2024.105349

6. Pinna M. V., Diquattro S., & Castaldi P. (2025). Combining biochar, plant growth-promoting rhizobacteria, and annual ryegrass for the recovery of a PTEs multi-contaminated soil. Applied Soil Ecology. № 215. Art. 106447. DOI: 10.1016/j.apsoil.2025.106447

7. Ren J., Ren X., & Shi J. (2025). Ecological effects of biochar in heavy metal-contaminated soils from a multidimensional perspective: Using meta-analysis. Bioresource Technology. № 432. Art. 132695. DOI: 10.1016/j.biortech.2025.132695

8. Ye L., Gao G., & Sun L. (2025). A comprehensive review on biochar-based materials for the safe utilization and remediation of heavy metal-contaminated agricultural soil and associated mechanisms. Journal of Environmental Chemical Engineering. № 13(3). Art. 116179. DOI: 10.1016/j.jece.2025.116179

9. Meng F., Wang Y., Wei Y. (2025). Advancements in biochar for soil remediation of heavy metals and/or organic pollutants. Materials. № 18(7). Art. 1524. DOI: 10.3390/ma18071524

10. Imran S., Sumi M. J., & Rhaman M. S. (2025). Biochar amendments in soil: A sustainable approach for mitigating heavy metal stress in plants. Phyton-International Journal of Experimental Botany. № 94(4). P. 1073–1109. DOI: 10.32604/ phyton.2025.064046

11. Romanchuk L. D., Matviichuk N. H., Matviichuk B. V. (2025). Fitoremediatsiia gruntiv shliakhom vyroshchuvannia enerhetychnykh kultur [Phytoremediation of soils by growing energy crops]. Ukrainskyi zhurnal pryrodnychykh nauk. 2025. № 11. S. 223–234. DOI: 10.32782/natural journal.11.2025.24 [in Ukrainian].

12. Boretska I. Yu., Dzhura N. M., Romaniuk O. I. (2021). Fitoremediatsiia tekhnohenno zabrudnenykh gruntiv z vykorystanniam enerhetychnykh kultur [Phytoremediation of technogenically contaminated soils using energy crops]. Ekolohichni nauky. 2021. № 6(39). S. 72–76. DOI: 10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11 [in Ukrainian].

13. Kulyk M. I., Halytska M. A., Samoilik M. S., Zhornyk I. I. (2019). Fitoremediatsiini aspekty vykorystannia enerhetychnykh kultur v umovakh Ukrainy [Phytoremediation aspects of energy crops use in Ukraine]. Agrology. 2019. № 2(1). S. 65–73. DOI: 10.32819/2617-6106.2018.14020 [in Ukrainian].

14. Samokhvalova V. L., Fatieiev A. I., & Horpynchenko P. Yu. (2015). Fitoremediatsiia tekhnohenno zabrudnenykh gruntiv [Phytoremediation of technogenically contaminated soils]. Ahroekolohichnyi zhurnal. 2015. № 1. S. 92–100. DOI: 10.33730/2077-4893.1.2015.272192 [in Ukrainian].

15. Krainiukov O. M., Kryvytska I. A., Naidonova O. Ye. (2024). Ekoloho-toksykolohichna otsinka yakosti gruntiv terytorii Kharkivskoho raionu Kharkivskoi oblasti [Ecological and toxicological assessment of soil quality in the Kharkiv district of the Kharkiv region]. Ukrainskyi zhurnal pryrodnychykh nauk. 2024. № 7. S. 25–32. DOI: 10.32782/natural journal.7.2024.3 [in Ukrainian].

16. Asmakovskyi Ye. V., Yakovenko O. I. (2026). Fitoremediatsiini vlastyvosti derevnykh vydiv roslyn u skladi polezakhysnykh lisosmuh Chernihivskoi oblasti [Phytoremediation properties of woody plant species in field-protective forest belts of Chernihiv region]. Ukrainskyi zhurnal pryrodnychykh nauk. 2026. № 17. S. 7–20. DOI: 10.32782/natural journal.17.2026.1 [in Ukrainian].

17. Haponenko A. M., Hnatiuk A. M., & Blium O. B. (2025). Rtutu nadzemnykh chastynakh Trifolium repens L. ta Trifolium pratense L.: nakopychennia ta perspektyvy fitoekstraktsii [Mercury in the aboveground parts of Trifolium repens L. and Trifolium pratense L.: accumulation and prospects for phytoextraction]. Ahroekolohichnyi zhurnal. 2025. № 4. S. 173–181. DOI: 10.33730/2077-4893.4.2025.345457 [in Ukrainian].

18. Kireitseva H., Demchyk L., Paliy O., Kahukina A. (2023). Toxic impacts of the war on Ukraine. International Journal of Environmental Studies. 2023. № 80 (2). P. 267–276. DOI: 10.1080/00207233.2023.2170582

Кравченко Н.В., Гнітецький М.О., Можарівська І.А. Біочар-асистована фіторемедіація ґрунтів, як інноваційна технологія відновлення агроекосистем, забруднених важкими металами

Метою дослідження є наукове обґрунтування перспектив застосування інтегрованого підходу, що поєднує внесення пірогенного вуглецевого матеріалу рослинного походження з культивуванням толерантних рослин-ремедіаторів для екологічної реабілітації техногенно порушених сільськогосподарських територій. Особливу увагу приділено механізмам іммобілізації потенційно токсичних елементів у субстраті, зниженню їх біодоступності та надходження до рослин, а також можливості одночасного поліпшення фізико-хімічних властивостей едафічного середовища.

Результати досліджень. Встановлено, що інтегроване використання вуглецевого сорбенту та рослинного компонента створює синергетичний ефект, за якого фізико-хімічне зв'язування забруднювачів доповнюється біологічними механізмами їх вилучення, накопичення або стабілізації. Пориста структура, значна питома поверхня та наявність функціональних груп у пірогенному матеріалі сприяють сорбції й комплексоутворенню потенційно токсичних елементів, тоді як зміна реакції середовища та катіонообмінної здатності може обмежувати їх рухомість і біодоступність. Одночасно покращуються умови водно-мінерального живлення, функціонування кореневої системи та розвитку рослин на деградованих територіях. Показано, що результативність технології залежить від походження сировини, температури піролізу, норми внесення сорбенту, властивостей субстрату, виду забруднювача та біологічних особливостей рослин. Обґрунтовано доцільність диференційованого добору комбінацій «сорбент–рослина» відповідно до типу та рівня техногенного навантаження.

Висновки. Поєднання сорбційних властивостей пірогенного вуглецевого матеріалу з ремедіаційним потенціалом рослин є перспективним природоорієнтованим рішенням для реабілітації деградованих сільськогосподарських територій. Такий підхід здатний одночасно зменшувати міграційну активність токсикантів, обмежувати їх включення до трофічних ланцюгів, покращувати властивості едафічного середовища та створювати передумови для відновлення його продуктивних і екологічних функцій. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію доз сорбенту, добір рослинних видів і оцінювання довгострокової стабільності іммобілізованих елементів за різних ґрунтово-кліматичних умов.

Ключові слова: пірогенний вуглець, потенційно токсичні елементи, сорбційна іммобілізація, рослини-ремедіатори, техногенне навантаження, екологічна реабілітація, біодоступність токсикантів, природоорієнтовані рішення.

Kravchenko N.V., Hnitetskyi M.O., Mozharivska I.A. Biochar-assisted phytoremediation of soils as an innovative technology for the restoration of agroecosystems contaminated with heavy metals

Purpose. The purpose of the study was to provide a scientific rationale for an integrated approach combining the application of plant-derived pyrogenic carbon material with the cultivation of tolerant remediating plants for the ecological rehabilitation of technologically disturbed agricultural areas. Particular attention was paid to the mechanisms responsible for the immobilisation of potentially toxic elements within the substrate, reduction of their bioavailability and uptake by plants, as well as the possibility of simultaneously improving the physicochemical properties of the edaphic environment.

Results. The integrated application of carbonaceous sorbents and plant components was found to generate a synergistic effect in which physicochemical binding of contaminants is complemented by biological mechanisms of their extraction, accumulation or stabilisation. The porous structure, high specific surface area and presence of functional groups in pyrogenic materials promote the sorption and complexation of potentially toxic elements, while changes in environmental reaction and cation-exchange capacity may reduce their mobility and bioavailability. At the same time, improved conditions for water and mineral nutrition support root-system functioning and plant development in degraded areas. The effectiveness of the proposed approach depends on feedstock origin, pyrolysis temperature, sorbent application rate, substrate properties, contaminant type and concentration, and biological characteristics of the selected plant species. The differentiated selection of "sorbent–plant" combinations according to the type and intensity of anthropogenic pressure is therefore substantiated.

Conclusions. Combining the sorption capacity of pyrogenic carbon materials with the remediation potential of plants represents a promising nature-based solution for the rehabilitation of degraded agricultural areas. This approach can simultaneously reduce contaminant mobility, limit their transfer into trophic chains, improve the properties of the edaphic environment and facilitate the restoration of its productive and ecological functions. Further research should focus on optimising sorbent application rates, selecting appropriate plant species and assessing the long-term stability of immobilised elements under contrasting soil and climatic conditions.

Key words: pyrogenic carbon, potentially toxic elements, sorption immobilisation, remediating plants, anthropogenic pressure, ecological rehabilitation, contaminant bioavailability, nature-based solutions.

Дата першого надходження статті до видання: 16.09.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.10.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0