

СУЧАСНІ МЕТОДИ РЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ. ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ ЯК КЛЮЧ ДО ОЧИЩЕННЯ ҐРУНТІВ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ЕКОСИСТЕМ

ДАЦЬКО О.М. – доктор філософії

orcid.org/0000-0001-9610-3087

Сумський національний аграрний університет

ЯЦЕНКО В.М. – доктор філософії

orcid.org/0000-0001-7686-6634

Сумський національний аграрний університет

Постановка проблеми. Питання ремедіації ґрунтів в Україні є вкрай актуальним через воєнні дії на території нашої держави. Внаслідок збройної агресії відбувається забруднення біоценозів, паливно-мастильними матеріалами, вибуховими речовинами, важкими металами та іншими небезпечними речовинами, що призводить до погіршення стану агробіоценозів та екосистеми постраждалої території. Зокрема, внаслідок забруднення ґрунту важкими металами відбувається їх поглинання сільськогосподарськими культурами. Таким чином, метали потрапляють у трофічний ланцюг кінцевим пунктом якого є людський організм. Особливо небезпечні важкі метали, до яких відноситься Pb, Cd, Hg та інші, мають токсичний вплив на здоров'я людини, спричиняючи різноманітні захворювання, включаючи порушення функцій нервової системи, нирок, печінки та інших органів [1].

Заради вирішення проблеми із забрудненням ґрунтів важкими металами та хімічними елементами, науковцями були розроблені методи, які дозволяють відновити родючість ґрунту та зробити його придатним для вирощування сільськогосподарських культур. До найбільш поширених належать фізичні, хімічні, фізик-хімічні, біологічні методи очищення ґрунту [27]. Однак, найбільш перспективним та реалістичним у використанні в сучасних умовах України вважається метод фітореіміації. Суть методу полягає у поглинанні важких металів рослинами з подальшою утилізацією рослинної продукції. Загалом метод потребує вдосконалення, оскільки переважна більшість важких металів концентрується у кореневій системі рослин, яку досить складно повністю утилізувати [7].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нині істотний вплив воєнних дій доведено багатьма вченими [9, 32]. Так, наприклад, дослідження, були проведені в місцях постраждалих від воєнних дій, а саме в Сумському та Охтирському районі Сумської області, показали, що важкі метали, такі як Pb, Zn, Cd, Cu, Ni, Mn, містилися в ґрунті у вищій концентрації в місцях влучання авіабомб та артилерійських снарядів, ніж фонові значення цих елементів в природних умовах [32].

Науковці Дмитрук et al., (2023) та Копиця & Семенченко (2022) у своїй роботі дійшли висновку, що руйнування ґрунтових ресурсів внаслідок вибухів від снарядів та бомб, які вивільняють велику кількість енергії створюючи високий тиск та ударну хвилю спричиняють випалювання, дроблення та руйнування поверхні ґрунту, що призводить до зниження фізико-хімічних

і агрохімічних характеристик ґрунту, зниження біологічної активності та зниження родючості ґрунту [9, 19].

Разом із руйнуванням поверхні ґрунту відбувається забруднення водних ресурсів, наноситься шкода природним та біосферним заповідникам, місцям проживання флори та фауни, зокрема червонокнижної, погіршення стану ґрунту негативно впливає на склад ґрунтової біоти яка знаходиться в ньому [20]. Важливо також розуміти, що забруднення ґрунтів викликається не лише обстрілами, але і пожежами, та ін [8]. Особливо токсичними джерелами забруднення ґрунту є знищена техніка забезпечення, а саме вантажівки з паливно-мастильними матеріалами, та пошкодження внаслідок масованих обстрілів підприємств хімічної галузі, що знаходяться неподалік від сільськогосподарських угідь [18]. Важливо зазначити, що наслідки забруднення великих територій призводить також і до економічних збитків [29].

Мета дослідження полягає в оцінці ефективності та потенціалу фітореіміаційних технологій у відновленні та очищенні забруднених ґрунтів від важких металів та інших забруднювачів, з метою зниження негативного впливу на природні та антропогенні екосистеми.

Результати досліджень. Наукові дослідження проведені закордонними вченими [2, 7] свідчать про наявність певної групи рослин, так званих гіперакумуляторів важких металів. Гіперакумулятори це рослини, що здатні рости на ґрунтах, які багаті на важкі метали поглинають велику кількість цих металів під час періоду вегетації при цьому не виявляють жодних ознак фітотоксичності [26]. Перелік культур які відносяться до гіперакумуляторів важких металів наведена у таблиці 1.

Серед вищенаведених культур найбільш широкий діапазон поглинання мають горох (*Pisum sativum L.*) та міскантус (*Miscanthus giganteus*), що робить їх придатними до вирощування на ґрунтах, які постраждали від воєнної агресії та, з великою вірогідністю, вельми забруднені. Проте, варто визначитись із доцільністю використання тієї чи іншої культури у фітореіміації сільськогосподарських земель. Як видно із таблиці, декілька з цих культур є енергетичними, тобто тими, що використовують для виробництва енергоресурсів типу брекетів та пелет. Зокрема, рицина (*Ricinus communis L.*) може бути використана для виробництва біоетанолу, що робить її особливо корисною у контексті фітореіміації, оскільки її біомасу не планують використовувати у харчових цілях [24].

Вирощування енергетичних культур таких як міскантус (*Miscanthus giganteus*) також сприяє підвищенню

Перелік культур гіперакумуляторів важких металів

Культура	Поглинає під час вегетації	Посилання
<i>Miscanthus giganteus</i>	As, Pb, Zn, Co, Ni, Cr, Cu, V, U, Mn, Sr	[2, 21, 22]
<i>Brassica juncea</i> L.	Cd, Zn, Hg, As, Pb	[11, 25, 31]
<i>Fagopyrum esculentum</i> Moench	Pb, Cd, Zn	[3, 10, 17]
<i>Ricinus communis</i> L.	Cd, Pb, Ni, As, Cu, паливно-мастильні матеріали	[5, 15, 33]
<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	Cd, Pb, As, нафтові вуглеводні	[6, 16, 23, 30]
<i>Pisum sativum</i> L.	Cd, Cr, Fe, Pb, Co, Cu, Mo, Zn, U	[12, 14, 28]
<i>Chenopodium quinoa</i> Willd	Cd, Pb, Cu, Ni	[4, 13]

енергетичної стабільності країни. Що в свою чергу, зменшує залежність від традиційних викопних видів палива та сприяє розвитку відновлюваних джерел енергії.

Крім того, важливо враховувати кліматичні особливості регіону при виборі культури для фітореMediaції. Наприклад, сорго (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) яке традиційно вирощують на півдні України через біологічні особливості культури до температурного режиму.

Висновки. Отже, при плануванні фітореMediaційних заходів необхідно враховувати як тип забруднення, так і можливість подальшого використання біомаси. Це дозволить не лише ефективно очищати ґрунти, але й забезпечити додаткові економічні переваги та мінімізувати ризики для здоров'я населення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Маслак Г., Абдул-Огли Л., Нефьодова О., Нефьодов О., Земляний О., Стрижак О. Вплив важких металів на морфологічні структури травної системи (огляд даних літератури). *Перспективи та інновації науки*. 2024. Вип. 2. № 36. С. 1136-1148. [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-2\(36\)-1136-1148](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-2(36)-1136-1148)
2. Alasmay Z., Hettiarachchi G. M., Roozeboom K. L., Davis L. C., Erickson L. E., Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Trögl J. Phytostabilization of a contaminated military site using *Miscanthus* and soil amendments. *Journal of Environmental Quality*. 2021. Vol. 50. № 5. P. 1220–1232. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20268>
3. Alves J. D. C., Souza A. P. D., Pôrto M. L. A., Fontes R. L. F., Arruda J., Marques L. F. Potential of sunflower, castor bean, common buckwheat and vetiver as lead phytoaccumulators. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2016. Vol. 20. № 3. P. 243–249. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n3p243-249>
4. Amjad M., Iqbal M. M., Abbas G., Farooq A. B. U., Naeem M. A., Imran M., Murtaza B., Nadeem M., Jacobsen S.-E. Assessment of cadmium and lead tolerance potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) and its implications for phytoremediation and human health. *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. Vol. 44. № 5. P. 1487–1500. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00826-0>
5. Bauddh K., Singh K., Singh B., Singh R. P. Ricinus communis: A robust plant for bio-energy and phytoremediation of toxic metals from contaminated soil. *Ecological Engineering*. 2015. Vol. 84. P. 640–652. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.038>
6. Boechat C. L., Carlos F. S., Nascimento C. W. A. D., Quadros P. D. D., Sá E. L. S. D., Camargo F. A. D. O. Bioaugmentation-assisted phytoremediation of As, Cd, and Pb using *Sorghum bicolor* in a contaminated soil of an abandoned gold ore processing plant. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*. 2020. Vol. 44. P. e0200081. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200081>
7. Chernysh Y., Chubur V., Ablieieva I., Skvortsova P., Yakhnenko O., Skydanenko M., Plyatsuk L., & Roubik H. Soil Contamination by Heavy Metals and Radionuclides and Related Bioremediation Techniques: A Review. *Soil Systems*. 2024. Vol. 8. № 2. P. 36. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020036>
8. Чавлюк Г. В., Грубінко В. В., Гуменюк Н. Б., Мацюк О. Б. Як війна знищує екологію України. Наукові записки ТНПУ Серія: Біологія. 2023. Вип. 82. № 4. С. 49–64. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.22.4.6>
9. Dmytruk Y., Cherlinka V., Cherlinka L., Dent D. Soils in war and peace. *International Journal of Environmental Studies*. 2023. Vol. 80. № 2. P. 380–393. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2152254>
10. Domańska J., Leszczyńska D., Badora A. The Possibilities of Using Common Buckwheat in Phytoremediation of Mineral and Organic Soils Contaminated with Cd or Pb. *Agriculture*. 2021. Vol. 11. № 6. P. 562. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060562>
11. Du J., Guo Z., Li R., Ali A., Guo D., Lahori A. H., Wang P., Liu X., Wang X., Zhang Z. Screening of Chinese mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars for the phytoremediation of Cd and Zn based on the plant physiological mechanisms. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 261. P. 114213. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114213>
12. Eid E. M., El-Bebany A. F., Taher M. A., Alrumman S. A., Galal T. M., Shaltout K. H., Sewelam N. A., Ahmed M. T. Heavy Metal Bioaccumulation, Growth Characteristics, and Yield of *Pisum sativum* L. Grown in Agricultural Soil-Sewage Sludge Mixtures. *Plants*. 2020. Vol. 9. № 10. P. 1300. <https://doi.org/10.3390/plants9101300>
13. Ghaus M., Iqbal S., Bakhtavar M. A., Nawaz F., Haq T. U., Khan S. Halophyte quinoa: A potential hyperaccumulator of heavy metals for phytoremediation. *Asian Journal of Agriculture and Biology*. 2022. Vol. 4. P. 9. <https://doi.org/10.35495/ajab.2021.444>
14. Gupta D. K., Vuković A., Semenishchev V. S., Inouhe M., Walther C. Uranium accumulation and its phytotoxicity symptoms in *Pisum sativum* L. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27. № 3. P. 3513–3522. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07068-9>
15. Hasibuan S. Y. K., Yani M., Mansur I. The effectiveness of oil spill dispersant addition for phytoremediation of

- petroleum-contaminated soil using *Ricinus communis* L. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*. 2019. Vol. 6. № 3. P. 1811–1819.
16. He H., Liu L., Munir S., Bashir N. H., Wang Y., Yang J., Li C. Crop diversity and pest management in sustainable agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*. 2019. Vol. 18. № 9. P. 1945–1952. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62689-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62689-4)
 17. Kaplan N. O., Akay A. The determination of Cd and Zn phytoremediation potential of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Desalination and Water Treatment*. 2018. Vol. 133. P. 146–152.
 18. Khrushch O., Moskalets V., Fedyk O., Karpiuk Y., Hasiuk M., Ivantsev N., Ivantsev L., Arjjumend H. (2023). Environmental and Psychological Effects of Russian War in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2023. Vol. 6. № 1. P. 37–84. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.060103>
 19. Kopytsia Y., Semenchenko T. Environmental consequences of Russian aggression invasion of Ukraine (2022). *Economics. Finances. Law*. 2022. Vol. 6. № 1. P. 5–10. [https://doi.org/10.37634/efp.2022.6\(1\).1](https://doi.org/10.37634/efp.2022.6(1).1)
 20. Макаренко Н., Строкаль В., Бережняк Є., Бондар В., Павлюк С., Вагалюк Л., Наумовська О., Ладика М., Ковпак А. Вплив російської воєнної агресії на природні ресурси України: аналіз ситуації, методологія оцінювання. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2022. Вип. (4). № 98. <https://doi.org/10.31548/dopovidi2022.04.003>
 21. Nebeská D., Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Trögl J., Shapoval P., Popelka J., Černý J., Medkow A., Kvak V., Malinská H. Impact of plant growth regulators and soil properties on *Miscanthus x giganteus* biomass parameters and uptake of metals in military soils. *Reviews on Environmental Health*. 2019. Vol. 34. № 3. P. 283–291. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0088>
 22. Nurzhanova A., Pidlisnyuk V., Abit K., Nurzhanov C., Kenessov B., Stefanovska T., Erickson L. Comparative assessment of using *Miscanthus x giganteus* for remediation of soils contaminated by heavy metals: A case of military and mining sites. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. № 13. P. 13320–13333. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04707-z>
 23. Osman H. E., Fadhallah R. S., Alamoudi W. M., Eid, E. M., Abdelhafez A. A. Phytoremediation Potential of Sorghum as a Bioenergy Crop in Pb-Amendment Soil. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. № 3. P. 2178. <https://doi.org/10.3390/su15032178>
 24. Osorio-González C. S., Gómez-Falcon N., Sandoval-Salas F., Saini R., Brar S. K., Ramírez A. A. Production of Biodiesel from Castor Oil: A Review. *Energies*. 2020. Vol. 13. № 10. P. 2467. <https://doi.org/10.3390/en13102467>
 25. Raj D., Kumar A., Maiti S. K. *Brassica juncea* (L.) Czern. (Indian mustard): A putative plant species to facilitate the phytoremediation of mercury contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*. 2020. Vol. 22. № 7. P. 733–744. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1708861>
 26. Rascio N., Navari-Izzo F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*. 2011. Vol. 180. № 2. P. 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>
 27. Samokhvalova V. L. Biological methods of remediation soil contaminated by heavy metals. *Studia Biologica*. 2014. Vol. 8. № 1. P. 217–236. <https://doi.org/10.30970/sbi.0801.337>
 28. Slima D. F., Ahmed D. A. E.-A. 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, № 4. P. 2749–2760. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00341-8>
 29. Tytykalo R., Pavlovska N., Andriiets M. Economic and administrative methods of restoration by local governments of the environment of Ukraine destroyed as a result of military operations. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2022. Vol. 8. № 5. P. 184–190. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2022-8-5-184-190>
 30. Xiao M.-Z., Sun Q., Hong S., Chen W.-J., Pang B., Du Z.-Y., Yang W.-B., Sun Z., Yuan T.-Q. Sweet sorghum for phytoremediation and bioethanol production. *Journal of Leather Science and Engineering*. 2021. Vol. 3. № 1. P. 32. <https://doi.org/10.1186/s42825-021-00074-z>
 31. Yang W., Luo L., Bostick B. C., Wiita E., Cheng Y., Shen Y. Effect of combined arsenic and lead exposure on their uptake and translocation in Indian mustard. *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 274. P. 116549. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116549>
 32. Zaitsev Yu., Hryshchenko O., Romanova S., Zaitseva I. Influence of combat actions on the content of gross forms of heavy metals in the soils of Sumy and Okhtyrka districts of Sumy region. *Agroecological journal*. 2022. Vol. 3. P. 136–149. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>
 33. Zhang H., Guo Q., Yang J., Ma J., Chen G., Chen T., Zhu, G., Wang J., Zhang G., Wang X., Shao C. Comparison of chelates for enhancing *Ricinus communis* L. phytoremediation of Cd and Pb contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Vol. 133. P. 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.05.036>

REFERENCES:

1. Maslak, H., Abdul-Ohly, L., Nefodova, O., Nefodov, O., Zemlianyi, O., & Stryzhak, O. (2024). Vplyv vazhkykh metaliv na morfolohichni struktury travnoi systemy (ohliad danykh literatury). [The effect of heavy metals on the morphological structures of the digestive system (literature review)]. *Prospects and innovations of science*, 2(36). [https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-2\(36\)-1136-1148](https://doi.org/10.52058/2786-4952-2024-2(36)-1136-1148) [in Ukrainian]
2. Alasmay, Z., Hettiarachchi, G. M., Roozeboom, K. L., Davis, L. C., Erickson, L. E., Pidlisnyuk, V., Stefanovska, T., & Trögl, J. (2021). Phytostabilization of a contaminated military site using *Miscanthus* and soil amendments. *Journal of Environmental Quality*, 50(5), 1220–1232. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20268>
3. Alves, J. D. C., Souza, A. P. D., Pôrto, M. L. A., Fontes, R. L. F., Arruda, J., & Marques, L. F. (2016). Potential of sunflower, castor bean, common buckwheat and vetiver as lead phytoaccumulators. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(3), 243–249. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n3p243-249>
4. Amjad, M., Iqbal, M. M., Abbas, G., Farooq, A. B. U., Naeem, M. A., Imran, M., Murtaza, B., Nadeem, M., & Jacobsen, S.-E. (2022). Assessment of cadmium and lead tolerance potential of quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) and its implications for phytoremediation

- and human health. *Environmental Geochemistry and Health*, 44(5), 1487–1500. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00826-0>
5. Bauddh, K., Singh, K., Singh, B., & Singh, R. P. (2015). *Ricinus communis*: A robust plant for bio-energy and phytoremediation of toxic metals from contaminated soil. *Ecological Engineering*, 84, 640–652. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.038>
 6. Boechat, C. L., Carlos, F. S., Nascimento, C. W. A. D., Quadros, P. D. D., Sá, E. L. S. D., & Camargo, F. A. D. O. (2020). Bioaugmentation-assisted phytoremediation of As, Cd, and Pb using *Sorghum bicolor* in a contaminated soil of an abandoned gold ore processing plant. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 44, e0200081. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200081>
 7. Chernysh, Y., Chubur, V., Ablieieva, I., Skvortsova, P., Yakhnenko, O., Skydanenko, M., Plyatsuk, L., & Roubík, H. (2024). Soil Contamination by Heavy Metals and Radionuclides and Related Bioremediation Techniques: A Review. *Soil Systems*, 8(2), 36. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8020036>
 8. Chvaliuk, H. V., Hrubinko, V. V., Humeniuk, H. B., & Matsiuk, O. B. (2023). Yak viina znyshchue ekolohiiu Ukrainy [War destroying the ecology of Ukraine]. *Scientific Issue Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University. Series: Biology*, 82(4), 49–64. <https://doi.org/10.25128/2078-2357.22.4.6> [in Ukrainian]
 9. Dmytruk, Y., Cherlinka, V., Cherlinka, L., & Dent, D. (2023). Soils in war and peace. *International Journal of Environmental Studies*, 80(2), 380–393. <https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2152254>
 10. Domańska, J., Leszczyńska, D., & Badora, A. (2021). The Possibilities of Using Common Buckwheat in Phytoremediation of Mineral and Organic Soils Contaminated with Cd or Pb. *Agriculture*, 11(6), 562. <https://doi.org/10.3390/agriculture11060562>
 11. 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>
 12. Eid, E. M., El-Bebany, A. F., Taher, M. A., Alrumman, S. A., Galal, T. M., Shaltout, K. H., Sewelam, N. A., & Ahmed, M. T. (2020). Heavy Metal Bioaccumulation, Growth Characteristics, and Yield of *Pisum sativum* L. Grown in Agricultural Soil-Sewage Sludge Mixtures. *Plants*, 9(10), 1300. <https://doi.org/10.3390/plants9101300>
 13. Ghaus, M., Iqbal, S., Bakhtavar, M. A., Nawaz, F., Haq, T. U., & Khan, S. (2022). Halophyte quinoa: A potential hyperaccumulator of heavy metals for phytoremediation. *Asian Journal of Agriculture and Biology*, 4. <https://doi.org/10.35495/ajab.2021.444>
 14. Gupta, D. K., Vuković, A., Semenishchev, V. S., Inouhe, M., & Walther, C. (2020). Uranium accumulation and its phytotoxicity symptoms in *Pisum sativum* L. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(3), 3513–3522. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07068-9>
 15. Hasibuan, S. Y. K., Yani, M., & Mansur, I. (2019). The effectiveness of oil spill dispersant addition for phytoremediation of petroleum-contaminated soil using *Ricinus communis* L. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 6(3), 1811–1819.
 16. He, H., Liu, L., Munir, S., Bashir, N. H., Wang, Y., Yang, J., & Li, C. (2019). Crop diversity and pest management in sustainable agriculture. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(9), 1945–1952. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62689-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62689-4)
 17. Kaplan, N. O., & Akay, A. (2018). The determination of Cd and Zn phytoremediation potential of buckwheat (*Fagopyrum esculentum*). *Desalination and Water Treatment*, 133, 146–152.
 18. Khrushch, O., Moskalets, V., Fedyk, O., Karpiuk, Y., Hasiuk, M., Ivantsev, N., Ivantsev, L., & Arjjumend, H. (2023). Environmental and Psychological Effects of Russian War in Ukraine. *Grassroots Journal of Natural Resources*, 6(1), 37–84. <https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.060103>
 19. Kopytsia, Y., & Semenchenko, T. (2022). Environmental consequences of Russian aggression invasion of Ukraine (2022). *Economics. Finances. Law*, 6/1, 5–10. [https://doi.org/10.37634/efp.2022.6\(1\).1](https://doi.org/10.37634/efp.2022.6(1).1)
 20. Makarenko, N., Stokal, V., Berezhniak, Ye., Bondar, V., Pavliuk, S., Vagaliuk, L., Naumovska, O., Ladyka, M., & Kovpak, A. (2022). Vplyv rosiiskoi voiennoi ahresii na pryrodni resursy Ukrainy: analiz sytuatsii, metodolohiia otsiniuvannia. [The war consequences on natural resources of Ukraine: analyses and methodologies]. *Naukovi Dopovidi Nacional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannâ Ukraini*, 2022(4). <https://doi.org/10.31548/dopovidi2022.04.003> [in Ukrainian]
 21. Nebeská, D., Pidlisnyuk, V., Stefanovska, T., Trögl, J., Shapoval, P., Popelka, J., Černý, J., Medkow, A., Kvak, V., & Malinská, H. (2019). Impact of plant growth regulators and soil properties on *Miscanthus x giganteus* biomass parameters and uptake of metals in military soils. *Reviews on Environmental Health*, 34(3), 283–291. <https://doi.org/10.1515/reveh-2018-0088>
 22. Nurzhanova, A., Pidlisnyuk, V., Abit, K., Nurzhanov, C., Kenessov, B., Stefanovska, T., & Erickson, L. (2019). Comparative assessment of using *Miscanthus x giganteus* for remediation of soils contaminated by heavy metals: A case of military and mining sites. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(13), 13320–13333. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04707-z>
 23. Osman, H. E., Fadhlallah, R. S., Alamoudi, W. M., Eid, E. M., & Abdelhafez, A. A. (2023). Phytoremediation Potential of Sorghum as a Bioenergy Crop in Pb-Amendment Soil. *Sustainability*, 15(3), 2178. <https://doi.org/10.3390/su15032178>
 24. Osorio-González C. S., Gómez-Falcon N., Sandoval-Salas F., Saini R., Brar S. K., Ramírez A. A. (2020). Production of Biodiesel from Castor Oil: A Review. *Energies*, 13(10), 2467. <https://doi.org/10.3390/en13102467>
 25. Raj, D., Kumar, A., & Maiti, S. K. (2020). *Brassica juncea* (L.) Czern. (Indian mustard): A putative plant species to facilitate the phytoremediation of mercury contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*, 22(7), 733–744. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1708861>
 26. Rascio, N., & Navari-Izzo, F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 180(2), 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>
 27. Samokhvalova, V. L. (2014). Biological methods of remediation soil contaminated by heavy metals. *Studia*

- Biologica*, 8(1), 217–236. <https://doi.org/10.30970/sbi.0801.337>
28. 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*, 20(4), 2749–2760. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00341-8>
 29. Tytykalo, R., Pavlovska, N., & Andriets, M. (2022). Economic and administrative methods of restoration by local governments of the environment of Ukraine destroyed as a result of military operations. *Baltic Journal of Economic Studies*, 8(5), 184–190. <https://doi.org/10.30525/2256-0742/2022-8-5-184-190>
 30. Xiao, M.-Z., Sun, Q., Hong, S., Chen, W.-J., Pang, B., Du, Z.-Y., Yang, W.-B., Sun, Z., & Yuan, T.-Q. (2021). Sweet sorghum for phytoremediation and bioethanol production. *Journal of Leather Science and Engineering*, 3(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s42825-021-00074-z>
 31. Yang, W., Luo, L., Bostick, B. C., Wiita, E., Cheng, Y., & Shen, Y. (2021). Effect of combined arsenic and lead exposure on their uptake and translocation in Indian mustard. *Environmental Pollution*, 274, 116549. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116549>
 32. Zaitsev, Yu., Hryshchenko, O., Romanova, S., & Zaitseva, I. (2022). Influence of combat actions on the content of gross forms of heavy metals in the soils of Sumy and Okhlyrka districts of Sumy region. *Agroecological journal*, 3, 136–149. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>
 33. Zhang, H., Guo, Q., Yang, J., Ma, J., Chen, G., Chen, T., Zhu, G., Wang, J., Zhang, G., Wang, X., & Shao, C. (2016). Comparison of chelates for enhancing *Ricinus communis* L. phytoremediation of Cd and Pb contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 133, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.05.036>

Дацько О.М., Яценко В.М. Сучасні методи ремедіації ґрунтів. Фіторемерація як ключ до очищення ґрунтів та збереження екосистем

Мета дослідження полягає в оцінці ефективності та потенціалу фіторемераційних технологій у відновленні та очищенні забруднених ґрунтів від важких металів та інших забруднювачів з метою зниження негативного впливу на природні та антропогенні екосистеми внаслідок війни на території України.

Методи дослідження включали огляд джерел літератури, які відображали використання сучасних наукових підходів для аналізу впливу важких металів на екосистеми та оцінки ефективності фіторемерації.

Результати. Аналіз огляду літератури показав, що методи фіторемерації є найбільш перспективними для умов України. Було використано ряд лабораторних та польових досліджень для визначення здатності рослин-гіперакумуляторів до поглинання важких металів із забруднених ґрунтів. Результати досліджень багатьох вчених показали, що деякі рослини, такі як *Miscanthus giganteus* та *Pisum sativum*, мають високий потенціал для використання у фіторемераційних заходах. Вони здатні ефективно поглинати важкі метали та інші забруднювачі із ґрунту, що сприяє його очищенню та відновленню. Окрім того, використання таких рослин може мати додаткові економічні переваги, наприклад, у виробництві біоетанолу або інших біоенергетичних ресурсів.

Висновки. При плануванні фіторемераційних заходів необхідно враховувати як тип забруднення, так

і можливість подальшого використання біомаси. Це дозволить не лише ефективно очищати ґрунти, але й забезпечити додаткові економічні переваги та мінімізувати ризики для здоров'я населення. Фіторемерація, як метод відновлення забруднених територій, має значний потенціал для збереження екосистем та забезпечення сталого розвитку сільського господарства в Україні.

Завдяки використанню рослин-гіперакумуляторів можна досягти суттєвого зниження концентрації важких металів у ґрунтах, що сприятиме відновленню біорізноманіття та покращенню екологічного стану постраждалих територій. У подальших дослідженнях слід зосередитися на оптимізації методів фіторемерації для різних типів ґрунтів та забруднювачів, а також на вивченні можливостей інтеграції цих методів у загальні програми екологічного відновлення та сталого землекористування.

Ключові слова: важкі метали, гіперакумулятори, біорізноманіття, сільськогосподарські культури, забруднення від війни, екологічне відновлення, горох, міскантус.

Datsko O.M., Yatsenko V.M. Modern methods of soil remediation. Phytoremediation as a key to soil purification and ecosystem preservation

Objective: The aim of the study is to evaluate the efficiency and potential of phytoremediation technologies in the restoration and purification of soils contaminated by heavy metals and other pollutants to reduce the negative impact on natural and anthropogenic ecosystems due to the war in Ukraine.

Methods: The research methods included a review of literature sources reflecting the use of modern scientific approaches to analyze the impact of heavy metals on ecosystems and to assess the effectiveness of phytoremediation.

Results: The literature review analysis showed that phytoremediation methods are the most promising for the conditions in Ukraine. Various laboratory and field studies were used to determine the ability of hyperaccumulator plants to absorb heavy metals from contaminated soils. The results of studies by many scientists have shown that some plants, such as *Miscanthus giganteus* and *Pisum sativum*, have high potential for use in phytoremediation measures. They can effectively absorb heavy metals and other pollutants from the soil, contributing to its purification and restoration. Additionally, the use of such plants can have additional economic benefits, for example, in the production of bioethanol or other bioenergy resources.

Conclusions: When planning phytoremediation measures, it is necessary to consider both the type of contamination and the possibility of further use of biomass. This will allow not only effective soil purification but also provide additional economic benefits and minimize health risks to the population. Phytoremediation, as a method of restoring contaminated areas, has significant potential for ecosystem preservation and sustainable agricultural development in Ukraine. The use of hyperaccumulator plants can significantly reduce the concentration of heavy metals in soils, which will contribute to the restoration of biodiversity and improve the ecological state of affected areas. Future research should focus on optimizing phytoremediation methods for different types of soils and pollutants, as well as exploring the possibilities of integrating these methods into general environmental restoration programs and sustainable land use practices.

Key words: heavy metals, hyperaccumulators, biodiversity, agricultural crops, war pollution, ecological restoration, peas, miscanthus.