

Розділ 1

ЕКОЛОГІЯ

УДК 631.52:633.58:581.17

ІНТЕНСИВНІСТЬ НАКОПИЧЕННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ І МІКРОЕЛЕМЕНТІВ У ВЕГЕТАТИВНІЙ МАСІ БАВОВНИКУ, ВИРОЩЕНОГО НА СІРИХ ЛІСОВИХ ҐРУНТАХ ПРАВОБЕРЕЖНОГО ЛІСОСТЕПУ

С. Разанов^{1,2}, д. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-4883-2696

О. Алексєєв², к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0001-5807-4932

А. Разанова^{1,2}, доктор філософії з екології

ORCID ID: 0000-0002-3546-3692

²*Вінницький національний аграрний університет*

О. Бахмат, д. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-8015-1567

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

Т. Дацко¹, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-2957-1822

А. Дидів¹, к. с.-г. н.

ORCID ID: 0000-0002-4436-9008

¹*Львівський національний університет природокористування*

<https://doi.org/10.31734/agronomy2025.29.009>

Разанов С., Алексєєв О., Разанова А., Бахмат О., Дацко Т., Дидів А. Інтенсивність накопичення важких металів і мікроелементів у вегетативній масі бавовнику, вирощеного на сірих лісових ґрунтах Правобережного Лісостепу

Інтенсифікація рослинництва сприяє збільшенню обсягів виробництва, внаслідок чого посилюється техногенне навантаження на довкілля, зокрема на ґрунти, що негативно впливає на якість і безпеку рослинницької продукції. Однією з головних екологічних загроз є накопичення важких металів, надходження яких у ґрунти значно зросло внаслідок активного використання мінеральних добрив, пестицидів, промислових викидів, а також воєнної агресії росії проти України.

Досліджено інтенсивність накопичення важких металів (свинцю та кадмію) та мікроелементів (цинку і міді) у вегетативній масі бавовнику (*Gossypium L.*), вирощеного на сірих лісових ґрунтах Правобережного Лісостепу. Проаналізовано вміст зазначених елементів у ґрунті та рослинній масі. Визначено коефіцієнти накопичення важких металів з метою оцінки ефективності вирощування бавовнику сорту Дніпровський 5 для фітореємедіації забруднених територій.

Встановлено, що цинк найбільше нагромаджується у вегетативній масі бавовнику, що майже вчетверо більше, ніж мідь, і у вісім разів більше, ніж свинець. Досліджено, що мідь посідає друге місце за рівнем накопичення у вегетативній масі, що у 2,2 рази більше, ніж свинець, і у 21 разів більше, ніж кадмій. Виявлено, що концентрація кадмію у вегетативній масі з-поміж усіх досліджуваних важких металів була найнижча. За рівнем накопичення у надземній частині бавовнику важкі метали та мікроелементи розташувалися у такій зростаючій послідовності: кадмій → свинець → мідь → цинк.

На основі коефіцієнта накопичення (K_n) визначено високу здатність бавовнику до акумуляції міді ($K_n = 45,9$) та цинку ($K_n = 19,4$), що свідчить про його ефективність щодо фітореємедіації забруднених територій. Накопичення вегетативною масою свинцю ($K_n = 3,73$) та кадмію ($K_n = 4,57$) також підтверджує здатність рослини вилучати токсиканти з ґрунту.

Оцінено потенціал використання рослин бавовнику для очищення ґрунтів від забруднень важкими металами. Отримані результати можуть бути використані для розробки стратегій фітореємедіації та оцінки екологічної безпеки агроєкосистем.

Ключові слова: свинець, кадмій, цинк, мідь, коефіцієнт накопичення, бавовник, фітореємедіація.

Razanov S., Aliksieiev O., Razanova A., Bakhmat O., Datsko T., Dydiv A. Intensity of accumulation of heavy metals and trace elements in the vegetative mass of cotton grown on grey forest soils of the Right-Bank Forest-Steppe

The intensification of crop production leads to an increase in production volumes, which in turn raises the technogenic burden on the environment, particularly concerning soil quality and safety of crop products. A significant environmental threat is the accumulation of heavy metals, whose presence in soils has increased significantly due to the extensive use of mineral fertilizers, pesticides, industrial emissions, and the ongoing military aggression of Russia against Ukraine.

This article explores the accumulation of heavy metals (lead and cadmium) and trace elements (zinc and copper) in the vegetative mass of cotton (*Gossypium L.*) cultivated on the grey forest soils of the Right-Bank Forest-Steppe. The study involves an analysis of the concentrations of these elements in both soil and plant biomass, as well as determining accumulation coefficients of heavy metals to evaluate the efficacy of the Dniprovskiy 5 cotton variety for phytoremediation in contaminated areas.

The findings indicate that zinc is the most readily accumulated element within the cotton's vegetative mass, occurring nearly four times more than copper and eight times more than lead. Copper ranks second in terms of accumulation, being 2.2 times more than lead and 21 times more than cadmium. Notably, the concentration of cadmium in the vegetative mass is the lowest among all the heavy metals studied. In terms of accumulation levels in the aboveground parts of the cotton plant, the order of heavy metals and trace elements is arranged from lowest to highest as follows: cadmium → lead → copper → zinc.

Based on the accumulation coefficient (C_a), cotton has been found to have a high capacity for accumulating copper ($C_a = 45.9$) and zinc ($C_a = 19.4$), indicating its effectiveness in phytoremediation of contaminated areas. The accumulation of lead ($C_a = 3.73$) and cadmium ($C_a = 4.57$) in the vegetative mass also confirms the plant's ability to extract toxicants from the soil.

The potential of using cotton plants for soil remediation from heavy metal contamination has been assessed. The obtained results can be used for developing phytoremediation strategies and evaluating the environmental safety of agroecosystems.

Keywords: lead, cadmium, zinc, copper, accumulation coefficient, cotton plant, phytoremediation.

Постановка проблеми. Накопичення важких металів у ґрунтах сільськогосподарського призначення є однією з найважливіших екологічних проблем сучасності. Внаслідок антропогенного навантаження, зокрема інтенсивного застосування мінеральних добрив, пестицидів та промислових викидів, значні обсяги токсичних елементів потрапляють у навколишнє середовище. Це призводить до забруднення верхнього гумусового горизонту ґрунтів, зниження їхньої родючості та потрапляння токсикантів у харчовий ланцюг через рослинну продукцію [3].

Значну небезпеку у ґрунті становлять саме рухомі форми важких металів, які навіть при незначному перевищенні ГДК є токсичними для сільськогосподарських рослин, порушують більшість метаболічних процесів, пригнічують ріст, знижують урожай та його якість, а також здатні до інтенсивної транслокації, що зрештою створює значні ризики для здоров'я людини [4].

Катіони важких металів можуть адсорбуватися на ґрунтових частинках, зв'язуватися з органічними речовинами, осідати в гідроксидах заліза, входити до кристалічних решіток глинистих мінералів, перебувати у ґрунтових водах та нагромаджуватися ґрунтовою біотою. Рівень рухомості важких металів визначається геохімічними умовами та ступенем техногенного впливу на довкілля [10].

Одним із перспективних методів зменшення забруднення ґрунтів є використання фітореMediaції –

здатності рослин акумулювати токсичні елементи у своїй біомасі [1]. Важливою культурою, яка може бути ефективною у процесі очищення ґрунтів, є бавовник (*Gossypium L.*) [2]. Завдяки розвиненій кореневій системі та здатності до поглинання важких металів цю рослину можна використовувати як природний біофільтр, що сприяє зменшенню техногенного навантаження на агроecosистеми.

Однак питання ефективності накопичення важких металів у вегетативній масі бавовнику, вирощеного на сірих лісових ґрунтах Правобережного Лісостепу, недостатньо вивчене. Визначення рівня поглинання токсикантів, коефіцієнтів їхнього накопичення та потенційної ефективності культури у фітореMediaції – актуальне завдання, яке потребує додаткових наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема накопичення важких металів у сільськогосподарських ґрунтах привертає значну увагу науковців у всьому світі, зокрема й в Україні. Згідно з дослідженнями, рівень забруднення ґрунтів токсичними елементами суттєво залежить від інтенсивності землекористування, структури сівозмін та агротехнічних заходів. Чимало наукових праць присвячено оцінці впливу мінеральних добрив і засобів захисту рослин на баланс важких металів у ґрунтах та їхній міграції в агроecosистемах [4; 10; 19].

Особливу небезпеку серед токсикантів становлять свинець і кадмій. Свинець здебільшого

потрапляє в довкілля у вигляді газів, аерозолів, промислових стічних вод і має низьку рухливість, що сприяє його накопиченню в ґрунтах. Кадмій, навпаки, має високу здатність до міграції, легко переходить у доступні для рослин рухомі форми й накопичується в сільськогосподарській продукції [14; 16].

Джерелами надходження важких металів у ґрунти є атмосферні опади, мінеральні добрива, пестициди, а також природні процеси вивітрювання гірських порід. Частина цих елементів закріплюється в ґрунті завдяки сорбційним властивостям, що частково обмежує їхнє проникнення в рослинницьку продукцію [13]. Водночас воєнні дії внаслідок агресії росії проти України значно посилюють техногенне навантаження на агроєкосистеми, що додатково сприяє забрудненню ґрунтів важкими металами.

Окрім свинцю та кадмію, небезпеку становлять також ртуть, мідь і цинк. Хоча останні два елементи є важливими есенціальними мікроелементами для рослин, їхній надлишок у ґрунті може призводити до накопичення у врожаї понад допустимі норми, що небезпечно для здоров'я людини [9; 15].

Масштаби забруднення довкілля важкими металами невинно зростають, особливо в районах, прилеглих до підприємств кольорової та чорної металургії, виробництва мінеральних добрив та інших промислових центрів. Щороку в навколишнє середовище викидаються значні обсяги відходів, що містять токсичні сполуки. Інтенсивне накопичення цих політантів створює серйозні екологічні ризики, зокрема щодо безпечного використання ґрунтів у сільському господарстві [17].

Хоча в умовах інтенсивного землеробства значна частина важких металів виноситься з ґрунту разом з урожаєм сільськогосподарських культур, рівень їхнього накопичення все одно може залишатися високим. Це особливо небезпечно з огляду на те, що рослини у своїй вегетативній масі здатні накопичувати токсиканти у десятки, а іноді й у сотні разів більше, ніж їхній вміст у ґрунті.

Потреба у контролі та зниженні вмісту важких металів у ґрунтового середовищі надзвичайно важлива для мінімізації надходження токсикантів до організму людини через продукти харчування. Одним із ефективних заходів зменшення концентрації важких металів у ґрунтах є фітореMediaція – винесення токсичних елементів разом з урожаєм рослин, спроможних до їх накопичення [6; 12; 18].

Останніми роками, особливо на півдні України, у сільськогосподарській сівозміні запро-

ваджують вирощування бавовнику [7; 11]. Ця культура належить до родини мальвових і характерна кущистим стеблом заввишки до 1 м із частково здерев'янілою нижньою частиною [5; 11]. Враховуючи ці фактори, виникла потреба у вивченні інтенсивності накопичення важких металів у вегетативній масі бавовнику для оцінки його потенційного використання як фітореMediaнта.

Постановка завдання. Наше завдання – дослідити процес накопичення важких металів (свинцю та кадмію) і мікроелементів (цинку та міді) у вегетативній масі бавовнику на сірих лісових ґрунтах в умовах населеного пункту м. Гнівань (Тиврівський район Вінницької області).

Обробіток ґрунту під посіви бавовнику передбачав: зяблеву оранку на глибину 25–30 см, весняне боронування у два сліди, культивуацію. Бавовник сорту Дніпровський 5 висаджували у вигляді пророщеного насіння (розсадним способом). Вирощували культуру без внесення мінеральних добрив. Догляд за посівами передбачав лише боротьбу з бур'янами просапним способом. Розмір кожної дослідної ділянки становив 5 м².

ґрунт для визначення вмісту важких металів обирали методом конверта на глибині 22–24 см (глибина переорювання), із загальною масою зразка 0,5 кг. Вегетативну масу бавовнику відбирали у фазі технічної стиглості методом точкових проб. Маса відібраної проби становила 0,5 кг з кожної ділянки. Для забезпечення статистичної достовірності експерименту всі дослідження проводили у триразовій повторності. Всього відібрали дев'ять ґрунтових зразків (по три з кожної з трьох реплік) та дев'ять зразків вегетативної маси бавовнику. Отримані результати подано як середні арифметичні значення $\pm$ стандартне відхилення, що дозволяє оцінити варіабельність показників накопичення та підвищити надійність інтерпретації біоаккумуляційної здатності бавовнику.

Коефіцієнт накопичення (K_n) важких металів та мікроелементів у вегетативній масі бавовнику визначали за формулою:

$$K_{\text{накопичення}} = \frac{C_{\text{вегетативна маса}}}{C_{\text{ґрунту}}}$$

де $C_{\text{вегетативна маса}}$ – вміст досліджуваних елементів у вегетативній масі; $C_{\text{ґрунту}}$ – вміст досліджуваних елементів у ґрунті.

Варто зауважити, що якщо значення $K_n > 1$, це свідчить про високу здатність рослини до накопичення елемента, що важливо для фітореMediaції. Якщо $K_n < 1$, то рослина нагромаджує цей елемент у меншій концентрації, ніж він міститься у ґрунті [8].

Уміст важких металів та мікроелементів у ґрунті й вегетативній масі визначали атомно-адсорбційним методом згідно з ДСТУ 4117:2007 у лабораторії Інституту сільського господарства Полісся Національної академії аграрних наук України.

Виклад основного матеріалу. Аналіз результатів досліджень із вивчення вмісту важких металів та мікроелементів у сірому лісовому ґрунті (рис. 1) показав, що перевищення гранично допустимої концентрації (ГДК) рухомих форм свинцю, кадмію, цинку та міді не виявлено. Серед досліджуваних елементів найвищий вміст рухомих форм у ґрунті мав цинк (1,15 мг/кг), а найнижчий – кадмій (0,061 мг/кг). Вміст рухомих форм свинцю в ґрунті був нижчим за ГДК у 8,4 разів, кадмію – у 11,5, цинку – у 20, міді – у 23 рази.

Аналізуючи фактичну концентрацію важких металів і мікроелементів у надземній масі бавовнику (рис. 2), зауважимо, що цинк найбільше нагромаджувався у вегетативній масі – 22,36 мг/кг. Це майже вчетверо більше, ніж мідь (5,83 мг/кг), і у вісім разів більше, ніж свинець (2,66 мг/кг). Встановлено, що мідь посідає друге місце за рівнем накопичення – 5,83 мг/кг, що у 2,2 раза більше, ніж свинець, і у 21 раз більше, ніж кадмій. Виявлено, що концентрація кадмію у вегетативній масі з-поміж усіх досліджуваних важких металів була найнижча – 0,279 мг/кг, що у 80 разів менше, ніж концентрація цинку. На основі проведених досліджень встановлено, що за рівнем накопичення у надземній частині бавовнику важкі метали та мікроелементи розташувалися у такій зростаючій послідовності: кадмій → свинець → мідь → цинк.

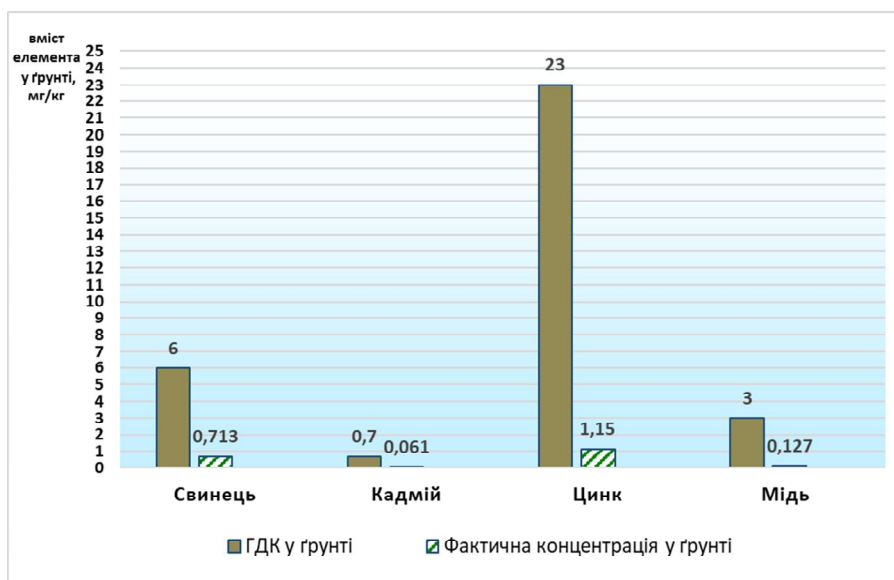


Рис. 1. Вміст рухомих форм важких металів та мікроелементів у сірому лісовому ґрунті, мг/кг

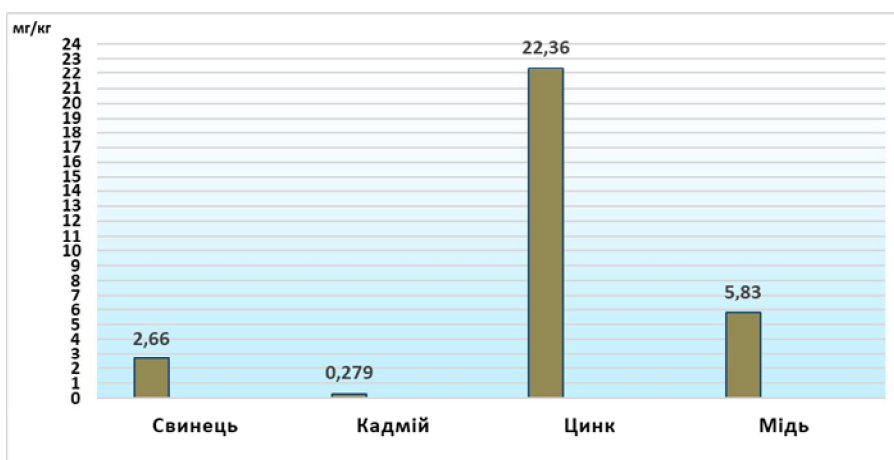


Рис. 2. Вміст важких металів та мікроелементів у надземній вегетативній масі бавовнику, мг/кг

Згідно з отриманими результатами бавовник у вегетативній масі найбільше накопичує цинк, що свідчить про його важливу біологічну роль як есенціального мікроелемента для рослин. Мідь також накопичується у значних кількостях, що підтверджує високу здатність бавовнику до фітореMediaції цього металу. Свинець і кадмій накопичуються значно менше, однак значення показника K_n вказує на здатність рослини ефективно вилучати їх із ґрунту. Особливо важливо, що навіть за низької концентрації металів у ґрунті рослина бавовнику здатна акумулювати значні кількості важких

металів у своїй біомасі, що підтверджує її ефективність для фітореMediaції (рис. 1).

Розраховані коефіцієнти накопичення важких металів та мікроелементів у надземній вегетативній масі бавовнику, вирощеного на сірих лісових ґрунтах Правобережного Лісостепу, окремо для кожного металу: свинець – 3,73, кадмій – 4,57, цинк – 19,4, та мідь – 45,9. Найвищий коефіцієнт накопичення міді, який у 12,3 рази перевищував коефіцієнт накопичення свинцю, у десять разів – коефіцієнт накопичення кадмію та у 2,36 рази – коефіцієнт накопичення цинку (табл.).

Таблиця

Коефіцієнт накопичення важких металів та мікроелементів надземною вегетативною масою бавовнику

Важкі метали та мікроелементи	Фактичний вміст у ґрунті, мг/кг	Фактичний вміст у надземній вегетативній масі, мг/кг	Коефіцієнт накопичення
Свинець	0,713	2,66±0,63	3,73
Кадмій	0,061	0,279±0,027	4,57
Цинк	1,15	22,36±1,03	19,4
Мідь	0,127	5,83±0,49	45,9

Примітка: Дані наведено як середнє ± стандартне відхилення на основі трьох повторів ($n = 3$)

Отже, послідовність величин коефіцієнтів накопичення важких металів у вегетативній масі бавовнику у порядку зростання така: свинець → кадмій → цинк → мідь.

Хоча концентрації важких металів у досліджуваному сірому лісовому ґрунті не перевищували ГДК, вибір саме цього типу ґрунту зумовлений кількома чинниками. По-перше, це дозволило оцінити фонову здатність бавовнику до акумуляції елементів в умовах без техногенного навантаження. По-друге, такий підхід дає змогу виявити базову біоаккумуляційну здатність культури, що є ключовою для обґрунтування її потенційного використання як фітореMediaнта у майбутніх експериментах на забруднених ґрунтах. По-третє, враховуючи сучасні військові ризики для агроландшафтів, важливо мати чітке уявлення про фітореMediaційний потенціал культур ще до надходження токсикантів у критичних концентраціях. Отже, результати можуть бути використані як референтні для планування та моніторингу стану ґрунтів у відновлювальний період.

Висновки. Отримані результати свідчать, що вміст рухомих форм важких металів у досліджуваних сірих лісових ґрунтах не перевищував гранично допустиму концентрацію, що вказує на

їхню відносну екологічну безпеку. Встановлено, що найвищу концентрацію рухомих форм серед досліджуваних елементів у ґрунті відзначено у цинку (1,15 мг/кг), тоді як найнижчу – у кадмію (0,061 мг/кг). Бавовник сорту Дніпровський 5 показав високу здатність до накопичення важких металів з ґрунту, особливо цинку (22,36 мг/кг) та міді (5,83 мг/кг). Так, високі значення коефіцієнтів накопичення для міді (45,9) та цинку (19,4) свідчать про значну ефективність цієї культури у фітореMediaції.

Зазначимо, що свинець ($K_n = 3,73$) та кадмій ($K_n = 4,57$) також активно поглиналися рослиною бавовнику, хоча їхній вміст у вегетативній масі був нижчим. Отже, навіть при низьких початкових концентраціях важких металів у ґрунті бавовник здатний акумулювати їх у значних кількостях у своїй вегетативній масі. Це підтверджує можливість використання бавовнику для очищення забруднених територій важкими металами.

Подальші дослідження щодо накопичення важких металів рослинами бавовнику та їхньої фітореMediaційної ефективності надзвичайно важливі через зростання антропогенного впливу на агроєкосистеми. Особливо необхідно розширити дослідження біоаккумуляційних властивостей різних сортів бавовнику, що дозволить виявити най-

більш ефективні для застосування в системах біологічного очищення ґрунтів.

Крім того, важливим напрямком є дослідження впливу агротехнічних методів і умов вирощування на здатність рослин бавовнику поглинати важкі метали, що допоможе розробити оптимальні технології для землеробства на забруднених землях. Результати таких досліджень сприятимуть формуванню науково обґрунтованих рекомендацій для інтеграції бавовнику в систему екологічно безпечного землекористування та відновлення деградованих ґрунтів, пошкоджених унаслідок воєнних дій.

Бібліографічний список

1. Борецька І. Ю., Джура Н. М., Романюк О. І. ФітореMediaція техногенно забруднених ґрунтів з використанням енергетичних культур. *Екологічні науки*. 2021. № 6. С. 72–76. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.6-39.11>
2. Боровик В. О., Степанов Ю. О. Історичний шлях розвитку селекції бавовнику в Інституті зрошуваного землеробства. *Зрошуване землеробство*. 2014. Вип. 62. С. 95–98.
3. Брайнінгер О. І. Особливості транслокації та акумуляції важких металів у системі «ґрунт–рослина–сільськогосподарська продукція». *Таврійський науковий вісник*. 2022. Вип. 123. С. 225–231. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2022.123.31>
4. Вдовенко С. А., Гетман Н. Я., Дідур І. М. Інтенсивність накопичення розторопшею плямистою свинцю та кадмію на різних ґрунтах. *Агробіологія*. 2021. № 2. С. 15–21. <https://doi.org/10.33245/2310-9270-2021-167-2-15-21>
5. Вожегова Р. А. Особливості тривалості періоду вегетації зразків генофонду бавовнику *Gossypium hirsutum* L. в умовах Південного Степу України. *Аграрні інновації*. 2022. № 12. С. 85–89. <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2022.12.13>
6. Гирля Л. М. ФітореMediaція – ефективний шлях зниження вмісту важких металів у ґрунтах. *Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія»*. Серія: Екологія. 2011. Т. 152. Вип. 140. С. 57–59.
7. Гусарова А. Одеське господарство розраховує отримати перший урожай бавовнику на зрошенні на рівні 2,5–3 т/га. *SuperAgronom*. 2024. URL: <https://superagronom.com/news/19108-odeske-gospodarstvo-rozrahovuye-otrimati-pershiy-urojay-bavovniku-na-zroshenni-na-rivni-25-3-t-ga> (дата звернення: 04.02.2025).
8. Денчиля-Сакаль Г. М., Ніколайчук В. І., Колесник А. В., Вакерич М. М., Ткач О. П. Особливості акумуляції важких металів в рослинах *Trifolium pratense* L. *Науковий вісник Ужгородського університету*. Серія: Біологія. 2012. Вип. 33. С. 189–191.
9. Єгорова Т. М., Сапсай Т. П. Особливості формування дисбалансу цинку у біогеохімічних ланцюгах агроландшафтів України. *Таврійський науковий вісник*. 2016. Вип. 96. С. 197–204.
10. Мислива Т. М. Свинець і кадмій у ґрунтах агроландшафтів Житомирського Полісся. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2013. Вип. 3. С. 43–50.
11. Немоловська Т., Сніговий В., Орлюк А. Перспективи вирощування бавовнику на Півдні України. *Пропозиція*. 2008. URL: <https://propozitsiya.com/ua/perspektivi-viroshchuvannya-bavovniku-na-pivdni-ukrayini> (дата звернення: 03.02.2025).
12. Самохвалова В. Л. Біологічні методи ремедіації ґрунтів, забруднених важкими металами. *Біологічні студії*. 2014. Т. 8. № 1. С. 217–236.
13. Снітинський В. В., Ткачук О. П., Разанова А. М., Коруняк О. П. Ефективність фітореMediaції забрудненого важкими металами ґрунту за вирощування розторопші плямистої. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 1. С. 164–171. <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-1-11>
14. Ткачук О. П., Разанова А. М. Інтенсивність накопичення Pb у листовій масі та насінні розторопші плямистої (*Silybum Marianum*). *Вісник Уманського національного університету садівництва*. 2020. № 1. С. 109–112. <https://doi.org/10.31395/2310-0478-2020-1-109-112>
15. Ткачук О. П., Разанова А. М. Порівняльна оцінка накопичення Zn розторопшею плямистою (*Silybum Marianum*) залежно від виду мінеральних добрив. *Агроекологічний журнал*. 2020. № 1. С. 98–103. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2020.201278>
16. Chorna V. I., Voroshylova N. V., Syrovatko V. A. Cadmium distribution in soils of Dnipropetrovsk oblast and its accumulation in crop production. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. № 8 (1). P. 910–917. https://doi.org/10.15421/2018_293
17. Dursun S., Symochko L., Mankolli H. Bioremediation of heavy metals from soil: an overview of principles and criteria of using. *Агроекологічний журнал*. 2020. № 3. P. 6–12. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2020.211521>
18. Herlina L., Widianarko B., Purnaweni H., Sudarno S., Sunoko H. Phytoremediation of Lead Contaminated Soil Using Croton (*Cordiaecum variegatum*) Plants. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. № 21 (5). P. 107–113. <https://doi.org/10.12911/22998993/122238>
19. Razanov S. F., Tkachuk O. P., Razanova A. M., Bakhmat M. I., Bakhmat O. M. Intensity of heavy metal accumulation in plants of *Silybum marianum* L. in conditions of field rotation. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. № 10 (2). P. 131–136. https://doi.org/10.15421/2020_75

Стаття надійшла 10.02.2025