

DOI: 10.31319/2519-2884.47.2025.22

УДК 504.5.054:[581.5:628.394]

**Непошивайленко Н.О.**, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-0759-2451, e-mail: nna2013@ukr.net

**Саванжа М.П.**, здобувачка другого (магістерського) рівня вищої освіти,

ORCID: 0009-0000-9180-305X, e-mail: avatmaria@gmail.com

**Губа О.В.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

ORCID: 0009-0004-2794-0550, e-mail: gubacom03@ukr.net

**Кремінь В.А.**, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

ORCID: 0009-0001-1759-6432, e-mail: kremvok@ukr.net

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

**Neposhyvailenko Natalia**, Candidate of engineering sciences, Associate Professor of the Department of Ecology and Environmental Protection

**Savanzha Mariya**, master's degree student

**Huba Oleksandr**, Postgraduate student

**Kremin Volodymyr**, Postgraduate student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФІТОРЕМЕДІАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОСЛИН

*У рамках проведеного дослідження проаналізовано наукові джерела, які відображають приклади нейтралізації забруднення важкими металами ґрунтів за допомогою рослин. Обґрунтовано вибір методичних підходів для оцінки ефективності фіторемедіації. Описано методики визначення вмісту важких металів у ґрунті та рослинному матеріалі, а також способи оцінки ефективності фіторемедіаційних заходів. Виходячи з проведеного аналізу кліматичних і ґрунтових умов України, визначено перспективні види рослин для очищення ґрунтів від важких металів. Наведено результати розрахунку коефіцієнту біоконцентрації важких металів у надземній частині проаналізованих рослин — *Lavandula angustifolia* та *Lupinus albus*, а також маси накопичених металів, що підтвердило ефективність обраних видів рослин-фіторемедіаторів.*

**Ключові слова:** фіторемедіація; *Lavandula angustifolia*; *Lupinus albus*; важкі метали; ґрунт; антропогенне навантаження.

*As part of the conducted research, scientific sources were analyzed that reflect examples of the neutralization of heavy metal soil contamination using plants. The selection of methodological approaches for evaluating the effectiveness of phytoremediation was justified. Methodologies for determining heavy metal content in soil and plant material are described, as well as methods for assessing the effectiveness of phytoremediation measures. Based on the analysis of the climatic and soil conditions of Ukraine, promising plant species for the remediation of soils from heavy metals were identified. The results of the calculation of the bioconcentration factor of heavy metals in the above-ground parts of the analyzed plants—*Lavandula angustifolia* and *Lupinus albus*—are presented, along with the mass of accumulated metals, which confirmed the effectiveness of the selected phytoremediator plant species.*

**Keywords:** phytoremediation; *Lavandula angustifolia*; *Lupinus albus*; heavy metals; soil; anthropogenic load.

### Постановка проблеми

Сучасний стан довкілля в Україні, особливо у промислово розвинених регіонах, таких як місто Кам'янське, характеризується значним антропогенним навантаженням та високим рівнем забруднення ґрунтів токсичними речовинами — зокрема важкими металами, нафтопродуктами, пестицидами. Постійне накопичення цих поллютантів у ґрунтовому середовищі негативно впливає не лише на якість ґрунтів, але й на стан поверхневих і підземних вод, рослинності та

здоров'я населення. Це зумовлює потребу у впровадженні екологічно безпечних, економічно обґрунтованих і водночас високоефективних технологій очищення середовища, які дозволили б відновлювати деградовані ґрунти та знижувати ризики для довкілля.

Одним із перспективних напрямів у цій сфері є фіторемедіація — біотехнологічний процес, що передбачає застосування здатності рослин поглинати, трансформувати або стабілізувати шкідливі речовини в забруднених екосистемах. На відміну від традиційних фізико-хімічних методів очищення, фіторемедіація поєднує природну ефективність, екологічну безпечність та відносно низьку вартість. Завдяки цьому вона має вагомий потенціал для практичного застосування, особливо у містах із виснаженими від людської діяльності ґрунтами.

Актуальність дослідження визначається потребою у науково обґрунтованому доборі рослинних видів із найвищим потенціалом для фіторемедіації в умовах конкретного регіону. Вибір оптимальних рослин залежить від їхньої здатності до накопичення, трансформації чи стабілізації токсикантів, а також від кліматичних і ґрунтових характеристик території.

Зважаючи на різноманіття механізмів фіторемедіації — фітоекстракції (накопичення важких металів у надземних органах рослин), фітостабілізації (зв'язування токсикантів у ґрунті кореневою системою), фітоволатилізації (переведення шкідливих речовин у летку форму та виведення в атмосферу) та фіторизоремедіації (активація мікробіоти в ризосфері для розкладання забруднювачів) — доцільним є проведення порівняльного аналізу їх ефективності. Такий аналіз повинен ґрунтуватися на комплексі експериментальних досліджень, лабораторних вимірювань, а також на узагальненні середньостатистичних показників із наукових джерел.

Крім того, важливим завданням є визначення оптимальних умов для вирощування рослин-фіторемедіаторів у регіоні дослідження, встановлення тривалості та динаміки очищення ґрунтів, а також оцінка довгострокового ефекту від застосування таких технологій. Це дозволить розробити практичні рекомендації для екологічного менеджменту територій, що зазнають інтенсивного антропогенного впливу, та сприятиме формуванню комплексних програм відновлення довкілля.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Біоремедіація розглядається як один із найбільш перспективних та екологічно безпечних способів відновлення забруднених ґрунтів, оскільки використовує природні біологічні процеси (мікроорганізми, гриби, рослини) для детоксикації або стабілізації забруднювачів і зазвичай має менші енергетичні та фінансові витрати порівняно з багатьма фізико-хімічними методами [1].

Як було зв'язано Гансом Гюнтером та Томасом Дж. Бейтсом, суть біоремедіації полягає у використанні живих організмів для розщеплення, нейтралізації або перетворення токсичних сполук у менш шкідливі або нетоксичні форми. До основних переваг цього методу належать його екологічна доцільність, економічна ефективність та можливість застосування без повного вилучення ґрунту з природного середовища.

Методи біоремедіації успішно застосовуються для очищення ґрунтів, забруднених важкими металами, нафтопродуктами, пестицидами та іншими стійкими органічними забруднювачами. Так, на прикладі комбінованої фіторемедіації у місті Лодзь (Польща) за допомогою вирощування *Helianthus annuus* та біостимуляції бактеріями його кореня загальне зниження вмісту нафтопродуктів знизилося на 28 % за 90 днів, а концентрація кадмію та свинцю — на 30—40 % [2].

Важливою умовою ефективності є правильний вибір стратегії з урахуванням характеристик ґрунту, типу забруднювача та екологічних умов. Загалом, біоремедіація не лише сприяє зменшенню техногенного навантаження на довкілля, а й забезпечує відновлення родючості ґрунтів та підтримку сталого розвитку агроекосистем.

Фіторемедіація являє собою різновид біоремедіації, суть якої полягає у використанні рослин для знешкодження або видалення забруднювальних речовин із довкілля — зокрема, ґрунтів, водного середовища або повітря. Відповідно до типу впливу, фіторемедіаційні процеси поділяють на кілька механізмів дії.

Фітоекстракція полягає в здатності рослин поглинати важкі метали або органічні токсиканти з ґрунтового середовища та акумулювати їх у своїх надземних органах. Такий підхід до-

зволяє фізично видаляти забруднювачі разом із зібраною біомасою. Яскравим прикладом застосування фітоекстракції як метода фіторемедіації є вилучення цинку за допомогою *Helianthus annuus* на території міста Карджалі, Болгарія [3]. Дослід проводився навколо металургійного підприємства з техногенно забрудненими ґрунтами, за результатами якого було визначено початковий вміст цинку в ґрунті, що варіювався  $\sim 1000$  мг/кг. В рамках проведеного експерименту зафіксовано зниження Zn:

- через 30 днів — на  $\approx 12$  %;
- через 60 днів — на  $\approx 23$  %;
- через 90 днів — на  $\approx 35$  %

Використана рослина-фіторемедіатор в даному прикладі добре впоралася з поставленою задачею. Крім того, рослина легко культивується, швидко набирає біомасу і є перспективною для фітоекстракції цинку.

Фітостабілізація передбачає закріплення небажаних речовин у прикореневому шарі, що зменшує їх мобільність і, відповідно, запобігає подальшому поширенню в екосистемі. Комплексну фітостабілізацію було проведено на шахтних відвалах в Іспанії, в районі забруднення поліметалами. Дослідження проводилося з використанням *Festuca arundinacea* зі стабілізуючою добавкою (біовугілля) [4]. Моніторинг за дослідною місцевістю показав, що вміст свинцю, цинку та міді у хвостосховищі за півроку мав позитивну зменшену динаміку — зменшення фракції рухомого свинцю на 42 %, цинку — на 36 %, міді — на 33 %.

Фітоволатилізація реалізується через здатність деяких рослин транспортувати забруднювачі до листя та вивільняти їх у газоподібному стані в атмосферу шляхом випаровування. У 2002 році у США в лабораторних умовах була здійснена фітоволатилізація миш'яку за допомогою трансгенної рослини *Arabidopsis thaliana*. До субстракту (10 мг/л) було додано сіль миш'якової кислоти  $\text{Na}_2\text{HAsO}_4$ . Через тиждень показник випаровування миш'яку був приблизно 5 %, а через 14 днів  $\sim 11$  % миш'яку було виведено у вигляді летких органоарсенових сполук [5].

Фіторизоремедіація заснована на взаємодії кореневої системи з мікроорганізмами ризосфери: рослини стимулюють мікробіоту до активного розкладу токсичних речовин, що сприяє біохімічному очищенню ґрунту. Таким методом скористувалися науковці Китаю (Харбін, 2009), які у науково-дослідній теплиці за допомогою *Medicago sativa* нейтралізували поліциклічні ароматичні вуглеводні (бензопірен — до 28 %) в ґрунті [6]. Після перших 30 днів експерименту деградація бензопірену досягла 28 %, через 60 днів  $\approx 53$  %, а через 90 днів — до 77 % з додатковим внесенням мікробного консорціуму.

Отже, дослідження, проведені в різних країнах, зокрема Іспанії, Китаї та США, демонструють високу результативність фіторемедіаційних методів для деградації таких токсикантів, як ароматичні вуглеводні, важкі метали та інші. У середньому, за 2—6 місяців рівень забруднення знижується на 50—85 %, що значно перевищує показники контрольних зразків. Отримані результати підкреслюють, що методи є екологічно безпечними, відносно дешевими і довгостроково ефективними для відновлення забруднених ґрунтів. Водночас, для підвищення ефективності потрібно оптимізація умов росту рослин, добір стійких видів та відповідних мікробіологічних компонентів.

Під час відбору відповідних рослин для фіторемедіаційних заходів беруть до уваги їхню здатність до накопичення металів, толерантність до токсичних умов, швидкість росту, розвинену кореневу систему та адаптивність до конкретних типів ґрунтів і кліматичних умов.

#### Формулювання мети дослідження

Мета дослідження — здійснити порівняння фіторемедіаційного потенціалу різних видів рослин з метою обґрунтування вибору найбільш ефективних фіторемедіаторів, придатних для очищення техногенно забруднених урбанізованих територій.

Завдання дослідження — охарактеризувати недоліки та переваги фіторемедіуючих рослин, здійснити розрахунки коефіцієнту біоконцентрації та маси переходу важких металів у рослину для потенційних насаджень територій населених пунктів.

#### Виклад основного матеріалу

Проведено оцінку біосорбційного потенціалу *Lavandula angustifolia* та *Lupinus texensis* для вилучення важких металів із забруднених ґрунтів.

Аналітичні розрахунки базувалися на узагальнених, умовно-типових показниках, характерних для техногенно трансформованих ґрунтів промислових міст України. Численні наукові джерела та звіти екологічного моніторингу свідчать про стійку тенденцію до підвищеного вмісту важких металів у ґрунтах урбанізованих територій, що зазнали тривалого антропогенного тиску.

Було враховано типові профілі забруднення, зафіксовані у відкритих наукових публікаціях, державних звітах та аналітичних дослідженнях, що охоплюють індустріальні міста [7, 8]. Застосування таких умовно-типових даних дозволяє провести первинне моделювання ремедіаційного потенціалу перспективних фіторемедіантів в умовах міського середовища з підвищеним техногенним навантаженням.

У рамках дослідження проведено розрахунки коефіцієнтів накопичення та маси металу, вилученого з ґрунту. Коефіцієнт біоконцентрації (КБК) — це співвідношення концентрації металу в рослині до концентрації в ґрунті, градація якого наведена в табл. 1. Маса металу, вилученого з ґрунту визначається як множник концентрації металу в рослинному матеріалі та урожайність надземної біомаси рослини.

Таблиця 1. Інтерпретація значень КБК

| Значення КБК | Інтерпретація                                            |
|--------------|----------------------------------------------------------|
| < 1          | Рослина слабо акумулює елемент                           |
| ≈ 1          | Рослина акумулює елемент на рівні середнього фону ґрунту |
| > 1          | Рослина активно накопичує елемент                        |
| > 10         | Високоефективний акумулятор, потенційно гіперакумулятор  |

Аграрна наукова література України наводить дані щодо врожайності за середньою сухою масою для *Lupinus texensis* або *Lupinus albus* на сірих лісових або дерново-підзолистих ґрунтах в межах 2,8—4,2 т/га, без іригації урожайність може бути нижчою — 2,5—3,5 т/га. Тому в рамках розрахунку для подальшого аналізу взято значення врожайності *Lupinus albus* 3,5 т/га (суха надземна біомаса), що відповідає середнім агротехнічним умовам регіону без додаткового зрошення чи стимуляторів росту. Дослідження, проведене Н. Приведенюком (2024) [9], показало, що середня суха біомаса *Lavandula angustifolia* в умовах Лівобережного Лісостепу України становить 3,5—4,5 т/га без додаткового зрошення чи стимуляторів росту. Таким чином, врожайність обох досліджених потенційних рослин-біореєдаторів є тотожною.

Для оцінки потенціалу біосорбції використано типові концентрації важких металів у ґрунті та рослинному матеріалі на прикладі наукових досліджень для *Lavandula angustifolia* [10, 11] та для *Lupinus albus* [12, 13] у табл. 2.

Таблиця 2. Концентрації важких металів в надземній біомасі рослини та ґрунті, мг/кг

| Елементи | <i>Lavandula angustifolia</i> |                    | <i>Lupinus albus</i> |                    |
|----------|-------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
|          | С <sub>росл.</sub>            | С <sub>ґрунт</sub> | С <sub>росл.</sub>   | С <sub>ґрунт</sub> |
| Pb       | 3,7                           | 75,0               | 65,0                 | 120,0              |
| Zn       | 45,2                          | 220,0              | 2,5                  | 3,8                |
| Cu       | 11,5                          | 95,0               | 180,0                | 240,0              |
| Cd       | 0,3                           | 1,3                | 25,0                 | 45,0               |
| Ni       | 1,7                           | 35,0               | 8,0                  | 20,0               |

Проведений аналіз не претендує на заміну польових досліджень, проте є методично обґрунтованим підходом до оцінки доцільності впровадження фітореєдіаційних заходів на потенційно забруднених урбанізованих територіях. Отримані результати слугують підґрунтям для подальших емпіричних досліджень, спрямованих на адаптацію фітореєдіації до умов конкретного промислового ландшафту.

Результати розрахунку коефіцієнта біоконцентрації (КБК) та маси вилучення важких металів з ґрунту за допомогою обраних фіторемедіантів наведені у табл. 3 та на рис.1. Ці дані дозволяють оцінити ефективність використання *Lavandula angustifolia* та *Lupinus albus* для очищення ґрунтів від свинцю (Pb), цинку (Zn), міді (Cu), кадмію (Cd) та нікелю (Ni).

Таблиця 3. Результати розрахунку за КБК та маси вилучення важких металів за допомогою *Lavandula angustifolia* та *Lupinus albus*

| Елементи | <i>Lavandula angustifolia</i> |                      | <i>Lupinus albus</i> |                      |
|----------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|          | КБК                           | Маса вилучення, г/га | КБК                  | Маса вилучення, г/га |
| Pb       | 0,05                          | 22,2                 | 0,54                 | 227,5                |
| Zn       | 0,21                          | 271,2                | 0,66                 | 8,8                  |
| Cu       | 0,12                          | 69,0                 | 0,75                 | 630,0                |
| Cd       | 0,20                          | 1,6                  | 0,56                 | 87,5                 |
| Ni       | 0,05                          | 10,2                 | 0,40                 | 28,0                 |

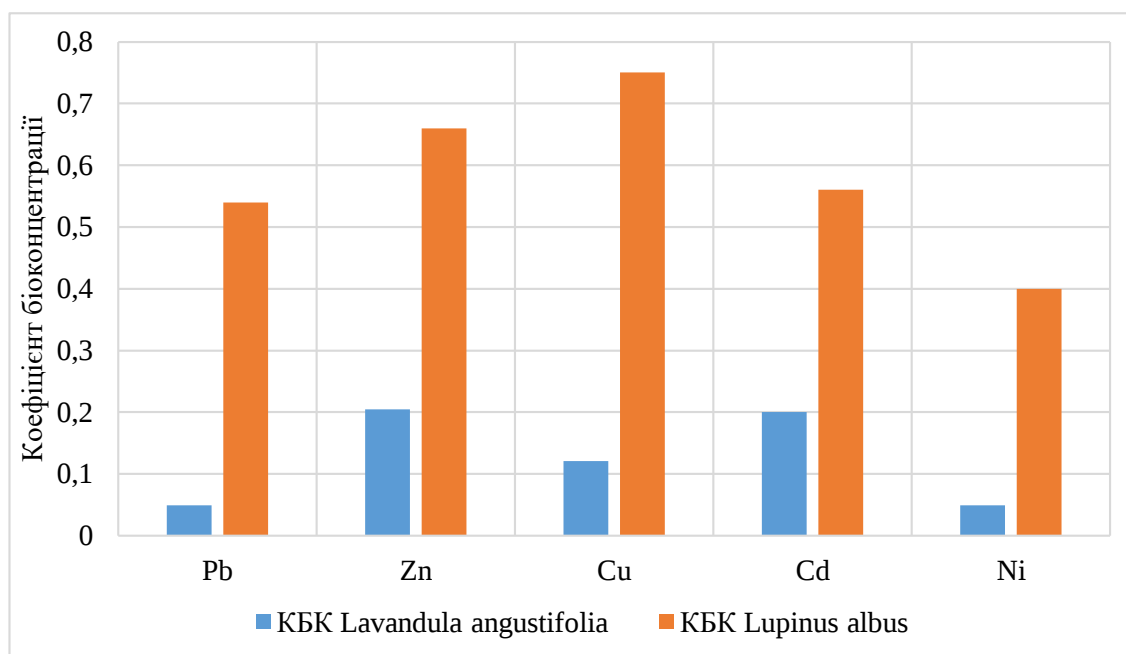


Рис. 1. Співвідношення коефіцієнта біоконцентрації для досліджених рослин

Аналіз показує (рис. 1), що коефіцієнт біоконцентрації важких металів у надземній частині проаналізованих рослин є вищим для *Lupinus albus* у порівнянні з *Lavandula angustifolia* для свинцю та нікелю майже у 10 разів, для таких металів як цинк та кадмій — у 3 рази, що свідчить про здатність *Lupinus albus* більш ефективно акумулювати ці метали. Слід зазначити, що проаналізовані рослини мають відмінності щодо ефективності вилучення важких металів з ґрунту, наприклад для *Lupinus albus* у ряді здатності накопичувати у надземній частині важкі метали на першому місці стоїть мідь, а для *Lavandula angustifolia* — цинк:

*Lupinus albus* Cu > Zn > Cd > Pb

*Lavandula angustifolia* Zn > Cd > Cu > Pb > Ni

Згідно з діаграмою, наведеною на рис. 1, за результатами розрахунків *Lavandula angustifolia* демонструє фіторемедіаційні властивості з різною ефективністю для окремих металів. Найвищий потенціал вилучення у спостерігається для цинку, помірний — для міді, а такі метали як свинець та нікель характеризуються низькими показниками маси вилучення та коефіцієнта біоконцентрації. Водночас, *Lavandula angustifolia* демонструє значні показники вилу-

чення важких металів з ґрунтів урбанізованих територій, що робить її перспективним фіторе-медіантом для санітарно-захисних зон підприємств та селітебних територій населених пунктів, при озелененні яких необхідним фактором є врахування витривалості рослин до сучасних посушливих умов, їх декоративності, збереженні біорізноманіття та покращенню мікроклімату міських зон, чим і відрізняється ця рослина. Також слід зазначити, що *Lavandula angustifolia*, демонструючи високу здатність до акумуляції важких металів у надземній біомасі, може використовуватися для фітомеліорації ґрунтів із високим вмістом важких металів з перспективою збору надземної біомаси для подальшого її застосування, наприклад, з послідовним вилучення з неї ефірних олій, до яких, як відомо, в результаті технологічного процесу шляхом парової дис-тиляції (гідродистиляції), важкі метали до кінцевого продукту не потрапляють.

З огляду на промислову специфіку території, де в ґрунтах домінують свинець, цинк, мідь і кадмій, в якості фіторе-медіаторів доцільно застосовувати обидва види рослин в комплексі, враховувати домінуючий тип забруднення, призначення певних ділянок, залучати інші рослини-фіторе-медіаторів (однорічні, не агресивні), які є менш декоративними для міського озеле-нення. Таке поєднання дозволяє охопити ширший спектр забруднювачів та підвищити загальну ефективність фіторе-медіаційних заходів.

Узагальнюючи результати, можна констатувати, що застосування *Lavandula angustifolia* і *Lupinus albus* у фіторе-медіації промислово забруднених ґрунтів є ефективним заходом, здат-ним значно зменшити концентрації небезпечних металів у ґрунті. Крім того, такий спосіб очи-щення ґрунту сприяє відновленню його фізико-хімічних властивостей, поліпшенню його струк-тури та стимулюванню активності корисної мікрофлори, що є ключовим для довгострокового відновлення екологічної рівноваги.

Необхідно зазначити, що дані щодо накопичення важких металів у кореневій системі досліджених рослин відсутні, що обмежує повноту оцінки їх фіторе-медіаційного потенціалу. Водночас результати аналізу фіторе-медіаційного потенціалу надземної частини рослин свідчать про їхню ефективність, а виконані розрахунки вносять вагомий внесок у розробку сталих еко-логічних технологій очистки ґрунтів і має значний потенціал для застосування в умовах проми-слового забруднення України.

Розглядаючи результати дослідження доцільно надати рекомендації щодо використання досліджених рослин в рамках екологічно відновлювальних заходів та програм з рекультивації забруднених урбанізованих територій [14—16]. Таку рослину, як *Lavandula angustifolia* можна висаджувати в межах санітарно-захисних зон промислових підприємств з підвищеним вмістом свинцю, кадмію та міді. Рослина може проявити гарні акумулятивні властивості у надземній частині, що спрощуватиме видалення токсичних елементів із екосистеми. Щодо *Lupinus albus*, цю рослину доцільно використовувати на ділянках зі значним накопиченням забруднювачів у ґрунтах, зокрема для рекультивації територій промислових об'єктів, шламонакопичувачів, хво-стосховищ, полігонів побутових відходів. Глибока коренева система *Lupinus albus* дозволяє ви-лучати важкі метали з нижніх горизонтів ґрунту, тоді як потужна біомаса сприяє ефективному накопиченню токсичних елементів.

Запровадження агротехнічного супровіду фіторе-медіації, такого як контроль кислотнос-ті ґрунту, мульчування, внесення органічних добавок тощо, сприятиме збереженню родючості ґрунту та зниженню залишкових металів. Також раціональним є запровадження мозаїчних на-саджень, у яких будуть чергуватися ділянки з досліджених рослин, що дозволить забезпечити широке охоплення спектру техногенного забруднення ґрунтового середовища, що сприятиме підвищенню ефективності фіторе-медіації. Доцільним є формування комплексних посадок з включенням інших стійких до металів видів рослин, таких як *Hypericum perforatum* чи *Echinacea purpurea*, як рекомендовано у роботах А. М. Prasad & Н. М. de Oliveira Freitas [17]. Можна розглянути можливість перетворення рекультивованих ділянок у зони громадського користування з подальшим озелененням, що дозволить одночасно досягти екологічного та со-ціального ефекту.

### Висновки

Встановлено, що різні види рослин мають неоднакову здатність до накопичення та ут-римання техногенних забруднювачів. Було розраховано ключові показники ефективності фіто-

ремедіації — коефіцієнти біоконцентрації (КБК) та масу металу, вилученого рослинами з одиниці площі. Розрахунки КБК показали, що *Lavandula angustifolia* здатна добре акумулювати цинк та кадмій (КБК<sub>Zn</sub> = 0,21; КБК<sub>Cd</sub> = 0,20), тоді як *Lupinus albus* — мідь та цинк (КБК<sub>Cu</sub> = 0,75; КБК<sub>Zn</sub> = 0,66), що свідчить про селективність рослин щодо накопичення певних металів та ефективності фіторемедіаційних властивостей різних видів рослин.

Ці результати підкреслюють практичну значимість використання обраних для дослідження рослин у програмах фіторемедіації та рекультивації територій, забруднених важкими металами, із можливістю адаптації вибору виду рослини залежно від домінуючого забруднювача на конкретній ділянці.

### Список використаної літератури

1. Pande V., Pandey S. C., Sati D., Bhatt P., Samant M. Microbial interventions in bioremediation of heavy metal contaminants in agroecosystem. *Frontiers in Microbiology*. 2022. Vol. 13. P. 824084. DOI: 10.3389/fmicb.2022.824084.
2. Wyszowski M., Wyszowska J., Ziółkowska A. Remediation of soil contaminated with diesel oil with the use of an ash-biochar mixture and plants. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. Vol. 193, No. 6. Art. 367. DOI: 10.1007/s10661-021-09138-0.
3. Kidd P., Domínguez-Rodríguez M. J., Díez J., Monterroso C. Phytostabilisation of mine tailings in Spain using native and non-native grasses. *Science of the Total Environment*. 2010. Vol. 408, No. 3. P. 487–497.
4. Espada M., et al. Phytoremediation: A sustainable and promising bio-based technology for environmental cleanup. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 801. P. 149722.
5. Dhankher O. P., Li Y. J., Rosen B. P., Shi J., Salt D., Senecoff J. F., Sashti N. A., Meagher R. B. Engineering tolerance and hyperaccumulation of arsenic in plants by combining arsenate reductase and gamma-glutamylcysteine synthetase expression. *Nature Biotechnology*. 2011. P. 1140–1145. DOI: 10.1038/nbt747.
6. Conlon R., Dowling D. N., Germaine K. J. Assessing Microbial Activity and Rhizoremediation in Hydrocarbon and Heavy Metal-Impacted Soil. *Microorganisms*. 2025. Vol. 13, No. 4. P. 848. DOI: 10.3390/microorganisms13040848. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/13/4/848>.
7. Шибаніна О. Н., Бончиківський О. Г. Забруднення ґрунтів в Україні до та після російського вторгнення. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*. 2025. Vol. 28, No. 4. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.123456>.
8. Приведенюк Н. Вирощування вузьколистий лаванди в умовах Лівобережного Лісостепу України: вплив агротехнічних факторів на суху біомасу. *АгроВісник*. 2024. Вип. 3(5). С. 45–52. URL: [https://agrovisnyk.com/index.php/agrovisnyk/article/download/2024\\_03\\_05/4757](https://agrovisnyk.com/index.php/agrovisnyk/article/download/2024_03_05/4757).
9. Yadav S., Kumar V. Heavy metal accumulation and tolerance in lavender. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25, No. 14. P. 13701–13709.
10. Kumar R., et al. Phytoremediation potential of lavender for heavy metal contaminated soils. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 375. P. 32–40.
11. Chen B., et al. Phytoremediation capacity of lupine species for cadmium and zinc contaminated soils. *Environmental Pollution*. 2017. Vol. 229. P. 223–231.
12. Singh S., Gupta R. Heavy metal uptake and translocation in lupine species. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2020. Vol. 148. P. 113–120.
13. Prasad A. M., de Oliveira Freitas H. M. Metal-tolerant plant species for phytoremediation of contaminated soils. *Journal of Environmental Management*. 2003. Vol. 68. P. 193–202.
14. Kidd P., Domínguez-Rodríguez M. J., Díez J., Monterroso C., Gómez-Armesto A., Fernández-Souto F. J., Rivas R., Pande V., Pandey S. C., Sati D., Bhatt P., Samant M., Espada M. Promotion of arsenic phytoextraction efficiency in the fern *Pteris vittata* by the inoculation of As-resistant bacteria: a soil bioremediation perspective. *Frontiers in Plant Science*. 2015. Vol. 6. Art. 80. DOI: 10.3389/fpls.2015.00080.

15. Фисюк А. Сучасні наукові підходи до вивчення методів фітореMediaції ґрунтів, забруднених важкими металами. *Environmental Safety and Natural Resources*. 2024. № 3(47). С. 22–30. URL: <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/ess/article/view/19991>.
16. Білявська Л. Г., Іутинська Г. О., Лобода М. В., Ропотілов Б. П., Скроцький С. А. Діагностика і біореMediaція ґрунтів, постраждалих внаслідок воєнних дій в Україні. *Український біохімічний журнал*. 2024. Т. 15, № 3. С. 41–54. URL: <https://bioscience.com.ua/uk/journals/t-15-3-2024/diagnostika-i-bioremediatsiya-gruntiv-postrazhdalikh-vnaslidok-voyennikh-diy-v-ukrayini>.
17. Дацько О. М., Яценко В. М. Сучасні методи ремедіації ґрунтів. ФітореMediaція як ключ до очищення ґрунтів та збереження екосистем. *Аграрні інновації*. 2024. № 4. С. 58–67. URL: <https://agrarian-innovations.izpr.ks.ua/index.php/agrarian/article/view/623>.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PHYTOREMEDIATION PROPERTIES OF PLANTS

### Abstract

The object of the research is the process of phytoremediation of technogenically contaminated soils using higher plants capable of accumulating and transforming heavy metals.

The subject of the research is the efficiency of *Lavandula angustifolia* and *Lupinus albus* in the accumulation of lead (Pb), cadmium (Cd), zinc (Zn), and copper (Cu) from polluted soil substrates.

The relevance of this work lies in the growing need for environmentally safe and cost-effective methods of soil remediation in industrial and post-war territories of Ukraine. The application of aromatic and leguminous plants as natural bioaccumulators offers an alternative to traditional chemical remediation methods.

The aim of the work is to assess the phytoextraction potential of *Lavandula angustifolia* and *Lupinus albus* based on the determination of the bioconcentration factor (BCF) for key heavy metals. Experimental studies were conducted under controlled conditions to evaluate the accumulation and tolerance capacity of both plant species.

The calculations of bioaccumulation properties are based on literature data from physicochemical analyses of soil and plant tissues, performed using atomic absorption spectrophotometry to determine heavy metal content before and after cultivation. The results of the calculations showed that *Lupinus albus* demonstrates higher accumulation efficiency for Zn and Cu, whereas *Lavandula angustifolia* shows stable uptake of Zn and Cd combined with high stress tolerance.

The feasibility of using both species for the phytoremediation of moderately and heavily polluted soils was confirmed through calculation. The study recommends further large-scale field trials and the integration of these plant species into remediation programs for contaminated lands in Ukraine.

### References

- [1] Pande, V., Pandey, S. C., Sati, D., Bhatt, P., & Samant, M. (2022). *Microbial interventions in bioremediation of heavy metal contaminants in agroecosystem*. [Frontiers in Microbiology] 13, 824084. Retrieved from doi: 10.3389/fmicb.2022.824084
- [2] Wyszowska, J., Wyszowska, J., & Ziółkowska, A. (2021). *Remediation of soil contaminated with diesel oil with the use of an ash-biochar mixture and plants*. [Environmental Monitoring and Assessment], 193(6), 367. Retrieved from doi: 10.1007/s10661-021-09138-0.
- [3] Kidd, P., Domínguez-Rodríguez, M. J., Díez, J., & Monterroso, C. (2010). *Phytostabilisation of mine tailings in Spain using native and non-native grasses*. [Science of the Total Environment], 408(3), 487–497.
- [4] Espada, M., et al. (2022). *Phytoremediation: A sustainable and promising bio-based technology for environmental cleanup*. [Science of the Total Environment], 801, 149722.
- [5] Dhankher, O. P., Li, Y. J., Rosen, B. P., Shi, J., Salt, D., Senecoff, J. F., Sashti, N. A., & Meagher, R. B. (2002). *Engineering tolerance and hyperaccumulation of arsenic in plants by*

- combining arsenate reductase and gamma-glutamylcysteine synthetase expression. [Nature Biotechnology], 20(11), 1140–1145. Retrieved from doi: 10.1038/nbt747.
- [6] Conlon, R., Dowling, D. N., & Germaine, K. J. (2025). Assessing Microbial Activity and Rhizoremediation in Hydrocarbon and Heavy Metal-Impacted Soil. [Microorganisms], 13(4), 848. Retrieved from doi: 10.3390/microorganisms13040848. Available at: URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/13/4/848>.
- [7] Bonchukivskyi, O. (2025). Military soil disturbances in northeastern Ukraine. [Science of the Total Environment]. Retrieved from doi: 10.1016/j.scitotenv.2025.123456 [in Ukrainian]
- [8] Kidd, P., Domínguez-Rodríguez, M. J., Díez, J., Monterroso, C., Gómez-Armesto, A., Fernández-Souto, F. J., Rivas, R., Pande, V., Pandey, S. C., Sati, D., Bhatt, P., Samant, M., & Espada, M. (2015). Promotion of arsenic phytoextraction efficiency in the fern *Pteris vittata* by the inoculation of As-resistant bacteria: a soil bioremediation perspective. [Frontiers in Plant Science], 6, 80. Retrieved from doi: 10.3389/fpls.2015.00080.
- [9] Pryvedeniuk, N. (2024). Cultivation of *Lavandula angustifolia* in the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine: the influence of agrotechnical factors on dry biomass. [AgroVisnyk], 3(5), 45–52. Available at: [https://agrovisnyk.com/index.php/agrovisnyk/article/download/2024\\_03\\_05/4757](https://agrovisnyk.com/index.php/agrovisnyk/article/download/2024_03_05/4757) [in Ukrainian]
- [10] Yadav, S., & Kumar, V. (2018). Heavy metal accumulation and tolerance in lavender. [Environmental Science and Pollution Research], 25(14), 13701–13709.
- [11] Kumar, R., et al. (2019). Phytoremediation potential of lavender for heavy metal contaminated soils. [Journal of Hazardous Materials], 375, 32–40.
- [12] Chen, B., et al. (2017). Phytoremediation capacity of lupine species for cadmium and zinc contaminated soils. [Environmental Pollution], 229, 223–231.
- [13] Singh, S., & Gupta, R. (2020). Heavy metal uptake and translocation in lupine species. [Plant Physiology and Biochemistry], 148, 113–120.
- [14] Fysiuk, A. (2024). Modern scientific approaches to the study of phytoremediation methods for soils contaminated with heavy metals. [Environmental Safety and Natural Resources], 3(47), 22–30. Available at: <https://jrnل.nau.edu.ua/index.php/ess/article/view/19991> [in Ukrainian]
- [15] Biliavska, L. H., Iutynska, H. O., Loboda, M. V., Ropotilov, B. P., & Skrotskyi, S. A. (2024). Diagnostics and bioremediation of soils affected by military actions in Ukraine. [Ukrainian Biochemical Journal], 15(3), 41–54. Available at: <https://bioscience.com.ua/uk/journals/t-15-3-2024/diagnostika-i-bioremediatsiya-gruntiv-postrazhdalikh-vnaslidok-voyennikh-diy-v-ukrayini> [in Ukrainian]
- [16] Datsko, O. M., & Yatsenko, V. M. (2024). Modern methods of soil remediation: phytoremediation as a key to soil purification and ecosystem preservation. [Agrarian Innovations], 4, 58–67. Available at: <https://agrarian-innovations.izpr.ks.ua/index.php/agrarian/article/view/623> [in Ukrainian]
- [17] Prasad, A. M., & de Oliveira Freitas, H. M. (2003). Metal-tolerant plant species for phytoremediation of contaminated soils. [Journal of Environmental Management], 68, 193–202.

Надійшла до редколегії 21.10.2025

Прийнята після рецензування 22.10.25

Опублікована 23.10.2025