

ГЕОЕКОЛОГІЯ ЯК МІЖДИСЦИПЛІНАРНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДОСЛІДЖЕННЯ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ РАДІОНУКЛІДАМИ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

Бабенко В.М.¹, Мандрик О.М.²

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76000, м. Івано-Франківськ
volodymyr.babenko@khp.edu.ua, oleh.mandryk@nung.edu.ua

Метою дослідження є оцінка ефективності застосування геоєкології як міждисциплінарної дисципліни задля дослідження накопичення та міграції в ґрунтах радіаційних ізотопів важких металів. Зважаючи на розвиток атомної енергетики, військових, медичних та наукових розробок в яких застосовують радіоактивні матеріали, зростають ризики й кількість випадків по забрудненню територій ізотопами важкими металами. Але природні та техногенні процеси приводять до розповсюдження таких специфічних забруднень на сусідні території, а опаді та ерозійні процеси приводять до здатності ізотопів мігрувати через систему ґрунтових вод до водних об'єктів і накопичуватись в мулових покладах. На 2026 рік нажалі проблема дослідження міграції ізотопів суттєво ускладнюється в зв'язку з продовженням активних бойових дій на сході та півдні території України. Потрібно підкреслити, що в таких випадках звичайний інструментальний аналіз досить складний, тому на нашу думку доцільно використовувати міждисциплінарні підходи моніторингу довкілля. Методика дослідження базується на поєднанні сучасних методів які застосовують в екології, географії та біології, що спираються на знання з територіальної міграції хімічних елементів, які корелюються з топографією місцевості та дослідженням рослин у ролі індикаторів важких металів. Географічні відомості окреслюють зони міграції хімічних елементів, а знання біології рослин забезпечують виявлення забруднених ділянок з застосуванням простого обладнання, що спрощує моніторингові дослідження. Так з однієї сторони географія місцевості звужує зону дослідження, а сучасні методи біологічної індикації дають гарні оцінки по забрудненню радіаційними ізотопами важкими металами. Поєднання таких методів в геоєкології дає можливість оперативного виявлення забруднених ділянок без застосування складного стаціонарного лабораторного обладнання. Досліджено, що при поєднанні знання топографії місцевості з екологічними методами по біологічній індикації таких достатньо розповсюджених рослин як мохи, лишайники, водні бурі та червоні макрофіти, що мають властивості по акумуляції в собі важких металів, ефективність таких методів суттєво зростає в порівнянні з традиційними хімічними та фізико-хімічними методами. У результаті встановлено, що при поєднанні методів геоєкології та біологічної індикації зростає ефективність виявлення важких металів. Для ґрунту та береговому мулу поблизу водних об'єктів високу чутливість демонструє Очерет звичайний – *Phragmites australis*, а для ставків та болота підходить звичайна Ряска мала – *Lemna minor*, яка здавна використовується акваріумістами у якості простого індикатора чистоти води. Безумовно при поєднанні методів геоєкології з фізико-хімічним аналізом зростає точність оцінки забруднення ізотопами. На практиці визначено оптимальне поєднання методів топографії місцевості та рослин-індикаторів з характерними властивостями по біологічній акумуляції к ізотопам важких металів, що спрощує розробку стандартизованих підходів в радіологічному моніторингу місцевості. Практична значимість: поєднання методів геоєкології та біології дозволяє простіше та з меншим витратами виявляти забруднення територій ізотопами важких металів, що в підсумку знижує ризики як для людей, так і для екосистем. Використання геоєкології у вигляді міждисциплінарного інструменту сприяє безпечному використанню природних земельних та водних ресурсів та забезпечує економічну вигоду для якісного природного моніторингу. Результати дослідження можуть бути використані як для розробки методів екологічного моніторингу в Україні, так і для стратегії очищення територій забруднених ізотопами важких металів. *Ключові слова:* геоєкологія; ґрунти; радіоактивні ізотопи важких металів; моніторинг; забруднення довкілля.

Geoecology as an interdisciplinary tool for studying the level of soil contamination by heavy metal radionuclides. Babenko V., Mandrykh O.

The purpose of the study is to assess the effectiveness of using geoecology, an interdisciplinary discipline, to examine the accumulation and migration of radioactive heavy-metal isotopes in soils. Given the development of nuclear energy, as well as military, medical, and scientific applications that use radioactive materials, the risks and number of cases of contamination of territories with heavy-metal isotopes are increasing. However, natural and anthropogenic processes spread this specific pollution to neighboring regions, and precipitation and erosion facilitate the migration of isotopes through the groundwater system to water bodies and their accumulation in silt deposits. Unfortunately, by 2026, the problem of studying isotope migration will be significantly complicated



by the continuation of active hostilities in the east and south of Ukraine. It should be emphasized that in such cases, conventional instrumental analysis is quite complicated, therefore, it is advisable to use interdisciplinary approaches to environmental monitoring.

The research methodology is based on a combination of modern methods from ecology, geography, and biology, which rely on knowledge of the territorial migration of chemical elements, correlated with the area's topography and the distribution of plants as indicators of heavy metals. Geographical information outlines the migration zones of chemical elements, and knowledge of plant biology enables the detection of contaminated areas using simple equipment, thereby simplifying monitoring studies. So, on the one hand, the area's geography narrows the study area, and modern methods of biological indication provide reasonable estimates of contamination with radioactive isotopes of heavy metals. The combination of these methods in geoecology enables quick detection of contaminated areas without the need for complex stationary laboratory equipment. It was found that when combining knowledge of the area's topography with ecological methods for biological indication of mosses, lichens, water sedges, and red macrophytes, which accumulate heavy metals, the effectiveness of these methods increases significantly compared to traditional chemical and physico-chemical methods. As a result, it was found that combining geoecological methods with biological indicators increases the effectiveness of detecting heavy metals. For soil and coastal silt near water bodies, Common Reed – *Phragmites australis* demonstrates high sensitivity, and for ponds and swamps, Common Duckweed – *Lemna minor* is suitable, which has long been used by aquarists as a simple indicator of water purity. Of course, when combining geoecological methods with physico-chemical analyses, the accuracy of assessing isotope contamination increases. Scientific novelty: the combination of geoecological and biological methods deepens understanding of the effectiveness of biological indicators for monitoring pollution by heavy metal isotopes. In practice, the optimal combination of terrain topography and indicator plants with characteristic properties for the biological accumulation of heavy metal isotopes has been determined, which simplifies the development of standardized approaches for radiological monitoring of terrain. Practical significance: the combination of geoecological and biological methods enables easier, less costly detection of pollution in territories contaminated with heavy metal isotopes, ultimately reducing risks to both people and ecosystems. The use of Geoecology as an interdisciplinary tool contributes to the safe use of natural land and water resources and provides economic benefits for high-quality natural monitoring. The results of the study can be used both to develop environmental monitoring methods in Ukraine and to develop strategies for cleaning up territories contaminated with heavy metal isotopes. *Key words:* geoecology; soils; radioactive isotopes of heavy metals; monitoring; environmental pollution.

Постановка проблеми. Виклики сьогодення вимагають в потребі ефективних та при цьому простих методів по контролю за розповсюдженням і міграцією важких металів, особливо це стосується їх радіаційних ізотопів. Якщо для водних середовищ міграційні процеси проходять достатньо швидко, за рахунок властивості самої води та зміни сезонів і опадів, то для ґрунту потрібно враховувати ще такі додаткові параметри як топографія місцевості, властивості глибинних шарів ґрунту, водоносні горизонти та інше. По своїм хімічним властивостям ізотопи важких металів суттєво не відрізняються від своїх стабільних елементів, а в роботі [1] досліджено що в Україні, внаслідок проведення бойових дій, в ґрунтах вміст важких металів більший ніж фонові концентрації від 1,4 раз для *Cd*, до 5,4 раз для *Pb*. І це відомості на 2022 рік, а з урахуванням чотирьох років повномасштабної війни в зоні бойових дій ці цифри стали тільки більші.

На сьогодні відомо, що у військових діях в Україні використовуються матеріали які містять радіаційні ізотопи хімічних елементів. Окремим пунктом є відомості порушення ґрунтів окупаційною армією РФ навесні 2022 року в Чорнобильській зоні відчуження. Сам факт риття окопів та бліндажів в радіаційне засмічених ґрунтах вже є порушенням всіх міжнародних екологічних норм, а потрапляння забрудненої землі на поверхню приводить до розповсюдженню ізотопів важких металів на оточуючі території. В зоні відчуження практично всі біологічні види деревної та трав'яної рослинності мають або мутаційні зміни, або акумулюють в собі цілий спектр радіаційних штучних і природних ізотопів. Ще в ХХ столітті для експрес моніторингу забруднення води та ґрунтових мулів використовували аналітичні й біологічні

методи біологічних маркерів, завдяки яким можна зробити топографічну мапу міграції, поширення та поглинання хімічних елементів рослинами [2]. Саме такий підхід використовується в геоекології при поєднанні топографії місцевості та екологічних і біологічних знань. При використанні аналітичних методик практично завжди отримують гарні результати, але є і свої складності: для цього потрібно окрім спеціалізованого персоналу ще й складне та коштовне обладнання, що звичайно не завжди є в наявності або неможливо доставити на експериментальну ділянку. А ось при використанні знання про зв'язок між топографією місцевості, міграцією радіаційних ізотопів важких металів та рослинами що є біологічними маркерами, дослідницькі місії набагато спрощуються.

Актуальність дослідження. На сьогодні знання про топографію місцевості суттєво прискорюють пошук наземних або водних рослин що слугують у якості біологічного індикатора по важким металам, а головними вимогами до таких дерев та трав є наступні пункти. По-перше, такі рослини повинні бути звичайними та доступними для своєї місцевості, мати високу швидкість росту, що може дати для екологічного моніторингу статистичні відомості про вміст забруднюючого компоненту, наприклад по ізотопах цезію та стронцію. По-друге, рослини повинні при таких вищеперерахованих параметрах витримувати, накопичувати та залишати в своїх біологічних тканинах необхідні для дослідження ізотопи важких металів в значних масових долях до 1 г на 1 кілограм своєї ваги в перерахунку на суху масу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тема дослідження відповідає «Цілі сталого розвитку:

Україна», де прописано, що 40% площі країни належать до території екологічної мережі. Необхідність забезпечення, відновлення збереження та сталого використання земель, природних екосистем, сталого управління лісами, саме ці завдання закріплені у Національній доповіді по сталому управлінню лісами в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З проблемами моніторингу по забрудненим територіям, включно і з радіаційними ізотопами важких металів, стикались і в країнах Євросоюзу. Систематизований підхід по відновленню стану ґрунту почали займатись в країнах східної Європи з 1998 року – ремедіація територій Чехії привела до встановлення стандартів, а потім набула статусу необхідної складової при приватизації ділянок. Такий принцип дослідження що поєднує в собі топографію місцевості, біологію та екологію фактично і є геоекологією та має схожість з біологічною ремедіацією ґрунтів, що вже використовується в Чехії [3] та інших країнах Європи.

Виходячи з самої суті – моніторинг забруднення навколишнього середовища радіонуклідами важкими металами є необхідним першим кроком для розробки стратегій контролю за станом довкілля. Задля подолання таких викликів є сенс використовувати топографію місцевості та рослини і таким чином збирати необхідну інформацію про ступінь забруднення радіаційними ізотопами важкими металами [3]. В дослідженнях роботи [4] підтверджується можливість ефективно оцінювати вміст в ґрунтах концентрацію важких металів, а так як в хімічних сполуках стабільні та радіаційні ізотопи металів поведуть себе схоже, то й біологічна акумуляція в коріння рослин з ґрунтів проходить схожим чином. Процеси міграції хімічних речовин в ґрунтах та поверхневих водах корелюються з накопиченням таких елементів в частинах рослин [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Лабораторні аналітичні методи якісного та кількісного хімічного аналізу є досить точними, але вимагають сучасного обладнання, достатньо рідкісних або коштовних реактивів, а саме головне підготовленого персоналу. Нажаль такі фактори обмежують застосування фізико-хімічних та хімічних методик, особливо в сучасних польових умовах поблизу проведення військових дій і недостатнього фінансування. Саме це спонукає шукати прості та надійні альтернативні підходи, що використовуються в світі для дослідження ґрунтів. Європейський досвід у методах біоіндикації дозволяє ефективно, з меншими витратами та швидко оцінити екологічний стан ґрунтів на місцевості. Відпрацьовані методики, що базуються на реакціях рослин на хімічні елементи в ґрунтах, на сьогодні дають схожі результати з лабораторними аналізами значно скорочуючи час на дослідження.

Наукова новизна. Поєднання методів геоекології та біології поглиблює розуміння ефективності біологічної індикації у якості методів моніторингу забруднення ізотопами важких металів. Головною проблемою залишається виявлення зв'язків концентрацій радіонуклідів важких металів та реакцією рослин на них, вперше проведено моніторингове дослідження, що пов'язує в собі геоекологія при вивчені процесів міграції хімічних елементів та сполук в навколишньому середовищі.

Метою дослідження є оцінка ефективності моніторингу застосування рослин біомаркерів у визначенні територій, що мають ґрунти з підвищеним вмістом радіаційних нуклідів важких металів.

Об'єктом дослідження є поверхневі шари ґрунтів, що мають в собі забруднення ізотопами важких металів.

Предметом досліджень є оцінка ефективності застосування в методах біологічної індикації рослин біомаркерів для екологічного моніторингу територій забруднених радіаційними ізотопами важких металів.

Викладення основного матеріалу. В звичайному природному середовищі радіаційні нукліди легких ^{40}K та в тому числі й важких металів ^{232}Th , ^{238}U , знаходяться у розсіяному вигляді або в рудах, що знаходяться глибоко під поверхнею. В такої концентрації вони не несуть небезпеку та встановлюють звичайний природний радіаційний фон, що в різних місцях нашої планети може відрізнятись, як раз за рахунок географічних та метеорологічних особливостей місцевості: молоді гірські формації, виходи на поверхню вулканічних порід, водні ерозійні процеси оголення раніше глибинних шарів, тощо. Практична більшість важких металів, що потрапляють в навколишнє середовище – це антропогенна діяльність різних людини: ядерна енергетика, промисловість, будівництво та нажалі наслідки військових дій, а також техногенні катастрофи [5–7].

Природні концентрації важких металів наприклад свинцю, до якого природним шляхом розпадаються ^{232}Th , ^{238}U складає для ґрунтів від 10 до 50 мг на 1 кг сухої породи в залежності від геологічного району. Але завдяки використанню бензинів з тетраетиллом свинцю його почали реєструвати навіть в Гренландії, а його концентрація в повітрі зросла в 10 разів до значення більш ніж 1000 нг/м³ для промислових міст. Дослідження вмісту свинцю в навколишньому середовищі має кореляцію з ураном-238, природна концентрація якого знаходиться в межах від 1 до 3 мг на 1 кг ґрунту, виключенням є граніти де концентрація досягає 10 мг/кг.

В складі верхнього шару ґрунту метали з порядковим номером 26 (*Fe*) та більше впливають на такі параметри землі як: *pH*, іонообмінні процеси, щільність та текстура, ріст і метаболізм мікробів. Такі зміни приводять до погіршення характеристик ґрунтів, що можна реєструвати рослинами біологічними індикаторами [8]. Специфічні симптоми або мор-

фологічні зміни рослин, прикладом яких частіше є лишайники та мохи, у яких за рахунок довготривалого життя та малої швидкості росту простіше виявляти зміни, використовують для сільської місцевості.

Попередні дослідження показали, що накопичення ізотопів важких металів у частинах рослин, таких як листя, стебла або коріння, на пряму вказує на екологічний ризик збільшення концентрації в ґрунтах таких хімічних елементів. Для такого моніторингу підходять судинні рослини наступних видів:

– папороті для лісових систем у вигляді пробовідбірника та біологічного індикатора мікроелементів в ґрунтах та повітрі;

– очерет звичайний (*Phragmites australis*) болотна рослина що відмінно себе почуває і на узбережжі природних та штучних водоймищ, що є відмінним акумулятором важких металів, у тому числі й радіаційних ізотопів цезію-137 та стронцію-90, а також міді-64 та стабільного хрому-52;

– рдесник плавучий (*Potamogeton natans*), розповсюджений в північній півкулі, біологічний індикатор для моніторингу міграції радіаційних та стабільних ізотопів важких металів з ґрунтів до водних об'єктів та донних відкладень, стійкий до високих концентрацій свинцю.

Проведений аналіз, згідно з даними відомих джерел інформації, дозволяє стверджувати, що при вираховуванні хелаторів – природних рослинних сполук які зв'язують іони металів та утворюють стабільні комплекси [9] вищеперераховані рослини здатні виконувати роль індикаторів антропогенного забруднення ізотопами важких металів, таблиця 1.

Концентрації радіаційних ізотопів важких металів, що створюють реакції в рослинах можуть відрізнятися, це в першу чергу пояснюється як рівнем кислотності та розчинності іонів в ґрунтах, води або донних відкладень, так і відмінностями самих підвидів рослинного царства.

Поєднання геоєкології та біологічного моніторингу дозволяє створити методи дослідження довкілля, що базуються на економічно вигідних, достатньо простих, перспективних та достатньо екологічно безпечних методиках оцінки забруднення ґрунтів радіаційними ізотопами важкими металами. Використання достатньо розповсюджених рослин, таких як папороть (*Polypodiophyta*) в лісових еко-

системах, очерет звичайний (*Phragmites australis*) на стиках лугових та болотних біомів, Рдесник плавучий (*Potamogeton natans*) на мілинах водоймищ поблизу об'єктів дослідження, або лишайників та мохів у якості біологічних індикаторів, дозволяє виявляти перевищення ГДК по забруднюючим речовинам, а також оцінювати їх міграцію, здатність до акумуляції рослинами та токсичність для біологічних індикаторів. Зокрема, дослідження показали, що очерет звичайний дуже нерівномірно накопичує в своїх частинах важкі метали, скачками реагуючи на зміни в показниках навколишнього середовища. Здатність накопичувати в собі важкі метали та радіаційні ізотопи вже використовується в біоремедіації для очищення забруднених ґрунтів. Цей достатньо новий біологічний підхід детоксифікує шкідливі речовини, як приклад і важкі метали, відновлюючи екосистеми на самих територіях. Такі методи важливі ще й тому, що географія забрудненої місцевості доволі змінна, відповідно використання рослин надає перевагу і як бонус зменшує процеси вітрової та водної ерозії, не дозволяє ізотопам важких металів мігрувати та розповсюджуватись на прилеглі території.

Якщо зробити порівняння з класичними хімічними та фізико-хімічними методами, що в своїй більшості використовуються як зразкові в лабораторних умовах, природно рослинна біологічна індикація мають ряд переваг, а саме: нижча вартість, особливо в сучасних умовах повномасштабних військових дій, стає дуже важливим фактором; для біотестування необхідна менша потреба в складному та коштовному лабораторному обладнанні; і останнє це швидка можливість виявлення забруднених ділянок прямо на місці, практично одразу в польових умовах. Прикладом є папороть – рослина яка вдома та розповсюджена доволі широко в лісових та чагарникових біомах, особливо на північних схилах з низькою освітленістю. Використання папороті оперативно дозволяє оцінювати екологічне забруднення завдяки їх розповсюженості та швидкому росту, а накопиченню металів у тканинах надає можливість зібрати проби та провести повномасштабні дослідження вже в лабораторних умовах з отриманням точних результатів.

Практичне значення рослин у ролі біологічних індикаторів складно переоцінити, а стійкість

Таблиця 1

Рослини біоіндикатори ізотопів хімічних елементів

№ п/п	Біологічний індикатор	Ізотоп та біологічна реакція рослини
1	Папороть (<i>Polypodiophyta</i>)	¹³⁷ Cs, ⁹⁰ Sr – усихання та пожовтіння кінцівок листя, пригнічення росту, у дорослих рослин менша висота на 10-15 см
2	Очерет звичайний (<i>Phragmites australis</i>)	²⁴³ Am, ²³⁵ U – при концентраціях що в 2 рази перевищують фонні рівні спостерігається зниження росту та розвитку рослини, що підтверджується накопиченням ізотопів в кореневій системі
3	Рдесник плавучий (<i>Potamogeton natans</i>)	⁶⁴ Cu, ¹³⁷ Cs – при концентраціях що в 1,5 рази перевищують фонні рівні вже спостерігається крихкість та зменшення розмірів листової поверхні

і витривалість деяких з них до високих концентрацій радіаційних ізотопів важких металів дозволяє підтримувати стале використання ґрунтів та природних земельних ресурсів, які за рахунок продовження військових дій в Україні зменшилися на 20%. Просте своєчасне виявлення земельних ділянок забруднених ізотопами важких металів дозволяє провести ізоляцію їх від сільськогосподарського використання тамі ж самими рослинами. Утворення лісосмуг дозволяє мінімізувати розповсюдження ізотопів та зменшити ризик для здоров'я мешканців населених пунктів, що знаходяться поруч і в цілому знизити навантаження на сусідні екосистеми.

Висновки. Рослини в Україні є невід'ємним компонентом ґрунтового покриву практичної більшості географічних ландшафтів, саме тому роль біологічної індикації або використання знання про рослини біомаркери є перспективним напрямком розвитку геоєкології, ландшафтної та загальної екології, доволі простим та ефективним інструментом вивчення довкілля. Економічна вигода та екологічна безпека такої методики, задля виявлення радіаційних ізотопів важких металів в поверхневих шарах ґрунтів, виставляє такі методи в перші ряди для

сучасного використання в різних географічних регіонах. Використання простих та розповсюджених рослинних живих організмів, як приклад видів папороті, дозволяє простіше виявляти забруднені географічної земельної лісової ділянки, швидко зібрати проби на наявність ізотопів важких металів без необхідності перевозити з собою складне лабораторне обладнання. Зазвичай рослини можуть змінюватись і лабораторні аналізи підтверджують негативний або позитивний результат, але краще дослідження проводити в спеціалізованих лабораторіях ніж в польових умовах.

Наприкінці треба додати, що звичайні, усім відомі рослини, такі як папороті, мохи та лишайники виявляються не такими вже й простими, а цінними біологічними індикаторами. Їх недостатньо вивчені властивості до біоаккумуляції ізотопів металів, витривалість та терпимість до токсикантів, здатність адаптуватись до складних екологічних умов надають перспективні шляхи розвитку біології та геоєкології. Властивості біоіндикаторів накопичувати та затримувати в собі метали у високих концентраціях, на сьогодні є досить привабливою темою для майбутніх досліджень в цьому напрямку.

Література

1. Zaitsev Yu., Hryshchenko O., Romanova S., Zaitseva I. Influence of combat actions on the content of gross forms of heavy metals in the soils of Sumy and Okhlyrka districts of Sumy region. *Agroecological Journal*. 2022. Vol. 3. P. 136–149. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>.
2. Kadadou D., Tizani L., Alsafar H., Hasan S. W. Analytical methods for determining environmental contaminants of concern in water and wastewater. *MethodsX*. 2024. Vol. 12. P. 102582. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2024.102582>.
3. Cakaj A., Lisiak-Zielińska M., Hanć A., Małecka A., Borowiak K., Drapikowska M. Common weeds as heavy metal bioindicators: a new approach in biomonitoring. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, № 1. P. 6926. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34019-9>.
4. Cakaj A., Drzewiecka K., Hanć A., Lisiak-Zielińska M., Ciszewska L., Drapikowska M. Plants as effective bioindicators for heavy metal pollution monitoring. *Environmental Research*. 2024. Vol. 256. P. 119222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119222>.
5. Yashchenko L., Androshchuk O., Vasylenko L., Chornoivan Y. Environmental risks of heavy metal pollution in war-affected soils in Ukraine. *European Journal of Environmental Sciences*. 2025. Vol. 15, № 1. P. 18–27. DOI: <https://doi.org/10.14712/23361964.2025.3>.
6. Rao J. N., Parsai T. Pollution and toxicity of heavy metals in wildfires-affected soil and surface water: a review and meta-analysis. *Environmental Pollution*. 2025. Vol. 369. P. 125845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.125845>.
7. Singh V., Ahmed G., Vedika S., Kumar P., Chaturvedi S. K., Rai S. N., Vamanu E., Kumar A. Toxic heavy metal ions contamination in water and their sustainable reduction by eco-friendly methods: isotherms, thermodynamics and kinetics study. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, № 1. P. 7595. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58061-3>.
8. Ali S. Effects of heavy metals on soil properties and their biological remediation. *Indian Journal of Pure & Applied Biosciences*. 2022. Vol. 10, № 1. P. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.18782/2582-2845.8856>.
9. Чисте повітря для України. *Copernicus Global Climate Highlights Report 2024* : URL: <https://www.copernicus.eu/en/news/news/copernicus-global-climate-report-2024-confirms-last-year-warmest-record-first-ever-above> (дата звернення: 17.02.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 26.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 30.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026