

ФІТОРЕМЕДІАЦІЯ ЯК ЕЛЕМЕНТ СТРАТЕГІЇ СТАЛОГО ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ

Сидоренко О.І.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, sydorenko.olexandra@ill.kpi.ua

Abstract

This article highlights phytoremediation as a sustainable method for restoring soils contaminated during military operations in Ukraine. It examines the ecological, economic, and biotechnological aspects of using plants for detoxifying war-affected areas, emphasizing its role in post-conflict land rehabilitation.

Keywords: *phytoremediation, heavy metals, soil contamination, military pollution, sustainable land use, Ukraine.*

Вступ. Внаслідок широкомасштабної військової агресії на території України екологічний стан ґрунтових екосистем зазнав значного погіршення. Забруднення земель важкими металами, паливно-мастильними матеріалами, залишками боеприпасів та продуктами горіння є серйозною проблемою, яка ускладнює подальше використання цих територій у сільському господарстві [1]. У цьому контексті особливої актуальності набуває розробка та впровадження технологій, що узгоджуються з принципами сталого землекористування. Однією з таких перспективних технологій є фіторемедіація – біологічний метод очищення ґрунтів за допомогою вищих рослин, які мають здатність акумулювати або знешкоджувати різноманітні забруднювальні агенти [2]. Метою дослідження є:

1. Виявити основні види рослин-акумуляторів, що використовуються для очищення ґрунтів від різних типів металевого забруднення.
2. Систематизувати інформацію про придатність різних видів рослин-акумуляторів до різних типів ґрунтів.
3. Узагальнити дані щодо рівнів концентрації металів, які можуть накопичуватися в різних рослинах-акумуляторах.
4. Описати існуючі методи та підходи для підвищення ефективності процесу фіторемедіації забруднених ґрунтів.

Матеріали та методи. Робота є аналітичним оглядом наукових літературних джерел, присвячених застосуванню рослин-акумуляторів металів для фіторемедіації ґрунтів, забруднених внаслідок воєнних дій. Проаналізовано існуючі дослідження щодо видів рослин, характеру забруднення та способів підвищення ефективності процесу фіторемедіації.

Результати та обговорення. Фіторемедіація, як екологічно безпечна та економічно ефективна стратегія, набуває все більшого значення у відновленні земель, забруднених важкими металами [3]. Її застосування ґрунтується на здатності певних видів рослин поглинати, транспортувати та накопичувати важкі метали у своїй біомасі або стабілізувати їх у ґрунті, запобігаючи подальшому поширенню забруднення [2]. Метод характеризується низкою важливих переваг, зокрема економічною доцільністю, екологічною безпечністю, технологічною

простотою у впровадженні, а також потенціалом для одночасного озеленення й часткової рекультивації територій [3].

Внаслідок обстрілів у Харківській області на одному квадратному кілометрі поля було вивільнено близько 50 тонн заліза, 1 тонна сірки та 2,35 тонни міді. Окрім цього, значно перевищено гранично допустимі концентрації токсичних елементів: свинець збільшився з 20–50 мг/кг до 70–150 мг/кг, кадмій — з 0,3–1,0 мг/кг до 2,0–5,0 мг/кг, цинк — з 50–150 мг/кг до 200–400 мг/кг, а рівні ртуті, миш'яку, хрому, нікелю, марганцю, селену й алюмінію також значно підвищились. Це спричиняє серйозну загрозу для навколишнього середовища та здоров'я людей.

Забруднення такого масштабу потребує ефективних методів відновлення екосистем, і одним із таких є фітореMediaція. Цей процес передбачає використання рослин для очищення забруднених територій, оскільки деякі види здатні акумулювати токсичні елементи, знижуючи їх концентрацію в ґрунті. Для ефективного застосування фітореMediaції важливо вибирати рослини, які мають високу здатність до накопичення важких металів без шкоди для їхнього росту. Наприклад, *Brassica*, *Salix*, *Helianthus* та *Populus* є перспективними для такого очищення.

Вибір правильних видів рослин і врахування місцевих умов дає змогу не лише знижувати рівень токсичних речовин у ґрунті, а й відновлювати здоров'я екосистеми, що сприяє покращенню якості навколишнього середовища та життєдіяльності людей.

Враховуючи специфіку забруднення та необхідність адаптації до українського агроклімату, застосування видів-гіперакумуляторів для фітореMediaції земель, забруднених внаслідок військових дій, є важливим кроком у відновленні екологічної ситуації. Вибір таких рослин необхідно здійснювати, враховуючи особливості забруднювачів, що накопичуються в ґрунті та рослинах, а також умови їх росту. Зокрема, для ефективної фітореMediaції в Україні потрібно зважати на такі фактори:

- ґрунти із високим вмістом важких металів (*Cd*, *Pb*, *Zn*). Для таких умов ефективним є використання *Helianthus annuus* (соняшник) та *Brassica juncea* (гірчиця сарептська). Ці рослини здатні накопичувати значні концентрації важких металів: *Cd* до 40 мг/кг, *Pb* до 2000 мг/кг, *Zn* до 7000 мг/кг. Важливим є підвищення ефективності фітореMediaції шляхом застосування хелатуючих агентів, таких як EDTA, а також використання мікоризних асоціацій, що сприяють підвищеній абсорбції забруднювачів [1];

- вологі ділянки із вмістом *Cu* та *Fe*. Для цих умов ефективним є *Phragmites australis* (очерет звичайний), що може акумулювати *Cu* до 100 мг/кг та *Fe* до 2000 мг/кг. Застосування органічних добавок у ґрунт (наприклад, компосту) може значно збільшити ефективність фітореMediaції, покращуючи умови росту рослини та її здатність до поглинання металів;

- стабілізація важких металів. У випадку, коли основною метою є стабілізація важких металів у ґрунті без їх транспортування в рослинні тканини, рекомендованою рослиною є *Populus spp.* (тополя). Цей вид має високий

потенціал для фітостабілізації, що допомагає зменшити мобільність важких металів в екосистемі;

- *слабо забруднені території*. Для таких умов підходить *Zea mays* (кукурудза), що здатна акумулювати Cu до 50 мг/кг та Zn до 300 мг/кг. Однак, перед застосуванням кукурудзи необхідно провести біомоніторинг, щоб переконатися в рівні забруднення та відповідності рослини умовам конкретної території [1].

Фіторе mediaція, хоч і має переваги, обмежена тривалістю процесу очищення забруднених війною земель, що значно довше за фізико-хімічні методи. Її ефективність залежить від багатьох факторів: концентрації та форми забруднювачів, їхньої доступності для рослин, властивостей ґрунту, застосованих стратегій та клімату. Для оптимізації використовують агротехнічну оптимізацію, ґрунтові добавки, мікоризне підсилення, контрольоване застосування хелатуючих агентів, селекцію та генетичну інженерію рослин.

У контексті військових забруднень критично важливий систематичний моніторинг, комплексна оцінка ефективності, наукові дослідження взаємодії забруднювачів та їхнього впливу на рослини в українських умовах, а також розробка економічно доцільних і сталих стратегій для масштабного відновлення постраждалих земель [4].

Для підвищення ефективності фіторе mediaції використовують різноманітні біотехнологічні та агротехнічні підходи. Одним із таких підходів є селекція та генетична модифікація рослин, зокрема створення трансгенних форм, наприклад *Brassica juncea*, які характеризуються посиленою експресією генів транспортерів металів. Такі рослини мають підвищену здатність до накопичення певних важких металів. Агротехнічна оптимізація передбачає ретельне управління удобренням, підтримання структури ґрунту, дренажу та рівня рН, що сприяє збільшенню біодоступності металів для рослин.

Застосування хелатуючих агентів, таких як EDTA чи ДТРА, дає змогу ефективніше мобілізувати важкі метали у ґрунті, полегшуючи їх надходження до рослини. Однак, варто враховувати ризик вторинного забруднення у разі надмірного використання таких речовин.

Додатково використовують біодобавки та мікробні інокулянти, наприклад мікоризні гриби, *Azospirillum spp.* і *Bacillus spp.*, які сприяють розвитку кореневої системи та покращують поглинання металів, особливо ефективно це проявляється на деградованих ґрунтах. Біостимулятори, до складу яких входять гумати, амінокислоти та ферменти, покращують загальний фізіологічний стан рослин, посилюючи їхню здатність до абсорбції токсичних сполук [1, 3].

Для України, що постала перед необхідністю післявоєнного відновлення значних територій, інтеграція фіторе mediaційних технологій у національні програми є стратегічно важливим кроком на шляху до екологічної безпеки та сталого розвитку.

Застосування фіторе mediaції може бути ефективно реалізовано через регіональні екологічні програми для комплексного відновлення забруднених екосистем, проекти з підтримки сільських громад, залучаючи місцеве населення

до відновлення забруднених сільськогосподарських угідь та підвищуючи їхню екологічну свідомість й економічну стійкість, пілотні ініціативи аграрного бізнесу для стимулювання екологічно безпечних практик, а також через міжнародну екологічну технічну допомогу для залучення передового досвіду та ресурсів. Успішна інтеграція фіторемедіації вимагає активної підтримки наукових установ у створенні баз даних фіторемедіантів, розробці моделей ризиків та інструментів моніторингу, а також запровадження сучасних агробіотехнологій, таких як використання мікоризних грибів та біостимуляторів росту [5].

Висновки. Фіторемедіація є перспективною, екологічно доцільною та економічно виправданою технологією для відновлення земель, забруднених унаслідок військових дій. Її застосування базується на здатності рослин-гіперакумуляторів абсорбувати, трансформувати або стабілізувати токсичні елементи у ґрунті, що дає змогу суттєво знизити екологічне навантаження без використання агресивних фізико-хімічних методів.

Успішна реалізація фіторемедіаційних стратегій вимагає врахування специфіки військових забруднень, ретельного добору відповідних видів рослин, адаптованих до умов України, а також системного підходу до агротехнічного супроводу, моніторингу та науково обґрунтованого управління процесом.

Інтеграція фіторемедіації в національні програми сталого землекористування може стати важливою складовою післявоєнного відновлення, забезпечуючи не лише рекультивацію постраждалих земель, а й соціально-економічну підтримку громад, екологічну стабільність та збереження біорізноманіття. Подальші дослідження у галузі фіторемедіації в умовах України є ключовими для розробки ефективних і масштабованих рішень щодо очищення та відновлення агроєкосистем, постраждалих від збройного конфлікту.

Список використаної літератури:

1. Yakymchuk A., Balanda O., Bzowska-Bakalarz M. Assessment of soil contamination of Ukraine with heavy metals during the war. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*. 2024. No. 196. DOI: <http://dx.doi.org/10.29119/1641-3466.2024.196.45>
2. Ali H., Khan E., Sajad M. A. Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*. 2013. Vol. 91, Issue 7. P. 869-881. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
3. Yan A., Wang Y., Tan S. N., Mohd Yusof M. L., Ghosh S., Chen Z. Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant¹ Science*. 2020. Vol. 11. Article 359. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359>
4. Song Y., Hou D., Zhang J., O'Connor D., Li G., Gu Q., Li S., Liu P. Environmental and socio-economic sustainability appraisal of contaminated land remediation strategies: A case study at a mega-site in China. *Science of The Total Environment*. 2018. Vol. 610–611. P. 391-401. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.016>
5. Sekhohola-Dlamini L. M., Keshinro O. M., Masudi W. L., Cowan A. K. Elaboration of a Phytoremediation Strategy for Successful and Sustainable Rehabilitation of Disturbed and Degraded Land. ¹ *Minerals*. 2022. Vol. 12, No. 2. Article 111. DOI: <https://doi.org/10.3390/min12020111>