

УДК 504:001.8; 504:621.039
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.3\(501\).27](https://doi.org/10.15589/znp2025.3(501).27)

BIOMONITORING AS A METHOD FOR ASSESSING THE LEVEL OF ENVIRONMENTAL COMPONENT CONTAMINATION BY HEAVY METALS

БІОМОНІТОРИНГ ЯК МЕТОД ОЦІНКИ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ДОВКІЛЛЯ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

Larysa L. Hurets

l.gurets@ecolog.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2318-4223

Iryna O. Sipko

i.sipko@ecolog.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-9667-4795

Iryna V. Zalevska

i.zalevska@ecolog.sumdu.edu.ua
ORCID: 0009-0007-8951-6204

Iryna Yu. Ablicieva

i.ableyeva@ecolog.sumdu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2333-0024

Л. Л. Гурець,

докт. техн. наук, професор

І. О. Сіпко,

аспірант

І. В. Залевська,

аспірант

І. Ю. Аблєєва,

докт. техн. наук, доцент

Sumy State University, Sumy

Сумський державний університет, м. Суми

Abstract. The purpose of the study is to assess the effectiveness of biological monitoring methods for determining the areas and levels of contamination of natural complexes with heavy metals.

Given the rapid urbanization of urban environments, the contamination of territories with heavy metals is increasing, which are not localized at the site of contamination, but are also able to migrate through the groundwater system to large water bodies. In such cases, instrumental analysis of the level of contamination is quite complex, so it is advisable to use a biological method of environmental monitoring.

The research methodology is based on the analysis of modern methods of bioindication and biotesting, which involve the use of living organisms, in particular plants, to assess contamination with heavy metals. Biological methods provide rapid detection of contaminated areas without complex equipment, which reduces monitoring costs. The effectiveness of such bioindicators as vascular plants, lichens, mosses and aquatic macrophytes was studied, taking into account their ability to bioaccumulate, tolerance and ecological adaptability. A comparison with traditional physicochemical methods was made. As a result, it was established that bioindication and biotesting are effective methods for rapid detection of heavy metal contamination of soils and aquatic environments. Plants such as *Lemna minor*, *Myriophyllum spicatum*, *Phragmites australis* demonstrate high sensitivity to cadmium, lead, zinc and other metals, allowing to assess their bioavailability and toxicity. The combination of bioindication with physicochemical analyses increases the accuracy of assessing the level of contamination. Scientific novelty: the study deepens the understanding of the effectiveness of bioindication and biotesting as integral methods for monitoring heavy metal contamination. The optimal parameters for selecting indicator plants, such as tolerance, bioaccumulation and ecological adaptability, have been determined, which contributes to the development of standardized approaches to environmental monitoring. Practical importance: the use of bioindication and biotesting allows for the rapid detection of contaminated areas, minimizing risks to human health and ecosystems. These methods contribute to the sustainable use of natural resources, providing cost-effective and environmentally safe monitoring. The results can be used to develop strategies for cleaning up contaminated sites and implementing them into the environmental monitoring system in Ukraine.

Key words: pollutant; soil; water; contamination; bioindication; biotesting.

Анотація. Метою дослідження є оцінка ефективності застосування біологічних методів моніторингу для визначення ділянок та рівня забруднення природних комплексів важкими металами.

З огляду на швидкі темпи урбанізації міських середовищ, зростає забрудненість територій важкими металами, які не локалізуються в місці забруднення, але й здатні мігрувати через систему ґрунтових вод до великих водних об'єктів. Ця проблема ускладнюється в зв'язку з проведенням активних бойових дій на території України.

У таких випадках інструментальний аналіз рівня контамінації досить складний, тому доцільно використовувати біологічний метод моніторингу довкілля.

Методика дослідження базується на аналізі сучасних методів біоіндикації та біотестування, які передбачають використання живих організмів, зокрема рослин, для оцінки забруднення важкими металами. Біологічні методи забезпечують оперативне виявлення забруднених ділянок без складного обладнання, що знижує витрати на моніторинг. Досліджено ефективність таких біоіндикаторів, як судинні рослини, лишайники, мохи та водні макрофіти, з урахуванням їхньої здатності до біоаккумуляції, толерантності та екологічної адаптивності. Проведено порівняння з традиційними фізико-хімічними методами. *У результаті* встановлено, що біоіндикація та біотестування є ефективними методами для швидкого виявлення забруднення ґрунтів і водного середовища важкими металами. Рослини, такі як *Lemna minor*, *Myriophyllum spicatum*, *Phragmites australis*, демонструють високу чутливість до кадмію, свинцю, цинку та інших металів, дозволяючи оцінити їхню біодоступність і токсичність. Поєднання біоіндикації з фізико-хімічними аналізами підвищує точність оцінки рівня забруднення. **Наукова новизна:** дослідження поглиблює розуміння ефективності біоіндикації та біотестування як інтегральних методів моніторингу забруднення важкими металами. Визначено оптимальні параметри вибору рослин-індикаторів, такі як толерантність, біоаккумуляція та екологічна адаптивність, що сприяє розробці стандартизованих підходів до екологічного моніторингу. **Практична значимість:** застосування біоіндикації та біотестування дозволяє оперативно виявляти забруднені території, мінімізуючи ризики для здоров'я людини та екосистем. Ці методи сприяють сталому використанню природних ресурсів, забезпечуючи економічно вигідний і екологічно безпечний моніторинг. Результати можуть бути використані для розробки стратегій очищення забруднених ділянок і впровадження їх у систему екологічного моніторингу в Україні.

Ключові слова: забруднююча речовина; ґрунт; вода; забруднення; біоіндикація; біотестування.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Сучасний стан навколишнього середовища свідчить про зростаючу потребу у впровадженні ефективних методів екологічного моніторингу для швидкого виявлення та реагування на зміни. Забруднення ґрунтів і водного середовища важкими металами є однією з актуальних екологічних проблем в Україні, що потребує постійного швидкого контролю через їх токсичність, високий потенціал до біоаккумуляції [1] й тривалу присутність у біосфері. Це призводить до підвищення їх концентрації в організмах із підвищенням трофічних рівнів. У дослідженні [2] показано, що в зоні активних бойових дій вміст свинцю в зразках ґрунту в 5,4 рази перевищував фонове значення, цинку – у 3,9 разів, кадмію – у 1,4 рази, міді – у 4,6 разів, нікелю – у 1,2. Тому необхідно проводити заходи з виявлення забруднених ділянок для подальшого відновлення в післявоєнні роки.

У зв'язку зі збільшенням неконтрольованого потрапляння забруднюючих речовин, у тому числі важких металів, у навколишнє середовище для своєчасного моніторингу необхідне використання методів оцінки, що здатні визначати ступінь забруднення із застосуванням найменш можливої кількості ресурсів, а також невибагливих до умов проведення оцінки.

Серед методів спостереження розрізняють біологічні та аналітичні [3]. Біологічні являють собою використання організмів-біомаркерів, які дозволяють визначати осередки забруднень на місці та прослідкувати межі поширення забруднюючих речовин на ділянці. Застосування аналітичного методу має на меті використання складного та вартісного обладнання, а також додаткового навчання персоналу, із наступним проведенням аналізу й структуруванням

отриманих даних. Порівняння зазначених вище методів дозволяє надати перевагу саме біологічному, оскільки збір інформації на місці дає змогу отримати всю повноту шляхів міграції важких металів й оцінити широту та динаміку наслідків для компонентів довкілля в перспективі.

Критично важливими при виборі біоіндикаторних рослин є такі параметри:

- Толерантність до високих концентрацій забруднювачів (переважно Cr, Pb, Cd, Ni, Zn). Рослини-індикатори повинні бути стійкими до високих концентрацій важких металів, що забезпечує їх виживання в забруднених середовищах. Це дозволяє проводити довгостроковий моніторинг без значної деградації популяції [4].

- Здатність до біоаккумуляції (коефіцієнт накопичення). Рослини повинні мати високу здатність накопичувати важкі метали (наприклад, Pb, Cd, Zn, Cu, Ni) у своїх тканинах (коренева система, листові пластинки, стебло), що дозволяє кількісно оцінити рівень забруднення. Гіперакумулятори, які здатні накопичувати метали в концентраціях, що перевищують 1000 мг/кг сухої маси, є особливо цінними [5].

- Екологічна адаптивність. Вибрані види повинні бути поширеними у водних екосистемах (наприклад, річках, озерах, болотах) і мати широкий ареал, що полегшує порівняння результатів у різних регіонах [6].

- Швидкість накопичення та біодоступність. Рослини повинні швидко реагувати на зміну концентрацій металів у воді чи осадах, що забезпечує точність і оперативність біоіндикації. Коренева система або занурені листки відіграють ключову роль у поглинанні металів [7].

– Швидкість росту та простота у вирощуванні. Швидкозростаючі рослини дозволяють проводити моніторинг у короткі терміни, що є ключовим для оцінки динаміки забруднення. Простота у вирощуванні важлива для легкості культивування в контрольованих умовах, що зменшує логістичні складнощі та витрати на біомоніторинг [5].

Види з чіткими морфологічними ознаками та доступністю для збору зразків є пріоритетними для практичного використання в польових умовах [8].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Оцінка вмісту важких металів у ґрунтах і водно-му середовищі за допомогою біотестування та біоіндикації набуває все більшого значення в сучасних екологічних дослідженнях. Актуальність цієї теми обумовлена зростанням техногенного навантаження на довкілля, що зумовлює необхідність використання надійних, чутливих та екологічно безпечних методів моніторингу. Сучасні дослідження засвідчують зростаючий інтерес до методів, які ґрунтуються на використанні живих організмів як індикаторів екоотоксикологічного стану середовища, зокрема до рослин, мікроорганізмів, безхребетних тварин та водоростей.

Останні дослідження підкреслюють, що біотехнологічні методи індикації важких металів є ефективними, екологічними та економічно прийнятними засобами спостереження за станом ґрунтів і водойм із наступним потенціалом широкого впровадження в польових умовах [9, 10].

Ефективний моніторинг забруднення навколишнього середовища важкими металами є важливим завданням для розробки відповідних стратегій контролю та деконтамінації. Щоб подолати цю проблему, біоіндикатори, такі як рослини, можуть відігравати вирішальну роль у наданні корисної інформації про ступінь та тяжкість забруднення важкими металами [11]. Це допомагає краще зрозуміти загальний стан навколишнього середовища та потенційний вплив важких металів на екосистеми [12].

У роботі [12] проведено дослідження щодо ефективності використання рослин-індикаторів, для оцінки реакції на вміст забруднюючих речовин у ґрунті та визначення їх концентрації внаслідок акумуляції в коренях і в наземних частинах. *P. lanceolata* продемонструвала підвищену концентрацію Zn як у коренях, так і в листках (3271 ± 337 та 4956 ± 82 мг/кг). Що стосується Pb, *L. multiflorum* та *P. lanceolata* показали найвищі концентрації в коренях (2964 ± 937 та 1605 ± 289 мг/кг), тоді як *R. acetosa* мала вищу концентрацію в листках (1957 ± 147 мг/кг). Що стосується Ni, *L. multiflorum* мала найвищу концентрацію в коренях (1148 ± 93 мг/кг), а *P. lanceolata* показала найвищу концентрацію в листках (2492 ± 28 мг/кг). *P. lanceolata* послідовно демонструвала найвищі

концентрації Cd як у коренях (126 ± 21 мг/кг), так і в листках (163 ± 12 мг/кг).

Також у практичній частині статті [13] здійснено вимірювання концентрації металів у двох типах земель під промисловим та непромисловим об'єктом, а також накопичення забруднюючих речовин у декількох різних сортах овочів, вирощених на цих ділянках. Результати показали, що ґрунт та овочі на території виробництва містять дуже високу концентрацію важких металів (20,15, 19,67, 12,93, 1057,3, 02 та 4,02 мг/кг у ґрунті; 18,13, 12,17, 7,63, 201,63 та 1,60 для *B. alba*; 15,67, 9,87, 8,03, 16,0 та 1,20 для *A. gangeticus* відповідно щодо Ni, Pb, Cu, Cr та Cd) порівняно зі зразками, зібраними з непромислової сільськогосподарської території. Порядок розташування всіх досліджуваних металів, що становлять ризик розвитку раку, такий: $Cr > Pb > Ni > Cd$, а неракові ризики – $Pb > Cd > Ni > Cu > Cr$, що було підтверджено статистичним аналізом. Це дослідження показує, що забруднення ґрунтів металами можна мінімізувати шляхом переміщення досліджуваних металів у неїстівні рослини (відповідно до факторів переносу рослин) із подальшим ефективним та ретельним моніторингом утилізації твердих та рідких відходів.

Таким чином, результати останніх досліджень [9–13] свідчать про перспективність біотестування і біоіндикації як інтегральних підходів до моніторингу та оцінки вмісту важких металів у навколишньому середовищі.

ВИОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Існуючі методи хімічного аналізу хоч і є точними, проте вимагають значних фінансових, матеріальних та часових витрат, а також високої кваліфікації персоналу. Це обмежує їх широке застосування, особливо у випадках оперативного аналізу великих територій або в польових умовах. У зв'язку з цим зростає зацікавленість до альтернативних підходів, зокрема до методів біотестування та біоіндикації, які дозволяють швидко та ефективно оцінити екологічний стан об'єктів довкілля.

Ці методи базуються на використанні живих організмів або їх реакцій як біологічних індикаторів забруднення, що дає змогу виявляти токсикологічний ефект забруднювачів, включно з важкими металами, без потреби у складному лабораторному обладнанні, або як перший етап перед лабораторними дослідженнями.

У даній роботі розглянуті методи комплексного моніторингу гео- та гідросфери з використанням рослин-біоіндикаторів та тест-організмів, оскільки одночасний аналіз кількох середовищ і виявлення взаємозв'язків між рівнями накопичення дозволяє розробити ефективну стратегію очищення компонентів довкілля від забруднюючих речовин з урахуванням

особливостей шляхів міграції забруднюючих речовин та впливу абіотичних і біотичних факторів.

Метою дослідження оцінка ефективності застосування біологічних методів моніторингу для визначення ділянок та рівня забруднення природних комплексів важкими металами.

Об'єктом дослідження є забруднені важкими металами ґрунти та водні об'єкти.

Предмет досліджень: оцінка ефективності застосування методу біоіндикації та біотестування для моніторингу забруднених важкими металами компонентів довкілля.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Важкі метали походять із різних джерел. Значна їх частина – це антропогенна діяльність різних промислових напрямків, крім того військові дії і все, що з ними пов'язане [14], техногенні та природні катастрофи [15; 16] та ін.

Наявність деяких важких металів (наприклад, кадмій, арсен) у невеликих кількостях є звичайним явищем. Однак перехід до небезпечних концентрацій впливає на процеси росту та розвитку локальної біоти. Підвищена кислотність ґрунтів сприяє збільшенню рухливості важких металів [17], їх доступності рослинам, переходу в ґрунтовий розчин.

Люди піддаються впливу ртуті через споживання забруднених морепродуктів, які містять етил, диметил і метил Hg (CH_3Hg). З іншого боку, повідомлялося, що люди, які проживають у внутрішніх регіонах Китаю, піддаються впливу CH_3Hg через споживання забрудненого рису з районів, забруднених ртуттю, і виділяють рис як основне джерело CH_3Hg у регіонах із значним забрудненням неорганічною Hg [18].

Важкі метали впливають на фізико-хімічні властивості ґрунту, тобто pH, органічну речовину, здатність до іонного обміну, текстуру, ріст мікробів, щільність мікробів або метаболічні процеси [19], що в майбутньому призведе до погіршення властивостей землі та зменшення врожайності.

Біоіндикація та біотестування є важливими інструментами екологічного моніторингу, що дозволяють оцінювати рівень забруднення важкими металами в ґрунтах і водних екосистемах за допомогою живих організмів. Біоіндикація передбачає використання організмів, таких як рослини, мікроорганізми або безхребетні, для виявлення присутності та концентрації забруднювачів шляхом спостереження за їхніми фізіологічними чи морфологічними змінами [20]. Біотестування, у свою чергу, базується на контрольованих лабораторних експериментах, де тест-організми піддаються впливу забруднених зразків для оцінки їхньої токсичності [21].

Ці методи мають ряд переваг порівняно з традиційними фізико-хімічними аналізами. Біологічні методи не потребують складного обладнання, що знижує витрати на моніторинг. Реакції живих організмів

відображають біодоступність і токсичність металів, що є важливим для оцінки їхнього впливу на екосистеми. Біоіндикація дозволяє швидко виявляти забруднені ділянки в польових умовах, тоді як біотестування забезпечує точні результати в контрольованих умовах [22].

Поруч із перевагами, біологічні методи мають недоліки, що здебільшого залежать від впливу зовнішніх факторів. Фізіологічні реакції рослин можуть залежати від зовнішніх факторів (pH, температура, освітлення), що може впливати на точність [23]. Біоіндикація краще підходить для якісної оцінки, тоді як для точних концентрацій потрібні хімічні аналізи. Деякі рослини чутливі лише до певних металів, що вимагає комбінації кількох видів для комплексного моніторингу [24].

Поєднання біологічних і фізико-хімічних методів забезпечує комплексний підхід до спостереження, де біоіндикація використовується для швидкого виявлення забруднення, а хімічні методи – для точного визначення концентрацій [22].

Поширеним методом моніторингу забруднених ділянок є біоіндикація. Термін «біоіндикатор» використовуються для опису організму або його частини, яка служить індикатором присутності забруднюючих речовин через концентрації, специфічні симптоми або морфологічні зміни [12]. Вони повинні бути стійкими, добре розподіленими в просторі та добре вивченими, мати встановлену екологію та історію життя. Доступність досліджень і суспільний інтерес є деякими характеристиками, які мають значення з економічної та соціальної точки зору. Крім того, біологічна релевантність охоплює можливості раннього попередження, вимірювані зміни у відповідь на стрес і слугування індикаторами для людських популяцій [12]. Для індикації використовуються дерева, декоративні рослини, сільськогосподарські культури та несудинні рослини.

Найчастіше для біоіндикації важких металів використовують лишайники та мохи. Ці організми мають тривалий термін життя, що робить їх цінними довгостроковими інтеграторами атмосферних опадів [25; 26]. Але вони не придатні для використання в міських та промислових умовах. Натомість у таких випадках судинні рослини більш практичні через наявність у них кутикули та міцної кореневої системи [27]. Швидший ріст деяких трав'янистих рослин також сприяє швидшій оцінці впливу важких металів [28]. Попередні дослідження показали, що накопичення важких металів у різних частинах рослин, таких як листя, стебла або коріння, може вказувати на рівень впливу та потенційний екологічний ризик [12; 29]. Крім того, судинні рослини, особливо вічнозелені види, вивчалися як пасивні пробовідбірники та біоіндикатори мікроелементів у повітрі в промислових і міських центрах [30], а також у віддалених місцях [12].

У водному середовищі для виявлення забруднення важкими металами широко використовуються водні макрофіти й деякі водні рослини. Вибір рослин для біоіндикації забруднення водного середовища важкими металами здійснюється на основі низки морфологічних, еколого-трофічних та біохімічних параметрів, що визначають здатність рослин до акумуляції, толерантності, реактивності та чутливості до токсикантів. Насамперед враховується здатність організмів до накопичення металів у тканинах без істотного пригнічення основних фізіолого-біохімічних процесів, а також стабільність популяцій у різних гідрологічних умовах. Оптимальними вважаються види, які широко поширені, не перебувають під охороною, легко ідентифікуються та характеризуються високим ступенем зв'язку з локальними умовами водного середовища [5].

Додатково враховується механізм надходження металів, наявність хелатуючих агентів та здатність до фітовідновлення або фітоекстракції [7]. Ці параметри дозволяють відбирати рослини, які є чутливими до змін у навколишньому середовищі та здатні відображати рівень антропогенного забруднення важкими металами.

У численних дослідженнях [5; 7; 8; 31] підтверджено високу ефективність деяких водно-болотних і гідрофітних рослин як біоіндикаторів забруднення важкими металами. Зокрема, *Lemna minor* (Ряска мала) проявляє високу чутливість до іонів кадмію, свинцю, ртуті та міді, що супроводжується змінами в морфометричних показниках, вмісті хлорофілу та активності антиоксидантних ферментів. Цей вид широко застосовується в стандартних біотестах і придатний для ранньої діагностики токсичних впливів у прісноводних екосистемах. Завдяки швидкому розмноженню та великій поверхні контакту з водою, ряска швидко реагує на зміни концентрацій металів, що робить її ідеальною для короткострокового моніторингу [7]. *L. minor* переносила метали Cd, Ni та Pb до 0,5, 5 та 8 мг/л відповідно, а понад ці концентрації з'являлися симптоми токсичності.

Myriophyllum spicatum (Перистолистник колосистий) ефективно накопичує Cu, Zn і Cd у своїх тканинах. Завдяки великій поверхні листків і високій швидкості поглинання, вона є чутливим індикатором забруднення цими металами в прісноводних екосистемах. Перистолистник особливо цінний для моніторингу низьких концентрацій Cd, оскільки здатен накопичувати його навіть у слабо забруднених водах [31].

Potamogeton natans (Рдесник плаваючий) ефективно використовується для біоіндикації Pb і Ni. Його коренева система активно поглинає метали з осадових відкладів [32]. Висока толерантність до Pb дозволяє використовувати цю рослину в сильно забруднених водоймах. Дослідження показало, що акумуляція

важких металів відбувалася в рослині в такому порядку $Al > Mn > Pb > Cu > Zn > Ni > Co > Cr > Cd$.

Phragmites australis (Очерет звичайний) це прибережна рослина, яка є гіперакумулятором Zn, Cu та Cr. Її потужна коренева система сприяє накопиченню металів із ґрунту та води, що робить її ефективною для моніторингу болотних і прибережних екосистем [4; 5]. Результати досліджень показують, що концентрації Pb, Cd та Cr у стеблах-коренях очерету становили 134,28–91,21, 189,47–180 та 190,57–97,9 мг/кг сухої маси відповідно. Зокрема, концентрація металів в органах рослин зменшувалася в порядку: корінь > кореневище > листок > стебло.

Проведений аналіз літературних джерел дозволив встановити види рослин-біоіндикаторів для виявлення забруднень важкими металами в різних природних комплексах, які представлені в таблиці 1.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Аналіз біологічних методів моніторингу дозволяє акцентувати на собі увагу, як на економічно вигідних, екологічно безпечних та перспективних для оцінки забруднення ґрунтів і водного середовища важкими металами. Використання рослин, таких як *Lemna minor*, *Myriophyllum spicatum*, *Phragmites australis*, мохи та інших, як біоіндикаторів, дозволяє не лише виявляти наявність забруднюючих речовин, але й оцінювати їх біодоступність і токсичність у природних умовах. Зокрема, дослідження [7] показало, що *Lemna minor* є чутливим індикатором кадмію та свинцю, реагуючи змінами в морфометричних показниках і вмісті хлорофілу. Аналогічно, *Phragmites australis* ефективно накопичує цинк і хром, що робить її цінним інструментом для моніторингу болотних екосистем, як зазначено в роботах [4; 6].

Порівняно з традиційними фізико-хімічними методами, біоіндикація та біотестування мають ряд переваг, зокрема нижчу вартість, меншу потребу в складному обладнанні та можливість швидкого виявлення забруднених ділянок у польових умовах. Наприклад, використання судинних рослин, таких як трав'янисті види, дозволяє оперативно оцінювати екологічний ризик завдяки їх швидкому росту та накопиченню металів у тканинах [12].

Незважаючи на переваги, біологічні методи мають певні обмеження. Фізіологічні реакції рослин можуть залежати від зовнішніх факторів, таких як pH, температура чи освітлення, що може знижувати точність оцінки, як зазначено в роботі [23]. Крім того, чутливість біоіндикаторів часто обмежується певними металами, що вимагає використання кількох видів для комплексного моніторингу. Наприклад, *Lemna minor* є ефективною для оцінки кадмію та свинцю, але менш чутлива до інших металів, таких як нікель. Це підтверджує необхідність комбінування різних біоіндикаторів для підвищення достовірності результатів.

Таблиця 1. Рослини-біоіндикатори наявності важких металів

Середовище	Важкі метали	Рослини-біоіндикатори	Фізіологічні реакції рослин
Геосфера	Pb	Тетрена катарська (<i>Tetraena qataranse</i>) [33]	При концентрації 100 мг/л порушується здоровий ріст та розвиток коренів [33]
	Zn	Конюшина лучна (<i>Trifolium pratense</i> L.) [12; 34]; Козяча рута (<i>Tephrosia spp.</i>); Рута широколиста (<i>Ruta Latifolia</i>) [19]	При концентраціях 200–250 мг/кг спостерігається підвищення рівня активності каталази аскорбатпероксидази, що свідчить про активацію захисного механізму проти окисного пошкодження [12]
	Cd	Конюшина лучна (<i>Trifolium pratense</i> L.) [12; 34]	При концентраціях 1–10 мг/кг спостерігається підвищення рівня активності каталази аскорбатпероксидази, що свідчить про активацію захисного механізму проти окисного пошкодження [12]
	Ni	Конюшина лучна (<i>Trifolium pratense</i> L.) [12; 34]	При концентраціях 50–100 мг/кг спостерігається підвищення рівня активності каталази аскорбатпероксидази, що свідчить про активацію захисного механізму проти окисного пошкодження [12]
	Cu	Огірок звичайний (<i>Cucumis sativus</i> L.), Овес посівний (<i>Avena sativa</i> L.) [35]	При концентрації 50 мкМ спостерігається зниження росту й розвитку рослин [35]
	Hg	Латук посівний (<i>Lactuca sativa</i>), Череда волосиста (<i>Bidens pilosa</i>), Геліокарпус американський (<i>Heliocharpus americanus</i>) [36]	При концентрації 4,0 мг/л спостерігалось зменшення довжини корінців на 86 %, 55,3 %, 31,5 % відповідно [36]
Гідросфера	Pb	Ряска мала (<i>Lemna minor</i>) [31]; Рдесник плавучий (<i>Potamogeton natans</i>) [34]	При концентрації > 8 мг/л спостерігається помірний хлороз та відшарування листя; при > 10 мг/л – сильний хлороз, некроз [31]
	Zn	Ряска горбата (<i>Lemna gibba</i> L.) [37]	При концентрації > 18,0 мг/л спостерігалися симптоми токсичності (хлороз та відшарування листя [37])
	Cd	Ряска мала (<i>Lemna minor</i>) [7]; Водопериця колосиста (<i>Myriophyllum spicatum</i>) [31]	При концентрації > 0,4 мг/л спостерігається хлороз та некроз; при > 1мг/л – посилення хлорозу, відшарування листя [7]
	Ni	Ряска мала (<i>Lemna minor</i>) [7]; Рдесник плавучий (<i>Potamogeton natans</i>) [32]	При концентрації > 3мг/л проявляються симптоми токсичності, включаючи некроз листя; при > 5 мг/л – уповільнюється швидкість росту [7]
	Cu	Кушир занурений (<i>Ceratophyllum demersum</i>) [38]	При концентраціях 100 нМ та 200 нМ спостерігаються зменшення розміру листя, крихкість стебла, хлороз [38]
	Hg	Ряска мала (<i>Lemna minor</i>) [39]	Концентрація 4 мг/л є летальною протягом 96 годин впливу [39]

Порівняння з дослідженнями, такими як [22], показує, що інтеграція біологічних і фізико-хімічних методів є оптимальним підходом для моніторингу. Біоіндикація забезпечує швидке виявлення забруднення, тоді як хімічні аналізи дозволяють точно визначити концентрації металів. Такий підхід є особливо актуальним для України, де забруднення ґрунтів і водних об'єктів важкими металами спричинене антропогенною діяльністю та військовими діями, і потребує оперативного контролю [14].

Практичне значення біоіндикації та біотестування полягає в їх здатності підтримувати стале використання природних ресурсів. Виявлення забруднених ділянок дозволяє своєчасно ізолювати їх від сільськогосподарського використання, мінімізуючи ризик для здоров'я людини та екосистем.

ВИСНОВКИ

Біоіндикація та біотестування є ефективними, економічно вигідними та екологічно безпечними методами оцінки забруднення ґрунтів і водного середовища

важкими металами. Використання живих організмів, зокрема рослин (*Lemna minor*, *Myriophyllum spicatum*, *Phragmites australis* тощо), дозволяє швидко виявляти забруднені ділянки та оцінювати біодоступність і токсичність металів без необхідності складного лабораторного обладнання.

Судинні рослини, лишайники, мохи та водні макрофіти виявилися цінними біоіндикаторами завдяки їхній здатності до біоаккумуляції, толерантності до токсикантів і адаптивності до різних екологічних умов. Особливо ефективними є гіперакумулятори, які накопичують метали у високих концентраціях, що сприяє точній оцінці рівня забруднення.

Поєднання біологічних методів (біоіндикація та біотестування) з фізико-хімічними аналізами забезпечує комплексний підхід до екологічного моніторингу. Біоіндикація дозволяє оперативно виявляти забруднення в польових умовах, тоді як біотестування забезпечує точні дані про токсичність у контрольованих лабораторних умовах.

Недоліки біологічних методів, такі як залежність від зовнішніх факторів (рН, температура, освітлення) та обмежена чутливість до певних металів, можуть бути компенсовані шляхом комбінації кількох видів біоіндикаторів і стандартизації методик. Це підвищує достовірність і універсальність отриманих даних.

Результати дослідження підтверджують перспективність біотестування та біоіндикації як альтернатив традиційним хімічним методам, особливо для оперативного моніторингу великих територій або в умовах обмежених ресурсів. Впровадження цих методів у систему екологічного моніторингу в Україні

сприятиме своєчасному виявленню, ізоляції та очищенню забруднених ділянок.

Подальші дослідження слід зосередити на розробці стандартизованих протоколів біоіндикації та біотестування, а також на вивченні нових видів біоіндикаторів, які є стійкими до специфічних умов (наприклад, міських або промислових екосистем). Це сприятиме створенню універсальних і доступних методик для моніторингу забруднення важкими металами.

Подяки. Автори висловлюють щирю подяку Університету Ліверпуля (м. Ліверпуль, Велика Британія) за надану підтримку та сприяння в проведенні дослідження.

REFERENCES

- [1] Ahmaruzzaman, M. (2011). Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166(1–2), 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.04.005>
- [2] 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 Okhtyrka districts of Sumy region. *Agroecological Journal*, 3, 136–149. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>
- [3] Kadadou, D., Tizani, L., Alsafar, H., & Hasan, S. W. (2024). Analytical methods for determining environmental contaminants of concern in water and wastewater. *MethodsX*, 12, 102582. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102582>
- [4] Jaber, E. A., & Al-Ghanimy, D. B. G. (2023). The concentration of some heavy metals in different parts of reed plant *Phragmites australis*, along the Al-Sabeel River, Iraq. *International Journal of Aquatic Biology*, 11(6), 523–526. <https://doi.org/10.22034/IJAB.V11I6.2100>
- [5] Bonanno, G., & Lo Giudice, R. (2010). Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* (common reed) and their potential use as contamination indicators. *Ecological Indicators*, 10(3), 639–645. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.11.002>
- [6] Al-Homaidan, A. A., Al-Otaibi, T. G., El-Sheikh, M. A., Al-Ghanayem, A. A., & Ameen, F. (2020). Accumulation of heavy metals in a macrophyte *Phragmites australis*: implications to phytoremediation in the Arabian Peninsula wadis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(3), 202. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8177-6>
- [7] Khan, M. A., Wani, G. A., Majid, H., Farooq, F. U., Reshi, Z. A., Husaini, A. M., & Shah, M. A. (2020). Differential Bioaccumulation of Select Heavy Metals from Wastewater by *Lemna minor*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 105(5), 777–783. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03016-3>
- [8] De Laet, C., Matringe, T., Petit, E., & Grison, C. (2019). *Eichhornia crassipes*: a Powerful Bio-indicator for Water Pollution by Emerging Pollutants. *Scientific Reports*, 9(1), 7326. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43769-4>
- [9] Sarker, A., Masud, M. A. Al, Deepo, D. M., Das, K., Nandi, R., Ansary, M. W. R., Islam, A. R. M. T., & Islam, T. (2023). Biological and green remediation of heavy metal contaminated water and soils: A state-of-the-art review. *Chemosphere*, 332, 138861. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138861>
- [10] Acharya, A., Perez, E., Maddox-Mandolini, M., De, H., & Fuente, L. (2023). The Status and Prospects of Phytoremediation of Heavy Metals. <https://arxiv.org/pdf/2312.14288>
- [11] Cakaj, A., Lisiak-Zielińska, M., Hanć, A., Małecka, A., Borowiak, K., & Drapikowska, M. (2023). Common weeds as heavy metal bioindicators: a new approach in biomonitoring. *Scientific Reports*, 13(1), 6926. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34019-9>
- [12] Cakaj, A., Drzewiecka, K., Hanć, A., Lisiak-Zielińska, M., Ciszewska, L., & Drapikowska, M. (2024). Plants as effective bioindicators for heavy metal pollution monitoring. *Environmental Research*, 256, 119222. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119222>
- [13] Hossain, Md. M., Chowdhury, Md. A., Hasan, Md. J., Rashid, Md. H.-A., Acter, T., Khan, M. N., Mahatabuddin, S., & Uddin, N. (2021). Heavy metal pollution in the soil-vegetable system of Tannery Estate. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 16, 100557. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100557>
- [14] Yashchenko, L., Androshchuk, O., Vasylenko, L., & Chornoivan, Y. (2025). Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *EUROPEAN JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 15(1), 18–27. <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>
- [15] Rao, J. N., & Parsai, T. (2025). Pollution and toxicity of heavy metals in wildfires-affected soil and surface water: A review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, 369, 125845. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125845>
- [16] Singh, V., Ahmed, G., Vedika, S., Kumar, P., Chaturvedi, S. K., Rai, S. N., Vamanu, E., & Kumar, A. (2024). Toxic heavy metal ions contamination in water and their sustainable reduction by eco-friendly methods: isotherms, thermodynamics and kinetics study. *Scientific Reports*, 14(1), 7595. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58061-3>
- [17] Sintorini, M. M., Widyatmoko, H., Sinaga, E., & Aliyah, N. (2021). Effect of pH on metal mobility in the soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 737(1), 012071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/737/1/012071>

- [18] Abdelmonem, B. H., Kamal, L. T., Elbaz, R. M., Khalifa, M. R., & Abdelnaser, A. (2025). From contamination to detection: The growing threat of heavy metals. *Heliyon*, 11(1), e41713. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41713>
- [19] Ali, S. (2022). Effects of Heavy Metals on Soil Properties and their Biological Remediation. *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*, 10(1), 40–46. <https://doi.org/10.18782/2582-2845.8856>
- [20] Markert, B., Breure, A., & Zechmeister, H. (2003). Bioindicators and Biomonitoring: Principles, Concepts and Applications. *Trace Metals and Other Contaminants in the Environment*, 6, 15–25. Accessed: Jul. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/bookseries/trace-metals-and-other-contaminants-in-the-environment/vol/6/suppl/C>
- [21] Wadhia, K., & Thompson, K. C. (2007). Low-cost ecotoxicity testing of environmental samples using microbiotests for potential implementation of the Water Framework Directive. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 26(4), 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2007.01.011>
- [22] Zhou, Q., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., & Jiang, G. (2008). Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*, 606(2), 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.11.018>
- [23] Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- [24] Prasad, M. N. V., & Freitas, H. M. (2003). Metal hyperaccumulation in plants-Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, 6, 285–321. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173314709012>
- [25] Bargagli, R. (2016). Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: A review. *Science of The Total Environment*, 572, 216–231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.202>
- [26] Świsłowski, P., Nowak, A., & Rajfur, M. (2021). Is Your Moss Alive during Active Biomonitoring Study? *Plants*, 10(11), 2389. <https://doi.org/10.3390/plants10112389>
- [27] Baluška, F., & Mancuso, S. (2021). Individuality, self and sociality of vascular plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1821), 20190760. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0760>
- [28] Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Wang, Q., Cao, H., Yang, G., Deng, L., Wang, Y., Zhou, Y., Anastopoulos, I., & Wang, X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123919. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123919>
- [29] Alengebawy, A., Abdelkhalik, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M.-Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- [30] Pellegrini, E., Lorenzini, G., Loppi, S., & Nali, C. (2014). Evaluation of the suitability of *Tillandsia usneoides* (L.) L. as biomonitor of airborne elements in an urban area of Italy, Mediterranean basin. *Atmospheric Pollution Research*, 5(2), 226–235. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.028>
- [31] Li, Y., Song, Y., Zhang, J., & Wan, Y. (2023). Phytoremediation Competence of Composite Heavy-Metal-Contaminated Sediments by Intercropping *Myriophyllum spicatum* L. with Two Species of Plants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 3185. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043185>
- [32] Ahmad, S. S., Reshi, Z. A., Shah, M. A., Rashid, I., Ara, R., & Andrabi, S. M. A. (2016). Heavy metal accumulation in the leaves of *Potamogeton natans* and *Ceratophyllum demersum* in a Himalayan Ramsar site: management implications. *Wetlands Ecology and Management*, 24(4), 469–475. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9472-9>
- [33] Usman, K., Abu-Dieyeh, M. H., Zouari, N., & Al-Ghouti, M. A. (2020). Lead (Pb) bioaccumulation and antioxidative responses in *Tetraena qataranse*. *Scientific Reports*, 10(1), 17070. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73621-z>
- [34] Malizia, D., Giuliano, A., Ortaggi, G., & Masotti, A. (2012). Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. *Chemistry Central Journal*, 6(S2), S6. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-S2-S6>
- [35] Trentin, E., Cesco, S., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Celletti, S., Feil, S. B., Zuluaga, M. Y. A., Ferreira, P. A. A., Ricachenevsky, F. K., Stefanello, L. O., De Conti, L., Brunetto, G., & Mimmo, T. (2022). Plant species and pH dependent responses to copper toxicity. *Environmental and Experimental Botany*, 196, 104791. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104791>
- [36] Kalinhoff, C., & Calderón, N.-T. (2022). Mercury Phytotoxicity and Tolerance in Three Wild Plants during Germination and Seedling Development. *Plants*, 11(15), 2046. <https://doi.org/10.3390/plants11152046>
- [37] Khellaf, N., & Zerdauoui, M. (2009). Phytoaccumulation of zinc by the aquatic plant, *Lemna gibba* L. *Bioresource Technology*, 100(23), 6137–6140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.043>
- [38] Thomas, G., Stärk, H.-J., Wellenreuther, G., Dickinson, B. C., & Küpper, H. (2013). Effects of nanomolar copper on water plants – Comparison of biochemical and biophysical mechanisms of deficiency and sublethal toxicity under environmentally relevant conditions. *Aquatic Toxicology*, 140–141, 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.05.008>
- [39] Varga, M., Horvatić, J., & Čelić, A. (2013). Short term exposure of *Lemna minor* and *Lemna gibba* to mercury, cadmium and chromium. *Open Life Sciences*, 8(11), 1083–1093. <https://doi.org/10.2478/s11535-013-0238-1>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Ahmaruzzaman, M. (2011). Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 166, no. 1–2, pp. 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2011.04.005>
- [2] 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 Okhtyrka districts of Sumy region. *Agroecological Journal*, vol. 3, pp. 136–149. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>

- [3] Kadadou, D., Tizani, L., Alsafar, H., & Hasan, S. W. (2024). Analytical methods for determining environmental contaminants of concern in water and wastewater. *MethodsX*, vol. 12, p. 102582. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102582>
- [4] Jaber, E. A., & Al-Ghanimy, D. B. G. (2023). The concentration of some heavy metals in different parts of reed plant *Phragmites australis*, along the Al-Sabeel River, Iraq. *International Journal of Aquatic Biology*, vol. 11, no. 6, pp. 523–526. <https://doi.org/10.22034/IJAB.V11I6.2100>
- [5] Bonanno, G., & Lo Giudice, R. (2010). Heavy metal bioaccumulation by the organs of *Phragmites australis* (common reed) and their potential use as contamination indicators. *Ecological Indicators*, vol. 10, no. 3, pp. 639–645. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.11.002>
- [6] Al-Homaidan, A. A., Al-Otaibi, T. G., El-Sheikh, M. A., Al-Ghanayem, A. A., & Ameen, F. (2020). Accumulation of heavy metals in a macrophyte *Phragmites australis*: implications to phytoremediation in the Arabian Peninsula wadis. *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 192, no. 3, p. 202. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8177-6>
- [7] Khan, M. A., Wani, G. A., Majid, H., Farooq, F. U., Reshi, Z. A., Husaini, A. M., & Shah, M. A. (2020). Differential Bioaccumulation of Select Heavy Metals from Wastewater by *Lemna minor*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 105, no. 5, pp. 777–783. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-03016-3>
- [8] De Laet, C., Matringe, T., Petit, E., & Grison, C. (2019). *Eichhornia crassipes*: a Powerful Bio-indicator for Water Pollution by Emerging Pollutants. *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, p. 7326. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43769-4>
- [9] Sarker, A., Masud, M. A. Al, Deepo, D. M., Das, K., Nandi, R., Ansary, M. W. R., Islam, A. R. M. T., & Islam, T. (2023). Biological and green remediation of heavy metal contaminated water and soils: A state-of-the-art review. *Chemosphere*, vol. 332, p. 138861. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138861>
- [10] Acharya, A., Perez, E., Maddox-Mandolini, M., De, H., & Fuente, L. (2023). The Status and Prospects of Phytoremediation of Heavy Metals. Accessed: Jul. 19, 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2312.14288>
- [11] Cakaj, A., Lisiak-Zielińska, M., Hanć, A., Małecka, A., Borowiak, K., & Drapikowska, M. (2023). Common weeds as heavy metal bioindicators: a new approach in biomonitoring. *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, p. 6926. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34019-9>
- [12] Cakaj, A., Drzewiecka, K., Hanć, A., Lisiak-Zielińska, M., Ciszewska, L., & Drapikowska, M. (2024). Plants as effective bioindicators for heavy metal pollution monitoring. *Environmental Research*, vol. 256, p. 119222. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119222>
- [13] Hossain, Md. M., Chowdhury, Md. A., Hasan, Md. J., Rashid, Md. H.-A., Acter, T., Khan, M. N., Mahatabuddin, S., & Uddin, N. (2021). Heavy metal pollution in the soil-vegetable system of Tannery Estate. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, vol. 16, p. 100557. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100557>
- [14] Yashchenko, L., Androshchuk, O., Vasylenko, L., & Chornoivan, Y. (2025). Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *EUROPEAN JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES*, vol. 15, no. 1, pp. 18–27. <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>
- [15] Rao, J. N., & Parsai, T. (2025). Pollution and toxicity of heavy metals in wildfires-affected soil and surface water: A review and meta-analysis. *Environmental Pollution*, vol. 369, p. 125845. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125845>
- [16] Singh, V., Ahmed, G., Vedika, S., Kumar, P., Chaturvedi, S. K., Rai, S. N., Vamanu, E., & Kumar, A. (2024). Toxic heavy metal ions contamination in water and their sustainable reduction by eco-friendly methods: isotherms, thermodynamics and kinetics study. *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 7595. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58061-3>
- [17] Sintorini, M. M., Widyatmoko, H., Sinaga, E., & Aliyah, N. (2021). Effect of pH on metal mobility in the soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 737, no. 1, p. 012071. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/737/1/012071>
- [18] Abdelmonem, B. H., Kamal, L. T., Elbaz, R. M., Khalifa, M. R., & Abdelnaser, A. (2025). From contamination to detection: The growing threat of heavy metals. *Heliyon*, vol. 11, no. 1, p. e41713. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41713>
- [19] Ali, S. (2022). Effects of Heavy Metals on Soil Properties and their Biological Remediation. *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*, vol. 10, no. 1, pp. 40–46. <https://doi.org/10.18782/2582-2845.8856>
- [20] Markert, B., Breure, A., & Zechmeister, H. (2003). Bioindicators and Biomonitors: Principles, Concepts and Applications. *Trace Metals and Other Contaminants in the Environment*, vol. 6, pp. 15–25. Accessed: Jul. 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/bookseries/trace-metals-and-other-contaminants-in-the-environment/vol/6/suppl/C>
- [21] Wadhia, K., & Thompson, K. C. (2007). Low-cost ecotoxicity testing of environmental samples using microbiotests for potential implementation of the Water Framework Directive. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 26, no. 4, pp. 300–307. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2007.01.011>
- [22] Zhou, Q., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., & Jiang, G. (2008). Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica Chimica Acta*, vol. 606, no. 2, pp. 135–150. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.11.018>
- [23] Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- [24] Prasad, M. N. V., & Freitas, H. M. (2003). Metal hyperaccumulation in plants-Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*, vol. 6, pp. 285–321, 2003, Accessed: Jul. 19, 2025. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173314709012>
- [25] Bargagli, R. (2016). Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: A review. *Science of The Total Environment*, vol. 572, pp. 216–231. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.202>
- [26] Świsłowski, P., Nowak, A., & Rajfur, M. (2021). Is Your Moss Alive during Active Biomonitoring Study? *Plants*, vol. 10, no. 11, p. 2389. <https://doi.org/10.3390/plants10112389>

- [27] Baluška, F., & Mancuso, S. (2021). Individuality, self and sociality of vascular plants. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 376, no. 1821, p. 20190760. <https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0760>
- [28] Riaz, M., Kamran, M., Fang, Y., Wang, Q., Cao, H., Yang, G., Deng, L., Wang, Y., Zhou, Y., Anastopoulos, I., & Wang, X. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi-induced mitigation of heavy metal phytotoxicity in metal contaminated soils: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 402, p. 123919. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123919>
- [29] Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M.-Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*, vol. 9, no. 3, p. 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- [30] Pellegrini, E., Lorenzini, G., Loppi, S., & Nali, C. (2014). Evaluation of the suitability of *Tillandsia usneoides* (L.) L. as biomonitor of airborne elements in an urban area of Italy, Mediterranean basin. *Atmospheric Pollution Research*, vol. 5, no. 2, pp. 226–235. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.028>
- [31] Li, Y., Song, Y., Zhang, J., & Wan, Y. (2023). Phytoremediation Competence of Composite Heavy-Metal-Contaminated Sediments by Intercropping *Myriophyllum spicatum* L. with Two Species of Plants. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, no. 4, p. 3185. <https://doi.org/10.3390/ijerph20043185>
- [32] Ahmad, S. S., Reshi, Z. A., Shah, M. A., Rashid, I., Ara, R., & Andrabi, S. M. A. (2016). Heavy metal accumulation in the leaves of *Potamogeton natans* and *Ceratophyllum demersum* in a Himalayan RAMSAR site: management implications. *Wetlands Ecology and Management*, vol. 24, no. 4, pp. 469–475. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9472-9>
- [33] Usman, K., Abu-Dieyeh, M. H., Zouari, N., & Al-Ghouti, M. A. (2020). Lead (Pb) bioaccumulation and antioxidative responses in *Tetraena qataranse*. *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 17070. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73621-z>
- [34] Malizia, D., Giuliano, A., Ortaggi, G., & Masotti, A. (2012). Common plants as alternative analytical tools to monitor heavy metals in soil. *Chemistry Central Journal*, vol. 6, no. S2, p. S6. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-S2-S6>
- [35] Trentin, E., Cesco, S., Pii, Y., Valentinuzzi, F., Celletti, S., Feil, S. B., Zuluaga, M. Y. A., Ferreira, P. A. A., Ricachenevsky, F. K., Stefanello, L. O., De Conti, L., Brunetto, G., & Mimmo, T. (2022). Plant species and pH dependent responses to copper toxicity. *Environmental and Experimental Botany*, vol. 196, p. 104791. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2022.104791>
- [36] Kalinhoff, C., & Calderón, N.-T. (2022). Mercury Phytotoxicity and Tolerance in Three Wild Plants during Germination and Seedling Development. *Plants*, vol. 11, no. 15, p. 2046. <https://doi.org/10.3390/plants11152046>
- [37] Khellaf, N., & Zerdaoui, M. (2009). Phytoaccumulation of zinc by the aquatic plant, *Lemna gibba* L. *Bioresource Technology*, vol. 100, no. 23, pp. 6137–6140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.043>
- [38] Thomas, G., Stärk, H.-J., Wellenreuther, G., Dickinson, B. C., & Küpper, H. (2013). Effects of nanomolar copper on water plants – Comparison of biochemical and biophysical mechanisms of deficiency and sublethal toxicity under environmentally relevant conditions. *Aquatic Toxicology*, vol. 140–141, pp. 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2013.05.008>
- [39] Varga, M., Horvatić, J., & Čelić, A. (2013). Short term exposure of *Lemna minor* and *Lemna gibba* to mercury, cadmium and chromium. *Open Life Sciences*, vol. 8, no. 11, pp. 1083–1093. <https://doi.org/10.2478/s11535-013-0238-1>

© Гурець Л. Л., Сіпко І. О., Залевська І. В., Аблєєва І. Ю.

Дата надходження статті до редакції: 20.08.2025

Дата затвердження статті до друку: 11.09.2025

Опубліковано: 24.11.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0