

ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ, ЯК ІНСТРУМЕНТ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АГРОЕКОСИСТЕМ В УМОВАХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

КРАВЧЕНКО Н.В. – доктор сільськогосподарських наук, професор
orcid.org/0000-0001-6072-2652

Державний університет «Житомирська політехніка»

МОЖАРІВСЬКА І.А. – кандидат сільськогосподарських наук, доцент
orcid.org/0000-0003-0564-4457

Державний університет «Житомирська політехніка»

ГНІТЕЦЬКИЙ М.О. – доктор PhD з агрономії, доцент
orcid.org/0000-0002-8088-2677

ЗАХАРЧУК Н.А. – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник,
учений секретар
orcid.org/0000-0002-8194-2491

Інститут картоплярства НААН України

ОЛІЙНИК Т.М. – кандидат сільськогосподарських наук,
старший науковий співробітник, доцент
orcid.org/0000-0002-7235-9413

Інститут картоплярства НААН України

ВОЛОШИН І.Є. – старший викладач
orcid.org/0009-0003-2394-0660

Охтирський фаховий коледж

Сумського національного аграрного університету

Постановка проблеми. Екологічна стійкість агро-екосистем є одним із ключових завдань сучасного природокористування. Інтенсивний розвиток промисловості, транспортної інфраструктури, хімізація сільськогосподарства та інші види господарської діяльності призводять до накопичення важких металів у ґрунтах, що негативно впливає на їх екологічний стан, родючість і якість сільськогосподарської продукції. Актуальність полягає в тому, що в умовах змін клімату, які супроводжуються підвищенням середньорічної температури, зміню режимом атмосферних опадів і збільшенням частоти екстремальних погодних явищ. За оцінками IPCC (*The Intergovernmental Panel on Climate Change*) – МГЕЗК (Міжурядової групи експертів зі зміни клімату органу Організації Об'єднаних Націй з оцінки наукових даних, пов'язаних зі зміною клімату) <https://report.ipcc.ch/>, глобальна температура у 2011–2020 роках була приблизно на 1,1°C вищою порівняно з доіндустріальним періодом, що супроводжується змінами біогеохімічних процесів і посиленням ризиків деградації ґрунтів.

Під впливом кліматичних чинників змінюються міграція, рухливість і біодоступність важких металів, а це може сприяти їх інтенсивнішому надходженню до рослин та включенню у трофічні ланцюги. У зв'язку з цим особливого значення набуває пошук екологічно-безпечних способів очищення забруднених ґрунтів. Фіторе mediaція – це використання рослин для вилучення, стабілізації, або трансформації токсичних речовин, один з найбільш перспективних напрямів, на відміну від традиційних фізико-хімічних методів, фіторе mediaція характеризується відносно низькою вартістю, екологічною безпечністю та

можливістю відновлення екосистем без суттєвого порушення їх природної структури.

Метою дослідження є узагальнення сучасних наукових підходів, щодо використання фіторе mediaції, як екологічно безпечного методу відновлення ґрунтів, забруднених важкими металами, визначення ролі рослин-аккумулятивів у процесах зниження техногенного навантаження на агроекосистеми та обґрунтування перспектив застосування фіторе mediaційних технологій для забезпечення екологічної безпеки агроландшафтів в умовах кліматичних змін.

Матеріали та методика досліджень. Дослідження виконано із застосуванням комплексу загальнонаукових та спеціальних методів наукового пізнання. Інформаційною базою дослідження були результати сучасних вітчизняних [2, 5] і зарубіжних наукових праць [6, 9, 11], присвячених проблемам забруднення ґрунтів важкими металами [1, 3], фіторе mediaції [7, 10], фітоіндикації, екологічної безпеки агроекосистем [4, 12], раціонального природокористування та адаптації сільського господарства до змін клімату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема забруднення ґрунтів важкими металами належить до глобальних екологічних викликів, оскільки ґрунт є накопичувачом забруднювальних речовин і, водночас базою для виробництва продовольства. У звіті FAO та UNEP “Global Assessment of Soil Pollution” наголошено, що забруднення ґрунтів має прямі ризики для здоров'я людини, довкілля та продовольчої безпеки, а його наслідки часто є довготривалими й складними для усунення.



Сучасні дослідження [5, 8] підтверджують, що важкі метали, зокрема кадмій, свинець, нікель, мідь, цинк, хром і арсен, можуть накопичуватися у ґрунті, переходити в рослини та включатися у трофічні ланцюги. У 2025 році в журналі «Science» дано глобальну оцінку, згідно з якою близько 14–17% світових орних земель мають ризик забруднення токсичними металами, а від 0,9 до 1,4 млрд людей проживають у регіонах підвищеного екологічного та санітарного ризику.

У науковій літературі фіторе mediaція розглядається, як один із перспективних, екологічно безпечних і відносно економічно доступних методів відновлення забруднених ґрунтів [12–13]. Її сутність полягає у використанні рослин для вилучення, стабілізації, або зниження токсичності забруднювальних речовин у ґрунтового середовищі. До основних напрямів фіторе mediaції належать: фітоекстракція, фітостабілізація, ризофільтрація та фітодеградація [14–15]. Особливе значення мають рослини-акумулянти та гіперакумулянти, здатні поглинати й накопичувати підвищені концентрації важких металів у надземній, або кореневій біомасі. Рослини-акумулянти – це рослини, які накопичують у своїх тканинах (корінні, стебла, листках) різні хімічні елементи, зокрема важкі метали та токсичні речовини. Гіперакумулянти – це унікальні види, які мають ці елементи в екстремально високих концентраціях, часто в 100–1000 разів більших, ніж звичайні рослини, без шкоди для власного розвитку.

Дослідження науковців 2023–2025 рр. підкреслюють, що ефективність фіторе mediaції може підвищуватися за рахунок добору видів рослин, використання мікроорганізмів, біовугілля та інших екологічно безпечних допоміжних засобів [14–15].

Водночас ефективність фіторе mediaції значною мірою залежить від: властивостей ґрунту, рівня його забруднення, кислотності, вологості, температурного режиму та біологічних особливостей рослин. Окремі дослідження показують, що зміни клімату можуть впливати на рухливість важких металів у ґрунті, зокрема через зміну температури, вологості, мікробіому та кислотності ґрунтового середовища. У дослідженні 2024 року зазначено, що майбутні кліматичні умови можуть підвищувати рухливість кадмію, особливо в слабкокислих ґрунтах [13–14].

Отже, аналіз наукових джерел свідчить, що фіторе mediaція є перспективним напрямом раціонального природокористування та екологічного відновлення агроєкосистем. Водночас недостатньо дослідженими залишаються питання адаптації фіторе mediaційних технологій до умов кліматичних змін, зокрема впливу

посух, підвищення температури та зміни вологості ґрунту на акумуляцію важких металів рослинами. Саме ці аспекти визначають актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Результати досліджень. Забруднення ґрунтів важкими металами є одним із найбільш небезпечних проявів антропогенного впливу на довкілля. На відміну від більшості органічних забруднювачів, важкі метали практично не піддаються біологічному розкладанню, характеризуються високою стійкістю в навколишньому середовищі та здатністю накопичуватися у ґрунті протягом десятиліть. Це призводить до погіршення екологічного стану агроландшафтів, зниження родючості ґрунтів, порушення біогеохімічних циклів та зростання ризиків надходження токсичних елементів у продукцію рослинництва.

У сучасних умовах особливої актуальності проблема набуває внаслідок поєднання антропогенного навантаження зі змінами клімату: підвищення температури повітря, зміна режиму атмосферних опадів, збільшення тривалості посушливих періодів і зростання частоти екстремальних погодних явищ впливають на фізико-хімічні властивості ґрунтів, інтенсивність міграції поліюантів та їх біологічну доступність для рослин.

Основними джерелами надходження важких металів у ґрунти є діяльність промислових підприємств, транспорт, теплоенергетика, гірничодобувна промисловість, використання мінеральних добрив, засобів захисту рослин, органічних добрив і стічних вод. В останні роки до цих чинників в Україні додався негативний вплив воєнних дій, що супроводжується локальним забрудненням територій продуктами руйнування будівель, військової техніки та боєприпасів. (табл. 1).

Особливістю важких металів є їхня здатність переходити між окремими компонентами екосистеми. Спочатку вони накопичуються у ґрунті, після чого поглинаються кореневою системою рослин, переміщуються у надземні органи, а згодом через продукти харчування можуть потрапляти до організму людини і тварин. Саме тому оцінка міграції важких металів у системі «ґрунт – рослина – людина» є одним із найважливіших напрямів сучасної агроєкології (табл. 2).

Аналіз наведених даних свідчить, що джерела надходження важких металів мають переважно антропогенне походження. Найбільш небезпечними для агроландшафтів є кадмій і свинець, які характеризуються високою токсичністю навіть за незначних концентрацій. Особливу небезпеку становить їх накопичення у верхньому гумусовому горизонті, де формується основна маса кореневої системи сільськогосподарських культур.

Таблиця 1

Основні джерела надходження важких металів у ґрунт

Важкий метал	Основні джерела	Вплив на ґрунт	Рослини-акумулянти	Метод фіторе mediaції
Cd	Мінеральні добрива, промисловість	Висока рухливість	Гірчиця, соняшник	Фітоекстракція
Pb	Транспорт, металургія	Низька рухливість	Верба, тополя	Фітостабілізація
Zn	Промисловість, стоки	Помірна рухливість	Ріпак, амарант	Фітоекстракція
Cu	Засоби захисту рослин	Накопичення у верхньому шарі	Соняшник	Фітоекстракція

Таблиця 2

Основні джерела надходження важких металів у ґрунт та їх екологічні наслідки

Основні важкі метали	Джерело забруднення	Екологічні наслідки
Pb, Cd, Zn, Cu	Металургійна промисловість	Забруднення ґрунтів, зниження біологічної активності
Pb, Zn, Cu	Автомобільний транспорт	Локальне забруднення придорожніх територій
Cd, Pb	Мінеральні добрива	Накопичення токсичних елементів у орному шарі
Cu, As	Засоби захисту рослин	Порушення ґрунтової мікрофлори
Cd, Ni, Cr	Стічні води та осади	Вторинне забруднення агроландшафтів
Pb, Cu, Zn, Ni	Воєнні дії	Комплексне забруднення ґрунтового покриву

Таблиця 3

Найпоширеніші рослини-аккумулянти важких металів

Рослина	Основні метали	Основний механізм ремедіації	Практичне використання
Соняшник (<i>Helianthus annuus</i> L.)	Pb, Cd, Zn	Фітоекстракція	Очищення сільськогосподарських земель
Гірчиця сарептська (<i>Brassica juncea</i>)	Cd, Pb, Ni	Фітоекстракція	Рекультивация промислових територій
Верба (<i>Salix</i> spp.)	Cd, Zn, Cu	Фітостабілізація, фітоекстракція	Захисні смуги, рекультивация
Тополя (<i>Populus</i> spp.)	Pb, Zn, Cd	Фітостабілізація	Прибережні та урбанізовані території
Амарант (<i>Amaranthus</i> spp.)	Cd, Zn	Фітоекстракція	Дослідні та рекультивацийні ділянки
Ріпак (<i>Brassica napus</i> L.)	Cd, Zn	Фітоекстракція	Агроландшафти з помірним забрудненням

Міграція важких металів у системі «ґрунт – рослина». Поведінка важких металів у ґрунті визначається гранулометричним складом, вмістом органічної речовини, реакцією ґрунтового розчину, ємністю катіонного обміну та біологічною активністю ґрунту. Відомо, що в кислих ґрунтах рухливість кадмію, цинку та нікелю значно зростає, тоді як у нейтральному, або слабколужному середовищі більшість металів переходить у малодоступні форми.

Зміни клімату істотно впливають на зазначені процеси. Підвищення температури прискорює мінералізацію органічної речовини, що супроводжується вивільненням зв'язаних форм металів. Періоди тривалих опадів можуть сприяти їх вертикальній міграції, тоді, як посуха нерідко призводить до накопичення металів у верхніх горизонтах ґрунту.

Після надходження у ґрунтовий розчин важкі метали поглинаються кореневою системою рослин. Подальший їх транспорт здійснюється ксилемою до листків, стебел і генеративних органів. Ступінь накопичення визначається біологічними особливостями виду, сорту, або гібриду рослин, фізіологічним станом, а також концентрацією металів у середовищі.

Рослини-аккумулянти як основа фіторемедіації. Одним із найефективніших біологічних способів очищення забруднених територій є використання рослин-аккумулянтів, які здатні інтенсивно поглинати, транспортувати та накопичувати важкі метали у своїй біомасі. На відміну від традиційних фізико-хімічних методів рекультивациї, фіторемедіація не порушує структуру ґрунту, характеризується відносно невисокою вартістю та сприяє поступовому відновленню екологічних функцій агроecosистем.

Найбільш перспективними рослинами для очищення ґрунтів вважаються представники родин Brassicaceae, Salicaceae, Poaceae та Asteraceae (табл. 3). Вони відзначаються високою швидкістю росту, значною біомасою,

добре розвинутою кореневою системою та здатністю накопичувати підвищені концентрації кадмію, свинцю, цинку, міді й нікелю [11–12].

Дані таблиці 3 свідчать, що найбільший потенціал для очищення ґрунтів мають види, які поєднують високу продуктивність біомаси зі здатністю інтенсивно накопичувати токсичні елементи. Вибір рослин залежить від виду забруднення, ґрунтово-кліматичних умов, рівня концентрації металів і подальшого способу утилізації рослинної біомаси. Особливо перспективним є використання місцевих видів, адаптованих до конкретних природних умов, що підвищує ефективність фіторемедіації та зменшує ризики для агроecosистем.

Висновки. Встановлено, що забруднення ґрунтів важкими металами є одним із найнебезпечніших наслідків антропогенного впливу на агроecosистеми. Висока стійкість важких металів у навколишньому середовищі, їх здатність до біоаккумуляції та включення у трофічні ланцюги створюють довготривалі екологічні ризики для функціонування природних і аграрних екосистем, а також для здоров'я населення. Перспективи подальших досліджень доцільно спрямувати на розроблення інтегрованих систем ремедіації із застосуванням рослин-аккумулянтів, асоційованих ґрунтових мікроорганізмів та інших природоорієнтованих технологій, а також на оцінювання ефективності фіторемедіації за різних сценаріїв кліматичних змін.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

- Балюк С. А. Сучасні проблеми біологічної деградації чорноземів і способи збереження їх родючості. *Вісник аграрної науки*. 2016. № 1. С. 11–17.
- Стратегія збалансованого використання, відтворення і управління ґрунтовими ресурсами України / за ред. С. А. Балюка, В. В. Медведєва. Київ : Аграрна наука, 2012. 239 с.
- Фурдичко О. І., Дребот О. І., Дем'янюк О. С., Ткач Є. Д., Бунас А. А. Екологія агроcфери:

- підручник. Київ : ДІА, 2022. 336 с. <https://doi.org/10.33730/978-617-7785-30-8>.
4. Тараріко О. Г., Ільєнко Т. В., Кучма Т. Л., Білокінь О. А. Оцінювання впливу змін клімату на продуктивність агроєкосистем за супутниковими даними: рекомендації. Київ: Аграрна наука, 2021. 40 с.
 5. Арданов П. Є. (ред.), Герасько Т. В., Дем'янюк О. С. та ін. Агроєкологія та пермакультура: продовольча безпека, повоєнне відновлення, нульове забруднення, сталий розвиток : підручник. Київ : Талком, 2023. 240 с. <https://doi.org/10.36994/978-617-8352-05-9-2023-240>
 6. Sytar O., Taran N. Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine: a review. *Journal of Central European Agriculture*. 2022. Vol. 23(4). P. 881–884.
 7. Мельниченко В. Фіторемедіація ґрунтів, забруднених внаслідок військового та антропогенного впливу. *Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2024. Т. 20. № 4. С. 72–84. <https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.72>
 8. Борецька Ю., Джура Н., Романюк О. Фіторемедіація техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6. С. 72–76. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
 9. Alloway B. J. Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
 10. Kabata – Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2010. <https://doi.org/10.1201/b10158>
 11. Salt D. E., Smith R. D., Raskin I. Phytoremediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 1998. Vol. 49. P. 643–668.
 12. Sharma J. K., Kumar N., Singh N. P., Santal A. R. Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. *Frontiers in Plant Science*. 2023. Vol. 14. Article 1076876. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
 13. Hulich M., Kharchenko O., Yemchenko N., Olshevska O., Lyubarska L. The war in Ukraine: the problem of heavy metal contamination of agricultural land and products. *Environment & Health*. 2024. № 4(113). P. 38–44. <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.038>
 14. Chernychenko I., Lytvychenko O., Babii V., Kondratenko O., Hlavachek D. On the issue of determining the background level of soil pollution with heavy metals when determining the impact of military actions. *Environment & Health*. 2025. <https://doi.org/10.32402/dovkil2025.01.018>
 15. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), United Nations Environment Programme (UNEP). Global Assessment of Soil Pollution: Report. Rome : FAO, 2021.
 2. Baliuk, S. A., & Medvediev, V. V. (Eds.). (2012). *Stratehiia zbalansovanoho vykorystannia, vidtvorennia i upravlinnia gruntovymy resursamy Ukrainy* [Strategy for sustainable use, restoration and management of soil resources of Ukraine]. Kyiv : Ahrarna nauka. [in Ukrainian].
 3. Furdychko, O. I., Drebot, O. I., Demianiuk, O. S., Tkach, Ye. D., & Bunas, A. A. (2022). *Ekolohiia ahrosfery* [Ecology of the agrosphere]. Kyiv : DIA. <https://doi.org/10.33730/978-617-7785-30-8> [in Ukrainian].
 4. Tarariko, O. H., Iliencko, T. V., Kuchma, T. L., & Bilokin, O. A. (2021). *Otsiniuvannia vplyvu zmin klimatu na produktyvnist ahroekosystem za suputnykovymy danymy: rekomendatsii* [Assessment of climate change impacts on agroecosystem productivity using satellite data: Guidelines]. Kyiv : Ahrarna nauka. [in Ukrainian].
 5. Ardanov, P. Ye. (Ed.), Herasko, T. V., Demianiuk, O. S., et al. (2023). *Ahroekolohiia ta permakultura: prodovolcha bezpeka, povoiennie vidnovlennia, nulove zabrudnennia, stalyi rozvytok* [Agroecology and permaculture: Food security, post-war recovery, zero pollution, sustainable development]. Kyiv : Talkom. <https://doi.org/10.36994/978-617-8352-05-9-2023-240> [in Ukrainian].
 6. Sytar, O., & Taran, N. (2022). Effect of heavy metals on soil and crop pollution in Ukraine: A review. *Journal of Central European Agriculture*, 23(4), 881–884.
 7. Melnychenko, V. (2024). *Fitoremediatsiia gruntiv, zabrudnennykh vnaslidok viiskovoho ta antropohennoho vplyvu* [Phytoremediation of soils contaminated by military and anthropogenic impacts]. *Naukovi dopovidi Natsionalnogo universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy*, 20(4), 72–84. <https://doi.org/10.31548/dopovidi/3.2024.72> [in Ukrainian].
 8. Boretska, Yu., Dzhura, N., & Romaniuk, O. (2021). *Fitoremediatsiia tekhnohenno zabrudnennykh gruntiv z vykorystanniam enerhetychnykh kultur* [Phytoremediation of technogenically contaminated soils using energy crops]. *Ekolohichni nauky*, 6, 72–76. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11> [in Ukrainian].
 9. Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability* (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
 10. Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
 11. Salt, D. E., Smith, R. D., & Raskin, I. (1998). *Phytoremediation. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49, 643–668.
 12. Sharma, J. K., Kumar, N., Singh, N. P., & Santal, A. R. (2023). *Phytoremediation technologies and their mechanism for removal of heavy metal from contaminated soil: An approach for a sustainable environment. Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1076876. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1076876>
 13. Hulich, M., Kharchenko, O., Yemchenko, N., Olshevska, O., & Lyubarska, L. (2024). *The war in Ukraine: The problem of heavy metal contamination of agricultural land and products. Environment & Health*, 4(113), 38–44. <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.038>
 14. Chernychenko, I., Lytvychenko, O., Babii, V., Kondratenko, O., & Hlavachek, D. (2025). *On the issue of determining the background level of soil pollution with*

REFERENCES:

1. Baliuk, S. A. (2016). Suchasni problemy biolohichnoi dehradatsii chornozemiv i sposoby zberezhenia yikh rodiuchosti [Current problems of biological degradation of chernozems and ways of preserving their fertility]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 1, 11–17. [in Ukrainian].

heavy metals when determining the impact of military actions. *Environment & Health*. <https://doi.org/10.32402/dovkil2025.01.018>

15. Food and Agriculture Organization of the United Nations, & United Nations Environment Programme. (2021). *Global Assessment of Soil Pollution: Report*. Rome: FAO.

Кравченко Н.В., Можарівська І.А., Гнітецький М.О., Захарчук Н.А., Олійник Т.М., Волошин І.Є. Фіторе mediaція ґрунтів, забруднених важкими металами, як інструмент забезпечення екологічної безпеки агро екосистем в умовах кліматичних змін

Мета. Узагальнити дослідження сучасних наукових підходів, щодо використання фіторе mediaції, як екологічно безпечного методу відновлення ґрунтів, забруднених важкими металами, визначення ролі рослин-акумулянтів у процесах зниження техногенного навантаження на агро екосистеми та обґрунтування перспектив застосування фіторе mediaційних технологій для забезпечення екологічної безпеки агро ландшафтів в умовах кліматичних змін.

Методи. Дослідження виконано із застосуванням комплексу загальнонаукових та спеціальних методів наукового пізнання. Інформаційною базою дослідження були результати сучасних вітчизняних, і зарубіжних наукових праць, присвячених проблемам забруднення ґрунтів важкими металами, фіторе mediaції, фітоіндикації, екологічної безпеки агро екосистем, раціонального природокористування та адаптації сільського господарства до змін клімату. Методологічною основою дослідження стали методи аналізу, синтезу, порівняння, узагальнення та систематизації результатів вітчизняних і зарубіжних наукових досліджень з проблем забруднення ґрунтів важкими металами, особливостей їх міграції, застосування рослин-акумулянтів і технологій фіторе mediaції.

Результати. У роботі проаналізовано основні джерела надходження важких металів у ґрунтового середовища, особливості їх акумуляції в рослинах, механізми фіто екстракції, фітостабілізації та ризофільтрації. Встановлено, що ефективність фіторе mediaції залежить від біологічних особливостей рослин, властивостей ґрунту, концентрації політантів і гідротермічних умов. Показано, що зміни клімату можуть впливати на рухливості важких металів через зміну температурного режиму, вологості ґрунту та його кислотності, що потребує врахування цих факторів при виборі фіторе mediaційних технологій.

Висновки. Обґрунтовано, що використання рослин-акумулянтів є одним із перспективних напрямів раціонального природокористування, сприяє відновленню

екологічних функцій ґрунту та підвищенню екологічної безпеки агро екосистем.

Ключові слова: важкі метали, ґрунт, рослини-акумулянти, фіторе mediaція, екологічна безпека, агро екосистема, клімат.

Kravchenko N.V., Mozharivska I.A., Hnitskyi M.O., Zakharchuk N.A., Oliynyk T.M., Voloshyn I.Ye. Phytoremediation of soils contaminated with heavy metals as a tool for ensuring the ecological safety of agroecosystems in the context of climate change

Objective. To summarize the research of modern scientific approaches to the use of phytoremediation as an environmentally safe method of restoring soils contaminated with heavy metals, to determine the role of accumulative plants in the processes of reducing the technogenic load on agroecosystems and to substantiate the prospects for the use of phytoremediation technologies to ensure the ecological safety of agrolandscapes in the context of climate change.

Methods. The study was carried out using a complex of general scientific and special methods of scientific knowledge. The information base of the study was the results of modern domestic and foreign scientific works devoted to the problems of soil contamination by heavy metals, phytoremediation, phytoindication, ecological safety of agroecosystems, rational nature management and adaptation of agriculture to climate change. The methodological basis of the study was the methods of analysis, synthesis, comparison, generalization and systematization of the results of domestic and foreign scientific research on the problems of soil contamination by heavy metals, the features of their migration, the use of accumulating plants and phytoremediation technologies.

Results. The work analyzed the main sources of heavy metals entering the soil environment, the features of their accumulation in plants, the mechanisms of phytoextraction, phytostabilization and rhizofiltration. It was established that the effectiveness of phytoremediation depends on the biological characteristics of plants, soil properties, pollutant concentration and hydrothermal conditions. It was shown that climate change can affect the mobility of heavy metals through changes in temperature, soil moisture and acidity, which requires taking these factors into account when choosing phytoremediation technologies.

Conclusions. It is substantiated that the use of accumulator plants is one of the promising areas of rational environmental management, contributes to the restoration of soil ecological functions and increases the ecological safety of agroecosystems.

Key words: heavy metals, soil, accumulator plants, phytoremediation, ecological safety, agroecosystem, climate.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.08.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.09.2026