

МОНІТОРИНГ І ЕКОТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА РИЗИКІВ ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТІВ, УРАЖЕНИХ ВІЙСЬКОВИМИ ДІЯМИ

Гребенюк Т. В., Федченко Є. П., Ремез Н. С., Броницький В. О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Берестейський, 37, 03056, м. Київ

t.hrebeniuk07@gmail.com, lizafeda@gmail.com,

nataly.remez@gmail.com, vadim.bronytskyi@gmail.com

У статті висвітлено результати комплексної екотоксикологічної оцінки ґрунтів, уражених військовими діями, із використанням ростового фітотесту на культурі крес-салату (*Lepidium sativum*). Актуальність дослідження зумовлена масштабним забрудненням прифронтових територій України, де значні площі орних земель піддаються впливу вибухів боєприпасів, важких металів та продуктів детонації. З огляду на те, що понад 150 тис. км² території країни є замінованими або такими, що зазнали артилерійських чи дронівих ударів, особливої ваги набуває оперативна оцінка стану ґрунтів, які потенційно можуть бути повернуті до сільськогосподарського використання. Метою роботи стало визначення рівня фітотоксичності ґрунту, відібраного на місці вибуху вибухонебезпечного предмета, шляхом порівняння ростових показників рослин із контрольною пробєю з умовно чистої ділянки. Біотестування передбачало аналіз довжини пагонів і коренів, частки пророслого насіння та морфологічних відхилень. Виявлено різке пригнічення росту рослин у забруднених зразках: зменшення довжини пагонів, відсутність розвитку кореневої системи, зниження енергії проростання та погіршення життєздатності сходів. Розраховані показники фітотоксичного ефекту, дисперсії та достовірності відмінностей за критерієм Стюдента підтверджують суттєвий токсичний вплив, імовірно пов'язаний із накопиченням свинцю, міді, цинку та інших полівалентних металів, характерних для зон бойових дій. Отримані результати мають важливе практичне значення для системного моніторингу забруднених територій, а також для формування науково обґрунтованих рекомендацій щодо екологічно безпечного використання таких земель і планування заходів післявоєнного відновлення агроландшафтів. *Ключові слова:* моніторинг, сільськогосподарські угіддя, вибухонебезпечні предмети, вибухові кратери, фітотестування, екотоксикологія.

Monitoring and ecotoxicological assessment of the risks of soil degradation affected by military actions. Hrebeniuk T., Fedchenko Ye., Remez N., Bronytskyi V.

The article highlights the results of a comprehensive ecotoxicological assessment of soils affected by military operations using a growth phytotest on watercress (*Lepidium sativum*). The relevance of the study is due to the large-scale contamination of front-line territories of Ukraine, where significant areas of arable land are exposed to explosions of ammunition, heavy metals and detonation products. Given that more than 150 thousand km² of the country's territory are mined or have been subjected to artillery or drone strikes, an operational assessment of the condition of soils that can potentially be returned to agricultural use is of particular importance. The aim of the work was to determine the level of phytotoxicity of soil taken at the site of an explosive object explosion by comparing plant growth indicators with a control sample from a conditionally clean area. Biotesting included analysis of the length of shoots and roots, the proportion of germinated seeds and morphological deviations. A sharp inhibition of plant growth was detected in contaminated samples: a decrease in shoot length, lack of root system development, a decrease in germination energy and a deterioration in seedling viability. The calculated indicators of the phytotoxic effect, dispersion and reliability of differences according to the Student criterion confirm a significant toxic effect, presumably associated with the accumulation of lead, copper, zinc and other polyvalent metals characteristic of combat zones. The results obtained are of important practical importance for the systematic monitoring of contaminated areas, as well as for the formation of scientifically based recommendations for the environmentally safe use of such lands and planning of post-war restoration measures of agricultural landscapes. *Key words:* monitoring, agricultural lands, explosive objects, explosion craters, phytotesting, ecotoxicology.

Постановка проблеми. Беручи до уваги, що 70 % площі України складали сільськогосподарські угіддя [1] постає надзвичайно важливе питання моніторингу якості ґрунтів та продукції, вирощеної на уражених внаслідок військових дій ділянках.

Найбільший вплив на сільськогосподарські угіддя здійснюється на прифронтових територіях, адже

щільність вибухових кратерів з часом тільки зростає, оскільки регулярно ведуться обстріли різними типами зброї з різним калібром та хімічним складом [2]. Також точково страждають ґрунти по всій території України внаслідок влучань далекобійних ракет і дронів.

Основними полютантами, що потрапили у довкілля внаслідок військових дій, які несуть небезпеку як для

навколишнього середовища, так і для безпеки населення, є переважно важкі метали та нафтопродукти. Власники сільськогосподарських угідь якомога швидше прагнуть повернути території до безпечного використання, тому необхідно забезпечити детальне дослідження уражених ділянок для комплексної розробки стратегій їх відновлення з метою приведення якості ґрунтів до безпечного рівня.

Актуальність дослідження. Активні бойові дії та ураження прифронтових територій ведуться в регіонах східного, південно-східного та південного напрямках. Відомо, що саме в степовій зоні України, яка якраз припадає на схід та південь країни, найбільші площі орних земель, що пов'язано із перевагою чорноземів. Саме в цих областях найбільше застосовується стратегічне мінування територій. Згідно з даними Державної служби з надзвичайних ситуацій України близько 156 000 км² території України станом на 2024 рік було заміновано. Часто для забезпечення максимальної оперативності або у специфічних випадках розмінування відбувається на місці знаходження вибухонебезпечного предмету шляхом контролюваного підризу оператором з використанням снаряду з відомими характеристиками і складом. Окрім ВНП призначених для мінування, частим явищем є ураження сільськогосподарських полів артилерією чи дронами. Через такі випадки створюється негативний вплив на ґрунтовий покрив, що особливо небезпечно в зонах вирощування сільськогосподарської продукції. Актуальність дослідження полягає в оцінці стану та безпеки уражених ґрунтів в Україні.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторське дослідження спрямоване на вирішення нагальної проблеми – оцінку фітотоксичності ґрунтів, забруднених унаслідок бойових дій, що має ключове значення для забезпечення екологічної безпеки й повернення сільськогосподарських угідь до безпечного використання. Робота поєднує сучасні наукові підходи з практичними потребами післявоєнного відновлення територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Війна в Україні спричинила масштабну екологічну катастрофу, що підтверджено науковими дослідженнями [3, 4]. Військові дії призводять до хімічного забруднення ґрунтового покриву, де ключовими забруднювачами є важкі метали, зокрема свинець, мідь, кадмій, хром, нікель та цинк [3]. Дослідження сільськогосподарських земель в зоні бойових дій показали значне перевищення фонових рівнів валового вмісту свинцю, марганцю, міді та цинку [4, 5]. Ці важкі метали є надзвичайно токсичними та полівалентними, а також вони добре сорбуються ґрунтами, що сприяє їх накопиченню та довготривалому токсичному впливу на живі організми, серед яких і сільськогосподарські культури [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. На разі переважна більшість досліджень наслідків війни на природне навколишнє середовище стосується визначення хімічного та фізичного впливу військових дій на окремі компоненти довкілля. В контексті впливу забруднюючих елементів, наявних у ґрунті, на розвиток рослин необхідно дослідити їх екотоксикологічні ефекти.

Новизна. Дослідження забрудненого внаслідок детонації вибухо-небезпечного предмету ґрунту за допомогою фітотестування дозволить оцінити рівень фітотоксичності аналізованого зразка. Такого роду дослідження необхідні для формування комплексної оцінки негативного впливу та подальшого формування стратегій відновлення уражених ділянок.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дане дослідження необхідне для визначення токсичного впливу на рослини в умовах забруднення спричиненого військовими діями.

Викладення основного матеріалу.

Методи та інструменти. В дослідженні було використано методику оцінки токсичності ґрунтів за допомогою ростового тесту відповідно до методичних рекомендацій «Біоіндикація та біотестування забруднених територій» [6].

Суть методу полягає в спостереженні за ростом тест-культури в забрудненому середовищі в порівнянні із ростом тієї самої тест-культури в контрольному середовищі, яке в даному випадку було ґрунтом відібраним на потенційно екологічно чистій ділянці, а саме в екопарку «Осокорки» (координати: 50°22'23.1"N 30°37'51.1"E). Відбір зразків для контрольної проби також здійснювався методом конверту.

Згідно методики дослід проводився у трьох повторностях – з трьома паралельними зразками відібраної після вибуху ВНП проби.

Для підготовки зразків до фітотесту було взято 210, 7 г досліджуваного ґрунту, висушено протягом 5 годин до сталої маси 200,4 г та зволожено до рівня вологості 26,88 %.

Готовий субстрат було рознесено по 3 експериментальним ємностям з наступними масами:

Проба № 1: $m_1 = 52,51$ г;

Проба № 2: $m_2 = 50,85$ г;

Проба № 3: $m_3 = 52,22$ г.

В контрольному субстраті аналогічним методом було досягнуто вологості 27 %. Маса субстрату у контрольній пробі складала:

Проба № 4: $m_4 = 47,05$ г.

Підготовані субстрати було поміщено в експериментальні ємності, а саме у чисті пластикові стакани, та було висіяно по 15 здорових однакових за зовнішніми ознаками насінин тест-культури. Перші 3 доби ємності були покриті склом та провітрювались по 3 рази на день протягом 15 хв.

На 4 добу досліджувані зразки було переміщено на підвіконня, де було забезпечено близько 10 годин

природного освітлення. Оскільки відповідно до методики вимагається 14 годин постійного освітлення, що неможливо досягти природнім світлом в осінню пору року, було використано фітолампку для освітлення 4–5 год/добу.

В таких умовах зразки було витримано протягом 2 повних тижнів із фіксацією таких показників: сходи рослин та їх кількість (щодобово); наземну довжину паростків та їх приріст щодоби; характерні зміни та видимі фітотоксичні ефекти (пожовтіння, потоншення пагонів, в'ялість, смерть); загальну кількість пророслих насінин наприкінці експерименту.

Останнім днем експерименту було 27 жовтня 2025 року: було записано останні спостереження, паростки з усіх проб було обережно вилучено разом із корінням для вимірювання довжини пагону, паростку та коріння.

Після збору всіх необхідних даних було здійснено обробку результатів ростового тесту.

Середню довжину надземної та кореневої частин $x \pm m$, де m – це помилка середнього арифметичного, яку визначають за наступною формулою:

$$m_{\text{помилка}} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}}, \quad (1)$$

де N – кількість результатів, σ^2 – дисперсія, яку визначають за формулою:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2}{N}; \quad (2)$$

де x – значення показника (обраного біопараметра); $\bar{x}$ – середнє арифметичне значення показника в досліджуваному варіанті.

Достовірність різниці середніх арифметичних t розраховується за критерієм Стюдента Фішера:

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}; \quad (3)$$

де $\bar{x}_1$ – середнє арифметичне значення показника в контрольному зразку;

$\bar{x}_2$ – середнє арифметичне значення показника у забрудненому зразку;

m_1 – помилка середнього арифметичного в контрольному зразку;

m_2 – помилка середнього арифметичного в забрудненому зразку.

Фітотоксичний ефект визначається у відсотках за певним біопараметром: в даному досліді біопараметрами були середні по ємності висоти паростків, довжини коренів та сухі маси рослин. Фітотоксичний ефект визначається за наступною формулою:

$$\Phi E = \frac{M_0 - M_x}{M_0} \cdot 100, \% \quad (4)$$

де M_0 – значення певного біопараметра у посуді з контрольним зразком;

M_x – значення цього ж біопараметра у посуді із досліджуваним (забрудненим) зразком.

Експеримент. Підготовлений зразок аналізованого ґрунту має світло-каштановий колір, маслянисту текстуру при вологості 27 % та специфічний стійкий запах, що нагадує запах палених нігтів. Контрольний субстрат має чорно-коричневий колір, його загальна маса складається переважно з пухких грудочок.

Для кожного зразка для посіву було обрано по 15 здорових насінин крес-салату широколистого (*Lepidium sativum*) однакових за розміром, кольором та твердістю. Для посіву використовувались чисті пластикові стаканчики. Посів було проведено 9 жовтня 2025 року.

Було помічено, що неприємний запах з проб ґрунту, що був уражений, став більш концентрованим і утримувався до кінця експерименту. В контрольній пробі зафіксовано запах нормального ґрунту.

Проби із ураженим ґрунтом промарковані номерами 1, 2 і 3; контрольний субстрат позначений пробою номер 4.

На рис. 1 зображено чотири досліджувані проби в останній день експерименту 27 жовтня 2025 року в послідовності проб № 1–4 зліва направо.

Протягом експерименту в пробах № 1–3 спостерігався інтенсивний ріст рослин та їх швидке відмирання. Близько 15 % насінин мали нездоровий вигляд та з рештою відмирили навіть не пустивши перші паростки, що спричинено впливом важких металів.

З рисунку 1 бачимо, що приріст здорової зеленої маси найбільший в контрольному субстраті № 4, в той час як у пробах № 1–3 паростки мають нездоровий вигляд та значно поступаються у кількості.

Окремим важливим спостереженням є відмінність розвитку кореневої системи у пробах № 1–3 та пробі № 4, що показано на рисунках 2 та 3.

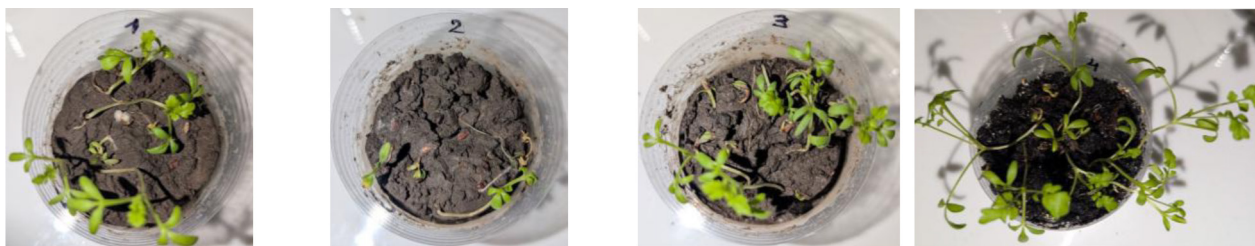


Рис. 1. Фотофіксація досліджуваних зразків в останній день фітотестування



Рис. 2. Коріння паростка з проби № 1



Рис. 3. Коріння паростка з проби № 4

З рисунків бачимо, що розгалуження кореневої системи характерно для кореню рослини з проби № 4, в той час як у рослини з проби № 1 бічне коріння зовсім відсутнє. Інгібування розвитку бічних коренів потенційно спричинене токсичним впливом важких металів [7, 8].

Таблиця із загальними даними, які необхідні для оцінки фітотоксичного ефекту, а саме загальні довжини паростків у пробі, довжини пагонів та довжини коренів, наведені у таблиці 1.

Для додаткової візуалізації динаміки росту рослин на рис. 4 наведено кількості паростків у кожній пробі в певний день.

З рисунку бачимо, що стабільний приріст біомаси характерний для проби № 4, в той час як для рослин, що були висаджені в уражений ґрунт, чітко проглядається смертність серед паростків. Найбільша смертність згідно з графіком характерна для проби № 2.

Для кожного експериментального зразка було розраховано дисперсію σ^2 за формулою 2, помилку середнього арифметичного за формулою 1 та достовірність різниці середніх арифметичних t за критерієм Стюдента Фішера за формулою 3. Даний розрахунок проводився за висотою паростків та довжиною коріння у кожній експериментальній ємності. Отримані результати наведені у таблиці 2.

Всі розраховані значення $t > t_{st}(\infty; 0,05) = 1,96$, що свідчить про достовірну відмінність від контрольного результату. Однак для проби № 3 за довжиною кореня $t = 1,7257$, що нижче за критичне значення 1,96 при рівні значущості 0,05. Це свідчить про статистично незначущу різницю між досліджуваним біопараметром в забрудненій та контрольній пробі. Проте спостерігалось біологічне пригнічення проростання, що вказує на можливу токсичну дію зразка ґрунту, не підтверджену статистично через малу кількість повторів та доволі високу варіабельність результатів.

Фітотоксичний ефект було розраховано за трьома біопараметрами (за висотою, за довжиною кореню, за сухою масою) за формулою 4. Результати наведені у таблиці нижче.

В порівнянні бачимо, що результати фітотестів проведених в ураженому субстраті надзвичайно високі, що свідчить про неминучий негативний вплив бойових дій. Питання такого значного забруднення вимагає термінового реагування задля уникнення подальшого розповсюдження поллютантів.

Головні висновки. Отже уражені війною ґрунти виявляють високий рівень фітотоксичності, що впливає на проростання, ріст і життєздатність рослин. Причиною токсичності є забруднення важкими металами та продуктами детонації ВВП. Фітотестування є ефективним методом оцінки екоотоксичності ґрунтів на забруднених територіях. Дані свідчать про необхідність постійного моніторингу та реабілітації ґрунтів до їх повторного сільськогосподарського використання.

Таблиця 1

Результати фітотестування

	Проба № 1			Проба № 2			Проба № 3			Контроль № 4		
№ паростку	Висота рослин, Н, мм	Довжина кореню, І, мм	Висота пагону, h, мм	Висота рослин, мм	Довжина кореню, мм	Висота пагону, h, мм	Висота рослин, мм	Довжина кореню, мм	Висота пагону, h, мм	Висота рослин, мм	Довжина кореню, мм	Висота пагону, h, мм
$\bar{x}$	9,17	6,97	13,75	3,47	1,87	11,00	11,57	10,00	14,14	19,60	14,33	14,33
Суша маса паростків												
m, г	0,0217			0,0085			0,0352			0,053		

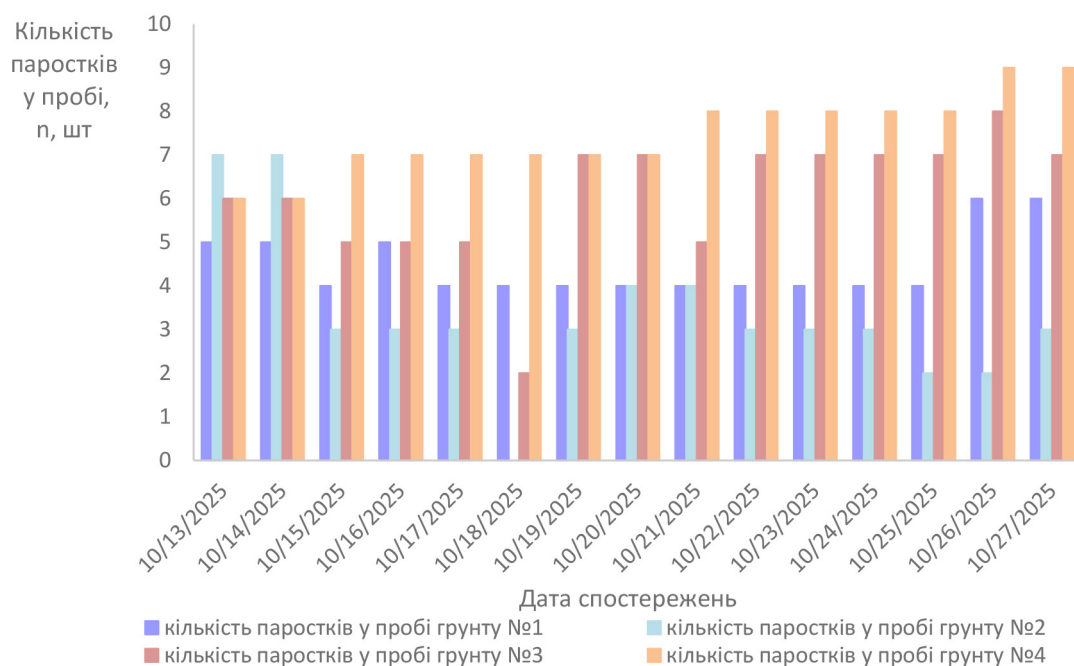


Рис. 4. Динаміка зміни кількості паростків у кожній пробі протягом експерименту в період з 13 по 27 жовтня

Таблиця 2

Результати розрахунку параметрів для оцінки ступеня фітотоксичності

№ проби	Показник	Дисперсія, σ^2	Середнє $\bar{x} + m$	t-критерій		
1	Висота паростків	184,789	$9,17 \pm 3,51$	3,6105	$m_1 =$	3,509880234
	Довжина коріння	135,082	$6,97 \pm 3,00$	2,9274	$m_2 =$	3,000913441
2	Висота паростків	61,716	$3,47 \pm 2,03$	6,1557	$m_3 =$	2,028391079
	Довжина коріння	24,916	$1,87 \pm 1,29$	5,7998	$m_4 =$	1,288812258
3	Висота паростків	154,622	$11,57 \pm 3,21$	2,8295	$m_5 =$	3,210625782
	Довжина коріння	132,667	$10,00 \pm 2,97$	1,7257	$m_6 =$	2,97396107
4	Висота паростків	351,440	$19,60 \pm 4,84$	—	$m_7 =$	4,84038566
	Довжина коріння	166,489	$14,33 \pm 3,33$	—	$m_8 =$	3,331555081

Таблиця 3

Результати розрахунку фітотоксичних ефектів за окерними біопараметрами.

Біопараметр / №проби	№ 1	№ 2	№ 3
ФЕ1 (за висотою рослин)	53,23129	82,31	40,9621
ФЕ2 (за довжиною кореню)	51,39535	86,98	30,23256
ФЕ3 (за сухою масою)	59,0566	83,96	33,58491
ФЕ сер, %	54,56108	84,42	34,92652

Поєднання біоіндикаційних методів і статистичного аналізу дозволяє обґрунтовано оцінити ризики та розробити відновлювальні заходи.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані дані можуть бути використані для оцінки екологічної безпеки земель, планування заходів рекультивації та прийняття рішень щодо доцільності сільськогосподарського використання

уражених територій. Фітотестування може стати інструментом моніторингу відновлення ґрунтів та основою для розробки екологічних стратегій. Результати також важливі для наукового обґрунтування заходів щодо мінімізації ризиків для довкілля й здоров'я населення, а також можуть бути застосовані в екологічних програмах, включаючи міжнародні ініціативи з відновлення довкілля.

Література

1. Strategy for improving the management mechanism in the field of use and protection of state-owned agricultural land and disposal thereof, approved by Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 413 of 7 June 2017. 2017.
2. Norenko K., Voytsikhovska A. Military conflict in Eastern Ukraine. 2015. P. 104–114.
3. Гуліч М. П., Харченко О. О., Ємченко Н. Л., Ольшевська О. Д., Любларська Л. С. Війна в Україні: проблема забруднення важкими металами сільськогосподарських угідь та продукції (аналіз літературних даних). *Environment & Health*. 2024. № 4. С. 614–635. DOI: <https://doi.org/10.32402/dovkil2024.04.038>
4. Зайцев Ю. О., Грищенко О. М., Романова С. А., Зайцева І. О. Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського районів Сумської обл. *Agroecological Journal*. 2022. № 3. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>
5. Splodytel A., Holubtsov O., Chumachenko S., Sorokina L., The impact of Russia's war against Ukraine on the state of the country's soil . Analysis results, Ecoaction, p. 14-20. 2023. URL: <https://greendealukraina.org/assets/images/literature/29-impact-on-soil-russian-war.pdf>
6. Лисиця А. В. Біоіндикація і біотестування забруднених територій : метод. рекомендації до практич. робіт для студентів напряму підготовки 101 – «Екологія» Міністерство освіти і науки України, Рівнен. держ. гуманітар. ун-т. Рівне : Дока-центр, 2018. 77 с.
7. Collin S., Baskar A., Geevarghese D. M., Vellala Syed Ali M. N., Bahubali P., Choudhary R., Lvov V., Tovar G. I., Senatov F., Koppala S., Swamiappan S. Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects in plants: A review. *Journal of Hazardous Materials Letters*. 2022. Vol. 3. Article 100064. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2022.100064>
8. Haider F. U., Cai L., Coulter J. A., Cheema S. A., Wu J., Zhang R., Ma W., Farooq M. Cadmium toxicity in plants: Impacts and remediation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 211. Article 111887. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111887>

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 15.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025