

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-81>

УДК 614.7:631.5: 631.8

### ТИХОНОВА ОЛЕНА

Сумський національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0961-4896>

e-mail: [ur5apn@ukr.net](mailto:ur5apn@ukr.net)

### МИХАЙЛОВА ВІКТОРІЯ

Сумський національний аграрний університет

<https://orcid.org/0009-0002-7176-318X>

e-mail: [w.michajlowa@gmail.com](mailto:w.michajlowa@gmail.com)

## ПРОБЛЕМА АКУМУЛЯЦІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ПРЕДСТАВНИКАМИ ФЛОРИ В УМОВАХ ІНТЕНСИВНОГО ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ

У статті висвітлено нагальну проблему накопичення важких металів в культурних та дикорослих представників флори на фоні інтенсивного використання земель та зростання агрохімічного навантаження на ґрунти. Наведено огляд сучасних джерел надходження кадмію, свинцю, хрому, ртуті та інших токсичних елементів в агроєкосистемі, зокрема в результаті тривалого застосування мінеральних добрив, пестицидів і меліорантів, а також забруднення від транспорту і промислових викидів.

Розглянуті шляхи міграції важких металів у системі «ґрунт – рослина», зокрема їх біодоступність, поглинання коренем, транспортування в надземні органи і накопичення у врожаї. Продемонстровано, що інтенсивність накопичення металів залежить від фізико-хімічних властивостей ґрунту (рН, вміст органічної речовини, гранулометричний склад), умов живлення рослин та їх біологічних особливостей.

На підставі узагальнених експериментальних даних показаний вплив підвищених концентрацій важких металів на морфологічні та фізіолого-біохімічні показники рослин. Зокрема, у разі дії кадмію висвітлено ступінь пригнічення фотосинтетичної активності, зменшення вмісту хлорофілу, білка в рослинах *Lathyrus oleraceus*. Вказано на дисфункції основних обмінних процесів і зниження продуктивності культур через забруднення техногенними агентами.

Приділено увагу методам моніторингу і біоіндикації як засобам оцінки стану агросередовища. Обґрунтована доцільність застосування сільськогосподарських культур і сегетальної рослинності як біоіндикаторів рівня забруднення, а також використання коефіцієнтів біоконцентрації і транспортування для кількісної оцінки ймовірності потрапляння металів у їжу.

Сформульовано думку, що проблема накопичення важких металів комплексна і вимагає синтезу агрохімічних, фізіолого-біохімічних і екологічних досліджень. Перспективними є розробка моделей прогнозування накопичення металів у врожаї, удосконалення методів агроєкологічного моніторингу та реалізація заходів, спрямованих на зниження біодоступності токсичних елементів у ґрунтах і мінімізацію їх переходу в готову продукцію.

**Ключові слова:** важкі метали, ґрунт, рослини акумулюють, раціональне природокористування, антропогенний вплив, акумуляція важких металів, забруднення ґрунтів, ремедіація, фітоіндикація

TYKHONOVA OLENA, MYKHAILOVA VIKTORIA

Sумы National Agrarian University

## THE PROBLEM OF HEAVY METAL ACCUMULATION BY FLORA IN CONDITIONS OF INTENSIVE LAND USE

The article addresses the pressing problem of heavy metal accumulation in cultivated and wild flora against the background of intensive land use and increasing agrochemical load on soils. An overview of modern sources of cadmium, lead, chromium, mercury and other toxic elements in agroecosystems is presented, in particular because of long-term use of mineral fertilizers, pesticides and land reclamation agents, as well as contamination originating from transport and industrial emissions.

The migration paths of heavy metals in the soil-plant system are considered, their bioavailability, root absorption, transport to above-ground organs and accumulation in the crop. It is demonstrated that the intensity of metal accumulation depends on the physicochemical properties of the soil (pH, organic matter content, and granulometric composition), plant nutrition conditions, and their biological characteristics.

Based on summarised experimental data, the influence of elevated concentrations of heavy metals on the morphological and physiological and biochemical indicators of plants is demonstrated. Under cadmium exposure, the degree of suppression of photosynthetic activity, a decrease in the content of chlorophyll and protein in *Lathyrus oleraceus* plants is highlighted. Dysfunctions of the main metabolic processes and a decrease in crop productivity due to pollution by technogenic agents are also indicated.

Attention is paid to monitoring and bioindication methods as means of assessing the state of the agro environment. The feasibility of using agricultural crops and segetal vegetation as bioindicators of the level of pollution is substantiated, as well as the use of bioconcentration and transport coefficients for quantitative assessment of the probability of metals getting into food chains.

It is concluded that the problem of heavy metal accumulation is complex and requires a synthesis of agrochemical, physiological-biochemical and ecological research. Promising directions include the development of models for predicting the accumulation of metals in the crop, the improvement of agroecological monitoring methods, and the implementation of measures aimed at reducing the bioavailability of toxic elements in soils and minimising their transfer to finished products.

**Keywords:** heavy metals, soil, plants-accumulants, rational nature management, anthropogenic impact, accumulation of heavy metals, soil contamination, remediation, phytoindication

Стаття надійшла до редакції / Received 15.03.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.04.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Тихонова Олена, Михайлова Вікторія

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Інтенсивне землекористування зазвичай включає постійне внесення мінеральних добрив, пестицидів, меліорантів, а також застосування зрошення [1, 2]. Разом із цими заходами у ґрунт надходять і важкі метали. До важких металів, які є потенційно небезпечними для живих організмів, відносяться свинець (Pb), цинк (Zn), мідь (Cu), арсен (As), кадмій (Cd), хром (Cr), нікель (Ni) і ртуть (Hg). Деякі з них є металами, інші – металоїдами [3, 4]. Навіть у невеликих концентраціях ці елементи можуть бути дуже токсичними. Важкі метали є природною складовою доквілля. Вони знаходяться в земній корі з давніх часів. Проблема виникає, коли їх концентрація перевищує природний фоновий рівень [5]. Джерела надходження важких металів у ґрунт можна поділити на природні та антропогенні. До природних належать вивітрювання гірських порід, ґрунтоутворення та лісові пожежі. До антропогенних – викиди промислових і енергетичних підприємств, спалювання викопного палива, транспорт, а також надмірне або нераціональне використання мінеральних добрив і засобів захисту рослин [6, 7]. Забруднення доквілля важкими металами має глобальний характер. Ці елементи можуть накопичуватися в тканинах рослин, тварин і людини. Вони не розкладаються біологічним шляхом і можуть тривалий час зберігатися в екосистемах [8]. Через це відбувається їх транспортування та концентрація в ланцюгах живлення. Деякі метали, наприклад марганець (Mn), цинк (Zn), хром (Cr), мідь (Cu), залізо (Fe) і нікель (Ni), є необхідними для живлення організмів і виконують певні фізіологічні функції. Однак при високих концентраціях вони також можуть бути токсичними. Інші метали, такі як ртуть (Hg), кадмій (Cd), арсен (As) й свинець (Pb), є отруйними навіть у невеликих концентраціях [1, 9, 10].

Додатковими джерелами забруднення є промислові викиди, рух транспорту, використання осадів стічних вод тощо. З часом при тривалому антропогенному навантаженні відбувається накопичення важких металів в орному шарі ґрунту. Частина цих елементів потім переходить у рухомі форми, доступні для поглинання корінням рослин. В результаті сільськогосподарські культури можуть накопичувати метали у своїх коренях, листках, а інколи й у продуктивних органах. Накопичення важких металів у харчовій сировині становить загрозу для здоров'я людей та тварин через токсичність багатьох металів та їх властивість до біоаккумуляції [4, 11]. Водночас раціональне природокористування не завжди передбачає рух та трансформацію металів у системах «ґрунт–рослина». Хоча існує певна кількість досліджень, закономірності накопичення важких металів різними культурами за інтенсивного ведення сільського господарства залишаються не зовсім зрозумілими. Необхідно з'ясувати, як на доступність металів у ґрунті та їх накопичення у врожаї впливають різні агротехнічні прийоми. Це підкреслює потребу у вивченні механізмів накопичення важких металів сільськогосподарськими культурами та у розробці способів зменшення ризику забруднення продукції.

### Аналіз досліджень та публікацій

Інтенсивна діяльність у сільському господарстві спричиняє надмірне накопичення важких металів (ВМ) у ґрунтах, що впливає на стан і врожайність культурних рослин. Виявлено, що засолення та наявність ВМ у середовищі можуть суттєво змінювати концентрацію хлорофілів у рослинах, отриманих за допомогою клітинної селекції, знижуючи їхню фотосинтетичну активність і порушуючи обмін речовин [1]. Броннікова Л.І. показала, що засолення ґрунту у комплексі з наявністю іонів важких металів є суттєвим чинником зниження вмісту хлорофілів у листках тютюну, що свідчить про порушення фотосинтетичної активності рослин [1]. Гусак О. В. виявила, що тривалість вегетації та кліматичні зміни є визначальними факторами для вмісту важких елементів у зерні злакових рослин [2]. Кліматичні зміни та тривалість вегетації впливають на накопичення ВМ у зерні злакових, що підкреслює необхідність моніторингу для забезпечення безпеки харчових продуктів [2]. Ступінь накопичення ВМ у ґрунтах під олійними культурами в значній мірі залежить від мінерального живлення рослин, що визначає роль агротехнічних прийомів у контролі фітотоксичності [3]. Мазур О., Гуцол Г. провели дослідження, які показали, що інтенсивність накопичення важких металів у ґрунтах, де вирощують олійні культури, залежить від фону мінерального живлення та від сорту рослин [3]. Варчик А., Груба П., Йозефовська А., Ванік Т., Варчик А., Свйятек Б., Буяк Й., Петшиковський М. встановили, що лохина та домінуючі мохи можуть бути біоіндикаторами тієї частини лісових екосистем, що зазнає впливу транспортного навантаження, для оцінки забруднення важкими металами [4]. Біоіндикатори, зокрема дикорослі рослини, мохи і лохина (*Vaccinium myrtillus* L.), дозволяють оцінити антропогенний вплив швидкісних автошляхів, на накопичення ВМ у рослинах і ґрунті [4]. Вивчення пустельних рослин і культурних зернових показує, що деякі види можуть виконувати роль фітоекстракторів, зв'язуючи або накопичуючи ВМ у коренях та надземній частині [5, 6]. Захра Алі Джаафар Аль-Асаді та Відад М. Тахер Аль-Асаді дослідили, що пустельна рослина *Rhanterium epapposum* Oliv. є індикатором забруднення важкими металами ґрунту [5]. Халілі П., Ходаджі М., Надушан М. А., Чамані А. довели, що деякі зернові культури та кіноа здатні накопичувати важкі метали у забруднених ґрунтах і можуть виконувати роль агрегаторів для виведення цих шкідливих елементів з ґрунту [6]. Томчик П., Вдовчик А., Вятковська Б., Шиманська-Пуліковська А. вивчали забруднювачі як індикатори забруднення для оцінки концентрації важких металів у ґрунтах сільськогосподарських угідь Польщі. Вчені використовували рослини в якості індикаторів забруднення без негативного впливу на розглянуті об'єкти, адже вони є дешевими та простими у використанні інструментами для визначення концентрації потенційно токсичних елементів у навколишньому природному середовищі. Вищезазначені дослідження показали, що важкі метали становлять високу небезпеку для культурних рослин та навіть для людини у випадках неправильного ведення сільського господарства [7]. Дослідження ступеня забруднення сільськогосподарських ґрунтів різних країн, у тому числі Польщі, показало,

що існує значний ризик для рослин і екосистем у зв'язку з накопиченням кадмію, свинцю, хрому та інших ВМ [7, 8]. Махамуд М., Хан Ф. Р., Захір Ф., Джавад М., Альхевайрні С. С. показали, що *Bagarius bagarius* Hamilton та *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms є двома основними біоіндикаторами, які допомагають у виявленні, моніторингу та оцінці забруднення ВМ, а також у визначенні токсичності навколишнього середовища в індустріальних регіонах Карачі, Пакистан [8]. Використання біоіндикатора дає змогу оцінити екологічні ризики та ефективність застосування рослин у моніторингу та фактичному очищенні ґрунту [9–11]. Зокрема, Лішук А., Парфеник А., Городиська І., Бородаєв В., Хітренко Т., Тимошенко Л. обґрунтували, що біоіндикація (фітоіндикація), базуючись на дослідженнях хімічних і радіохімічних забруднень довкілля, дає змогу розпізнати екологічні ризики в агроценозах, які формуються внаслідок забруднення їх важкими металами [9]. Використання біоіндикації дає змогу оцінити екологічні ризики та ефективність застосування рослин у моніторингу та фактичному очищенні ґрунту [9, 10, 11]. Сангван С., Кумар М., Ламба Р., Сінгх С., Кумарі А., Ваті Л. Показали роль різних рослин як біоіндикаторів для комплексного моніторингу важких металів у сільському господарстві [10]. Чакай А., Лісяк-Зелінська М., Ганьц А., Малецька А., Боровяк К., Драпіковська М. обґрунтували, що бур'яни, що широко поширені, можуть слугувати біоіндикаторами забруднень важкими металами, це новий погляд на використання біомоніторингу [11]. Каняньська Р., Дрімал М., Варга Й., Комарек М., Ахадо С. К., Шчастна М., Кізекова М., Янчова Л. Дослідили розподіл критично важливих сировинних матеріалів у ґрунтах заплав та їх потенційний ризик як нових забруднювачів [12]. У літературі приділяється багато уваги використанню різних культур як біоіндикаторів і фітоекстракторів ВМ: зернові, бобові, гриби та водні рослини демонструють здатність акумулювати метали та сигналізувати про токсичність середовища [6, 8, 14, 16]. Виявлено, що ефективність накопичення ВМ залежить від видоспецифічних особливостей, фізіологічного стану рослин і умов вирощування, у тому числі кислотності ґрунту і вмісту органічних речовин [1,3,13]. Едо Г.І., Самуель П.О., Олоні Г.О., Езекиель Г.О., Ікпекоро В.О., Обасохан П., Онгулу Дж., Отунуя Ч.Ф., Опіті А.Р., Аякайе Р.С., Ессагха А. Е. А., Агбо Дж. описали, які є процеси стійкості, біоаккумуляції та екоотоксичності, пов'язані із важкими металами у рослин та у довкіллі [13]. Рашид А., Шутте Б. Дж., Улері А., Дейхолос М. К., Саного С., Ленхофф Е. А., Бек Л. навели факти, що забруднення сільськогосподарських ґрунтів важкими металами негативно впливає на фізіологічні, біохімічні та молекулярні процеси в сільськогосподарських рослинах, викликає окисний стрес та пригнічення фотосинтетичного фосфорилування [14]. Кустодіо М., Еспіноза С., Пеньялоза Р., Перальта-Оргіс Т., Санчес-Суарез Х., Ордінола-Запата А., Вейра-Пенья Е. дослідили, що мікроорганізми забруднених важкими металами озерних осадів можуть слугувати біоіндикатором якості середовища [15]. Алі С., Васудев Л., Салма, Кумар Д. вважають, що гриби є акумулянтами таких важких металів як кадмій, свинець і ртуть, і є біоіндикаторами у довкіллі [16]. Надгурська-Соха А. показала, що акумуляція важких металів сільськогосподарськими культурами залежить від умов землекористування та виду культурної рослини [17]. Отже, сучасні дослідження підкреслюють комплексність проблеми: інтенсивне використання земель та антропогенне навантаження зумовлюють ситуацію, у якій сільськогосподарські культури накопичують ВМ, створюючи ризики для урожайності рослин і безпеки харчових продуктів [1–17]. Виявлення ефективних біоіндикаторів і застосування фітомоніторингу стають вирішальними методами для контролю та зменшення негативного впливу ВМ.

#### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** систематизація наукових досліджень провідних вчених в галузі агроекології щодо накопичення важких металів в агрофітоценозах

#### Виклад основного матеріалу

Забруднення ґрунтів важкими металами створює реальну загрозу для агроекосистем. Багато з цих елементів є токсичними навіть у малих кількостях. Вони не руйнуються в природному середовищі, а лише переходять з одного компонента екосистеми в інший. ВМ здатні накопичуватися в тканинах рослин і надалі потрапляти до організму людини через харчову продукцію [1]. Основним шляхом надходження важких металів у рослини є їх поглинання кореневою системою з ґрунту у формі розчинних сполук. Тому рівень забруднення ґрунту безпосередньо впливає на якість урожаю.

Олійні культури займають близько 36-38% посівних площ України [2]. Із них 81,6 % припадало на соняшник. Площа посівів соняшника станом на 2025 р становила 5,17 млн га, а валове річне виробництво насіння – 13,6 млн т. Соняшник характеризується високим винесенням поживних речовин із ґрунту. За врожайності 21 ц/га з ґрунту щороку виноситься близько 120 кг азоту, 45 кг фосфору та 235 кг калію. Для компенсації цих втрат господарства збільшують норми внесення мінеральних добрив. У сучасних сівозмінах, які часто включають лише 3–4 культури, навантаження на ґрунт зростає. Фактичні норми внесення під соняшник становлять: аміачна селітра – 449 кг/га, суперфосфат простий – 245 кг/га, калій хлористий – 95 кг/га. Разом із цими добривами до ґрунту надходять важкі метали. За розрахунками, на 1 га посіву потрапляє 2261 мг свинцю та 489 мг кадмію. Найбільша частка свинцю надходить із суперфосфатом (47,6 %) та аміачною селітрою (39,7 %). Основним джерелом кадмію є калій хлористий (58,2 %) і суперфосфат (40,0 %). Частка аміачної селітри у надходженні кадмію є незначною (1,8 %). Представлені дані свідчать, що за інтенсивного мінерального удобрення відбувається додаткове накопичення свинцю і кадмію в ґрунтах. З урахуванням масштабів вирощування соняшнику це формує ризик подальшого переходу токсичних елементів у продукцію [4, 11].

Окрім мінеральних добрив джерелом важких металів в умовах інтенсивного ведення сільського господарства є пестициди. У табл. 1 вказано джерело важких металів у найбільш поширених пестицидах.

## Сполуки важких металів у пестицидах

Тип пестициду	Хімічна сполука	Хімічна формула	Важкі метали	Торгова назва
Інсектицид	Фосфід алюмінію	AlP	Al	Фосміній
Інсектицид	Алюмосилікат	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Al	Використовується як допоміжна речовина у фумігантах і родентицидах
Інсектицид	Арсенова кислота	H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	As	Arsenol, Oxars, Arsenate Powder
Інсектицид	Купрум ацетоарсеніт	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> As <sub>6</sub> Cu <sub>4</sub> O <sub>16</sub>	As, Cu	Paris Green
Інсектицид	Оксид міді	Cu <sub>2</sub> O	Cu	Cuprous Oxide, Cuprox
Інсектицид	Карбонат міді	CH <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> O	Cu	Використовується у бордоській суміші та Cu-based інсектицидах
Інсектицид	Купрум нафтенат	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub> CuO <sub>4</sub>	Cu	Cupro-Naphthenate, Cuprinol
Інсектицид	Свинець арсенат	AsHO <sub>4</sub> Pb	As, Pb	Lead Arsenate
Інсектицид	Перфтороктансульфонат літію	C <sub>8</sub> F <sub>17</sub> LiO <sub>3</sub> S	Li	ПАР в складі пестицидів
Інсектицид	Метарсеніт натрію	NaAsO <sub>2</sub>	As	-
Фунгіцид	Оксид міді	CuO	Cu	Nordox
Фунгіцид	Купрум біс(3-фенілсаліцилат)	C <sub>26</sub> H <sub>18</sub> CuO <sub>6</sub>	Cu	-
Фунгіцид	Купрум абіетат	C <sub>40</sub> H <sub>58</sub> CuO <sub>4</sub>	Cu	Copper Abietate
Фунгіцид	Ацетат міді	Cu <sub>2</sub> (CH <sub>3</sub> COO) <sub>4</sub>	Cu	Copper Acetate
Фунгіцид	Карбонат міді	CH <sub>2</sub> Cu <sub>2</sub> O	Cu	-
Фунгіцид	Хлорид міді	CuCl <sub>2</sub>	Cu	-
Фунгіцид	Гідроксид міді	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Cu	Cu	Чемпіон, Купроксат
Фунгіцид	Купрум нафтенат	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub> CuO <sub>4</sub>	Cu	Cupro-Naphthenate
Фунгіцид	Купрум оксихлорид	(ClCu <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Cu	Медян Екстра 350 SC
Фунгіцид	Купрум сульфат	CuSO <sub>4</sub> ·Ca(OH) <sub>2</sub>	Cu	Купроксат
Фунгіцид	Алюмінію фосетил	[C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O-P(H)O <sub>2</sub> ] <sub>3</sub> Al	Al	Alette
Фунгіцид	Оксид ртуті	HgO	Hg	Mercuric Oxide
Фунгіцид	Хлорид ртуті	Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Hg	Calomel
Фунгіцид	Метоксиетилртуть хлорид	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> ClHgO	Hg	-
Фунгіцид	Метоксиетилртуть ацетат	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> HgO <sub>3</sub>	Hg	-
Фунгіцид	Фенілртутевий ацетат	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> Hg	Hg	Phenyl Mercuric Acetate
Фунгіцид	Фенілртутевий хлорид	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> ClHg	Hg	Phenylmercury Chloride
Фунгіцид	Фенілртутевий нітрат	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> HgNO <sub>3</sub>	Hg	-
Фунгіцид	Метарсеніт натрію	NaAsO <sub>2</sub>	As	-
Фунгіцид	Борний цинк	ZnB <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (OH) <sub>3</sub>	Zn, B	Мікрокат Цинк-Бор
Фунгіцид	Оксид цинку	ZnO	Zn	Cureal Zinc Based Fungicide
Фунгіцид	Цинеб	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> N <sub>2</sub> S <sub>4</sub> Zn	Zn	Zineb
Гербіцид	Арсенова кислота	H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub>	As	Arsenol
Гербіцид	Арсенат кальцію	As <sub>2</sub> Ca <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	As	-
Гербіцид	Метарсеніт натрію	NaAsO <sub>2</sub>	As	-
Гербіцид	Какодилова кислота	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> AsO(OH)	As	«Агент Блю»
Родентицид	Карбонат барію	BaCO <sub>3</sub>	Ba	-
Родентицид	Фосфід цинку	Zn <sub>3</sub> P <sub>2</sub>	Zn	Супер Кобра, Роденфос
Родентицид	Сульфат талію	Tl <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Tl	-
Дефоліант	Дихромат натрію	Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Cr	-
Дефоліант	Хлорид цинку	ZnCl <sub>2</sub>	Zn	-
Дефоліант	Хлорид ртуті	HgCl <sub>2</sub>	Hg	-

Джерело: систематизовано згідно [14, 17]

Матеріал табл. 1 демонструє, що в засобах захисту рослин історично широко використовуються сполуки міді (Cu), арсену (As), ртуті (Hg), свинцю (Pb), цинку (Zn), хрому (Cr), барію (Ba) та талію (Tl). Деякі з них є

активними речовинами (наприклад, арсенати, ртутні органічні сполуки, фосфіди металів), інші використовуються як контактні компоненти для фунгіцидів або допоміжні інгредієнти. Деякі сполуки (свинцеві та ртутні препарати, арсенати) зараз заборонені або істотно обмежені через високу токсичність, біоаккумуляцію та тривалу персистентність у ґрунтах [11, 14]. Водночас мідні та цинкові препарати залишаються в обігу, хоча їх використання також регламентується екологічними нормами. Таблиця може бути використана при аналізі джерел надходження важких металів в агроecosистеми та для оцінки потенційного ризику їх накопичення у ґрунті та сільськогосподарській продукції.

### Моніторинг, фітоіндикація та біоаккумуляція важких металів у контексті інтенсивного землекористування

Біоіндикація та фітоіндикація є дієвим методом оцінки забруднення територій важкими металами в контексті раціонального природокористування. Аналіз видової структури рослинності та вмісту металів у тканинах рослин дозволяє судити про реальний ступінь техногенного забруднення ґрунтів і повітря. Термін «індикатор» у біології означає організм або сукупність організмів, які відображають стан довкілля за своїми морфологічними, фізіологічними чи біохімічними реакціями. У ґрунтових екосистемах такими індикаторами є вищі рослини, мохи, лишайники. Їхня присутність, відсутність або зміна щільності популяцій пов'язана з концентрацією токсичних елементів, кислотністю, вологістю та забезпеченістю елементами живлення.

Території колишнього видобутку металевих руд, зокрема в районах Олкуша, Болеслава, Хшанова, Тшебіня, Бітома й Тарновських Гур, залишаються осередками підвищених концентрацій цинку, свинцю та кадмію [17]. Навіть після припинення промислової діяльності метали зберігаються у ґрунті, формуючи тривале джерело вторинного забруднення. За відсутності явних морфологічних ознак техногенного впливу такі ділянки можна ідентифікувати саме через аналіз рослинного покриву та біогеохімічні дослідження [7, 8].

Біомоніторинг дозволяє оцінити інтегральний ефект сумарної дії факторів, а не окремого забруднювача. На відміну від хімічного аналізу ґрунту, який проводиться одноразово, рослини накопичують елементи впродовж вегетаційного періоду, відображаючи доступну для біоти фракцію металів. Це має ключове значення для агроecosистем інтенсивного типу, де регулярне внесення мінеральних добрив, засобів захисту рослин та меліорантів створює багатоконпонентне навантаження.

Серед рослин, що ростуть на засмічених металами субстратах, розрізняють [5, 6]: облігатні металлофіти - види, приурочені до ґрунтів із підвищеним вмістом металів; факультативні металлофіти (псевдометаллофіти) - здатні рости як на забруднених, так і на фонових територіях.

У регіонах із промисловою діяльністю у складі Південної Польщі виявлено види, що утримують стабільні популяції на відвалах цинково-свинцевих руд [17]. Серед них - *Silene vulgaris* (Moench) Garcke, *Arabidopsis arenosa* (L.) Lawalree, *Dianthus carthusianorum* L., *Armeria maritime* (Mill.) Willd., *Biscutella laevigata* L. Для цих рослин відмінності між популяціями із забруднених і чистих територій свідчить про генетично закріплені механізми толерантності [11]. Фізико-хімічні параметри субстрату визначають структуру рослинних угруповань. Вік відвалів, тривалість емісії металів, вміст макроелементів (фосфору, кальцію), гранулометричний склад і реакція середовища мають більший вплив на формування флори, ніж сама валова концентрація металів. За лужної реакції (pH > 7) частина металів переходить у менш рухомі форми, що знижує їхню біодоступність.

Для сільськогосподарських культур фізико-хімічний склад ґрунту має подвійне значення. З одного боку, зниження рухомості металів обмежує їх надходження до врожаю. З іншого – за змін агрохімічного режиму (підкислення, інтенсивне удобрення, порушення структури ґрунту) відбувається мобілізація токсичних елементів і посилюється акумуляція важких металів в рослинній продукції. Біоіндикація та дослідження біоаккумуляції є інструментами оцінки ризиків у системах інтенсивного землекористування. Вони дозволяють виявити приховані осередки техногенного забруднення, біодоступні форми металів. Фітоіндикація дає змогу прогнозувати можливість їх переходу в харчовий ланцюг та обирати заходи фітореємедіації або агрохімічної корекції ґрунтів [1, 3, 13]. У контексті проблеми акумуляції важких металів сільськогосподарськими культурами ці підходи формують наукову основу для управління якістю ґрунтів та безпечністю продукції рослинництва. Важкі метали потрапляють у кореневу систему рослин-акумулянтів двома шляхами: апопластним (пасивним) через клітинні стінки та міжклітинники і симпластним (активним) з участю мембранних білків переносників. Проте, саме по собі захоплення не визначає ступінь фітотоксичності. Вирішальними є подальше транспортування елементів у надземні органи і їх накопичення до концентрацій, що порушують нормальний обмін речовин. Дані експериментів свідчать про те, що більша частина захопленого металу може залишатися локалізованою в коренях. Зокрема в експериментах з проростками томата було встановлено, що після 20 днів обробки ртуттю до листків надходило менш ніж 2% від загальної кількості, що накопичилася в коренях, а в пагони - менш ніж 4 % сухої маси. Така локалізація знижує безпосередній вплив на фотосинтетичний апарат, проте в той же час створює небезпеку вторинної мобілізації металу при зміні умов [14, 16].

Транспорт важких металів здійснюється спеціалізованими білками-переносниками, які забезпечують їх надходження через плазматичну мембрану, ксилемний транспорт і депонування у вакуолях. Вакуолярна компартиментация розглядається як найважливіший механізм детоксикації, оскільки ізолює іони від цитозольних ферментативних систем. Інтенсивність роботи транспортерів, а також синтез металзв'язувальних сполук (фітокелатинів, металотіонінів) визначають індивідуальну чутливість культур до забруднень [17].

В інтенсивних агроecosистемах важливу роль відіграють взаємодії між елементами. Вони можуть бути

антагоністичними чи синергічними і змінюють ступінь накопичення у врожаю. Наприклад, наявність ртуті в живильному розчині знижувало накопичення арсену в коренях, що свідчить про конкуренцію за транспортні системи. Водночас при високих концентраціях ртуті, посилювався транспорт арсену в надземні органи. Подібний антагонізм встановлений між залізом і кадмієм у рису: формування залістистої плівки навколо коренів обмежувало надходження Cd [14]. Польові дослідження овочевих культур на забруднених ділянках у Дакці показали, що вміст хрому і свинцю перевищував відповідно в 10 і приблизно у 2 рази граничні значення, встановлені Food and Agriculture Organization та World Health Organization. Ці дані підкреслюють, що різниця у токсичності між видами обумовлена не тільки концентрацією металів у ґрунті, а й видовими особливостями їх поглинання і транспортування. Загальна фітотоксичність також залежить від того, якими способами взаємодіють із металами рослини [11]. В табл. 2 представлено токсичний вплив кадмію на розвиток рослин.

Таблиця 2

**Фітотоксичний ефект кадмію для рослин *Lathyrus oleraceus* Lam.**

Фізіологічні/біохімічні показники	Вміст Кадмію в ґрунті (ppm)	Спостережений ефект (%)
Вміст хлорофілу a/b (Chl a/Chl b)	0	100 (базове значення)
	25	73/72 (зниження через Cd)
	50	48/44 (сильна токсичність Cd)
Швидкість фотосинтезу (%)	0	100
	25	88 (пригнічення Cd)
	50	42 (сильне пригнічення Cd)
Вміст розчинних цукрів (%)	0	100
	25	67 (зниження через Cd)
	50	49 (сильне зниження)
Вміст розчинних білків (%)	0	100 (базове значення)
	25	61 (пригнічення Cd)
	50	50 (сильне пригнічення)
Вміст амінокислот (%)	0	100 (базове значення)
	25	73 (зниження через Cd)
	50	65 (сильне пригнічення)

Джерело: систематизовано згідно [13, 14]

Вміст кадмію в листках гороху становив 25 і 50 ppm, а результати наведені у відсотках від базового значення для контрольних рослин без Cd. Підвищення концентрації кадмію призводить до помітного пригнічення всіх досліджуваних показників. Вміст хлорофілу a і b зменшувався від базових 100 % до 73 і 72 % при 25 ppm і до 48 і 44 % при 50 ppm, що свідчить про порушення фотосинтетичної активності. Швидкість фотосинтезу знижувалася до 88 % і 42 % відповідно при 25 і 50 ppm Cd, відображаючи токсичну дію кадмію на фотосинтетичні процеси. Вміст розчинних цукрів зменшувався до 67 % при 25 ppm і до 49 % при 50 ppm, що вказує на порушення вуглеводного обміну. Вміст розчинних білків і амінокислот також демонстрував негативну залежність від кадмію: при 50 ppm показники знижувалися до 50 % і 65 % відповідно, що свідчить про пригнічення білкового метаболізму та синтезу амінокислот. Отже, Cd може істотно пригнічувати фізіологічні та біохімічні функції рослин [6, 8, 14, 16].

Для агрофітоценозів використання рослин акумулянтів має практичне значення, оскільки визначає ризик потрапляння токсикантів у харчовий ланцюг. Фітоекстракція та фітоакумуляція забезпечують перенесення металів у біомасу; фітостабілізація обмежує рухливість металів у ґрунті; ризофільтрація сприяє адсорбції іонів у прикореневій зоні; фітоволатилізація окремі елементи переводить у легкі форми. Поширення і біодоступність важких металів у ґрунтах залежать від їх загального вмісту й фізико-хімічних властивостей середовища. Біодоступна частка визначається насамперед розчинністю іонів у ґрунтового розчині та вмістом органічної речовини. Встановлено, що зниження рН на одну одиницю може збільшувати вдвічі концентрацію рухомих форм Zn, Ni, Cd, Al і Cu [7, 8]. Кислотність орних земель підвищується в регіонах зі значною кількістю опадів внаслідок вимивання основних катіонів ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ). Додатковим чинником є тривале використання мінеральних добрив, що призводить до утворення фосфорної, сірчаної і нітратної кислот у ґрунті. У таких умовах мобільність металів зростає і, отже, збільшується їх надходження в рослини. Водночас високий вміст органічної речовини може знижувати доступність металів за рахунок утворення стійких метал-органічних комплексів. Для систем інтенсивного землекористування ці закономірності мають прикладне значення. Корекція кислотності, підтримання оптимального вмісту органічної речовини та контроль мінерального живлення є інструментами управління біодоступністю металів і, відповідно, зниження ризику їх акумуляції в сільськогосподарських культурах.

### Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Показано, що інтенсивне землекористування призводить до накопичення важких металів у ґрунтах, що забезпечує їх міграцію у сільськогосподарські культури та надалі включення до трофічних ланцюгів. Виявлено негативний вплив важких металів на параметри росту рослин: при збільшенні концентрацій кадмію, свинцю та інших металів знижувалися і висота рослин, і ємність біомаси що свідчить про пригнічення росту і зниження продуктивності. Фітотоксичність важких металів проявляється в порушенні фотосинтезу, білкового та вуглеводного обмінів. Аналіз останніх досліджень показав зниження кількості сухих речовин у біомасі та зміну морфометричних індикаторів рослин. З'ясовано джерела надходження важких металів у агроценози. Вагому частку антропогенної складової накопичення важких металів у ґрунтах та сільськогосподарських культурах становлять пестициди. Вказано основні хімічні сполуки важких металів, що використовуються у сучасному землеробстві, а також у виробництві мінеральних добрив і меліорантів. Дані моніторингу біоаккумуляції важких металів підтверджують доцільність використання рослин як індикаторів антропогенного впливу та інструментів оцінки екологічного стану агроландшафтів. Показано, що рівень біоаккумуляції залежить від виду рослини, концентрації металу, агрохімічних характеристик ґрунту та системи ведення господарських операцій, що визначає необхідність диференційованих підходів до оцінки ризиків.

### Перспективи подальших досліджень

Подальші дослідження варто зосередити на вивченні накопичення важких металів у системі «ґрунт – рослина – продукція». Необхідно запровадити порівняльний аналіз чутливості різних сільськогосподарських культур та дикорослих представників флори до впливу певних металів із визначенням коефіцієнтів біоаккумуляції що дозволить кількісно охарактеризувати їх поглинальну здатність. Одночасно потрібно здійснити кількісну оцінку впливу гербіцидів суцільної дії, фунгіцидів та інсектицидів, а також мінеральних добрив на фонове забруднення ґрунтів важкими металами, оскільки саме агрохімічне навантаження є одним з ключових джерел надходження ксенобіотиків в агроценози. Важливо розробити прогностичні моделі накопичення рухомих форм металів у врожаї з урахуванням типу ґрунту, рівня антропогенного навантаження і кліматичних факторів, що дасть можливість оцінювати ризики на стадії планування виробництва. Важливо також удосконалювати системи агроекологічного моніторингу шляхом впровадження біоіндикаторів, геоінформаційних технологій і біохімічних маркерів стресу рослин. Актуальним напрямком є оцінка ефективності фіторе mediaційних і агротехнічних заходів, спрямованих на зниження біодоступності важких металів у ґрунті і обмеження їх надходження в сільськогосподарську продукцію.

### Література

1. Броннікова Л. І. Вплив засолення на склад хлорофілів у рослин тютюну, отриманих клітинною селекцією з іонами важких металів. *Наукові записки НДУ ім. М. Гоголя. Біологічні науки*. 2025. № 2. С. 33–42. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2025-bn-2-33-42>
2. Гусак О. Накопичення важких металів у зерні злакових культур за різного періоду вегетації в умовах зміни клімату. *Grundlagen der modernen wissenschaftlichen forschung : III International Scientific and Practical Conference, Zurich, Switzerland, 12. August 2022. Zurich, 2022. P. 100–101.* <https://doi.org/10.36074/logos-12.08.2022.28>
3. Мазур О. Гуцол Г. Інтенсивність накопичення важких металів у ґрунтах за вирощування олійних культур на різних фонах мінерального живлення. *Grail of science*. 2022. № 18–19. С. 137–139. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.26.08.2022.23>
4. Accumulation of heavy metals in blueberry (*Vaccinium myrtillus* L.) and dominant mosses (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.) as bioindicators of expressway influence on forest ecosystems / A. Warczyk [et al.]. *Atmosphere*. 2024. Vol. 15(8). Article number 971. <https://doi.org/10.3390/atmos15080971>
5. Al-Asadi Z. A. J., Al-Asadi W. M. T. Using the desert plant *Rhanterium epapposum* Oliv. as a bioindicator of heavy metal pollution in soils of Basra Governorate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1567(1). Article number 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1567/1/012005>.
6. Assessing selected cereals and quinoa as bioindicators and phytoextractors of heavy metals in soils contaminated with drill cutting waste / P. Khalili [et al.]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2024. Vol. 24. – P. 3631–3648. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01782-1>
7. Assessment of heavy metal contamination of agricultural soils in Poland using contamination indicators / P. Tomczyk [et al.]. *Ecological Indicators*. 2023. Vol. 156. Article number 111161. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111161>
8. *Bagarius bagarius* and *Eichhornia crassipes* as suitable bioindicators of heavy metal pollution, toxicity, and risk assessment / M. Mahamood [et al.]. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13(1). Article number 13:1824. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28313-9>
9. Bioindication for detecting environmental risks in agroecosystems contaminated with heavy metals / A. Lishchuk [et al.]. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24(8). P. 175–182. <https://doi.org/10.12911/22998993/166395>
10. Bioindicators / S. Sangwan [et al.]. *Environmental nexus approach*. CRC Press, 2024. P. 311–337.

<https://doi.org/10.1201/9781003408352-21>

11. Common weeds as heavy metal bioindicators: A new approach in biomonitoring / A. Cakaj [et al.]. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article number 6926. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34019-9>
12. Critical raw materials as potential emerging environmental contaminants: Distribution patterns, risks, and behaviour in floodplain soils contaminated by heavy metals / R. Kanianska [et al.]. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article number 9597. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36477-7>
13. Environmental persistence, bioaccumulation, and ecotoxicology of heavy metals / G. I. Edo [et al.]. *Chemistry and Ecology*. 2024. Vol. 40(3). P. 1–28. <https://doi.org/10.1080/02757540.2024.2306839>
14. Heavy metal contamination in agricultural soils: Environmental pollutants affecting crop health / A. Rashid [et al.]. *Agronomy*. 2023. Vol. 13(6). Article number 1521. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
15. Microbial diversity in intensively farmed lake sediments contaminated by heavy metals and identification of microbial taxa as bioindicators of environmental quality / M. Custodio [et al.]. *Scientific Reports*. 2022. – Vol. 12(1). Article number 80. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03949-7>
16. Mushrooms as bioindicators of environmental toxins / S. Ali [et al.]. *Mushroom magic*. CRC Press, 2024. P. 292–306. <https://doi.org/10.1201/9781003570257-18>
17. Nadgórska-Socha A. To be afraid or not to be afraid? Bioaccumulation, bioindication, and toxicity of heavy metals in plants in the light of field and laboratory studies / A. Nadgórska-Socha. *Narracje o Zagładzie*. 2021. Special issue. P. 225–253. <https://doi.org/10.31261/noz.2021.dhc.10>

## References

1. Bronnikova, L. I. (2025). Vplyv zasolenia na sklad khlorofiliv u roslyn tiutiunu, otrymanykh klitynnoiu selektsiieiu z ionamy vazhkykh metaliv [The effect of salinity on the composition of chlorophylls in tobacco plants obtained by cell selection with heavy metal ions], *Naukovi zapysky NDU im. M. Hoholia. Biologichni nauky – Scientific notes of the NDU named after M. Gogol. Biological sciences*, 2, 33–42. <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2025-bn-2-33-42> [In Ukrainian]
2. Husak, O. (2022). Nakopychennia vazhkykh metaliv u zerni zlakovykh kultur za riznoho periodu vechetatsii v umovakh zminy klimatu [Accumulation of heavy metals in cereal grains at different vegetation stages under climate change conditions], *Grundlagen der modernen wissenschaftlichen Forschung: III International Scientific and Practical Conference, Zurich, Switzerland*, pp. 100–101. <https://doi.org/10.36074/logos-12.08.2022.28> [In Ukrainian]
3. Mazur, O. and Hutsol, H. (2022). Intensyvni nakopychennia vazhkykh metaliv u gruntakh za vyroshchuvannia oliinykh kultur na riznykh fonakh mineralnoho zhyvlennia [Intensity of heavy metal accumulation in soils during oilseed crop cultivation under different mineral nutrition backgrounds], *Grail of Science*, 18–19, 137–139. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.26.08.2022.23> [In Ukrainian]
4. Warczyk, A. et al. (2024). Accumulation of heavy metals in blueberry (*Vaccinium myrtillus* L.) and dominant mosses (*Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt.) as bioindicators of expressway influence on forest ecosystems, *Atmosphere*, 15(8), 971. <https://doi.org/10.3390/atmos15080971>
5. Al-Asadi, Z. A. J. and Al-Asadi, W. M. T. (2025). Using the desert plant *Rhanterium epapposum* Oliv. as a bioindicator of heavy metal pollution in soils of Basra Governorate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1567(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1567/1/012005>
6. Khalili, P. et al. (2024). Assessing selected cereals and quinoa as bioindicators and phytoextractors of heavy metals in soils contaminated with drill cutting waste, *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 24, 3631–3648. <https://doi.org/10.1007/s42729-024-01782-1>
7. Tomezyk, P. et al. (2023). Assessment of heavy metal contamination of agricultural soils in Poland using contamination indicators, *Ecological Indicators*, 156, 111161. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111161>
8. Mahamood, M. et al. (2023). *Bagarius bagarius* and *Eichhornia crassipes* as suitable bioindicators of heavy metal pollution, toxicity, and risk assessment, *Scientific Reports*, 13(1), 13:1824. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28313-9>
9. Lishchuk, A. et al. (2023). Bioindication for detecting environmental risks in agrocenoses contaminated with heavy metals, *Journal of Ecological Engineering*, 24(8), 175–182. <https://doi.org/10.12911/22998993/166395>
10. Sangwan, S. et al. (2024). Bioindicators, *Environmental nexus approach*. CRC Press, 311–337. <https://doi.org/10.1201/9781003408352-21>
11. Cakaj, A. et al. (2024). 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. Kanianska, R. et al. (2023). Critical raw materials as potential emerging environmental contaminants: Distribution patterns, risks, and behaviour in floodplain soils contaminated by heavy metals, *Scientific Reports*, 13(1), 9597. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36477-7>
13. Edo, G. I. et al. (2024). Environmental persistence, bioaccumulation, and ecotoxicology of heavy metals, *Chemistry and Ecology*, 40(3), 1–28. <https://doi.org/10.1080/02757540.2024.2306839>
14. Rashid, A. et al. (2023). Heavy metal contamination in agricultural soils: Environmental pollutants affecting crop health, *Agronomy*, 13(6), 1521. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061521>
15. Custodio, M. et al. (2022). Microbial diversity in intensively farmed lake sediments contaminated by heavy metals and identification of microbial taxa as bioindicators of environmental quality, *Scientific Reports*, 12(1), 80. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03949-7>
16. Ali, S. et al. (2022). Mushrooms as bioindicators of environmental toxins. *Mushroom magic*. CRC Press, 292–306. <https://doi.org/10.1201/9781003570257-18>
17. Nadgórska-Socha, A. (2021). To be afraid or not to be afraid? Bioaccumulation, bioindication, and toxicity of heavy metals in plants in the light of field and laboratory studies, *Narracje o Zagładzie*, Special issue, 225–253. <https://doi.org/10.31261/noz.2021.dhc.10> [In Polish]