УДК 504.05:631.4:631.95:546.3/.9:581.1
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.26

ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ АГРОЕКОСИСТЕМ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

Кучеренко В.А. (orcid.org/0009-0004-2371-8135)
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, Умань
farro.vladimir.kucherenko@gmail.com

У статті висвітлено результати комплексного екологічного оцінювання та детального моніторингу просторового розподілу рухомих форм свинцю, кадмію та цинку в орному шарі чорноземів типових Правобережного Лісостепу України під впливом техногенного навантаження транспортної інфраструктури Вінницької області. Науково обґрунтовано вибір локацій дослідження, безпосередньо прилеглих до автомагістралей з високою інтенсивністю руху, що дозволило простежити закономірності міграції пріоритетних токсикантів у системі «транспортна магістраль – ґрунт – рослина». Експериментально доведено, що найбільший рівень акумуляції важких металів формується в –імпактній зоні на відстані 10 метрів від полотна дороги, де концентрація рухомого цинку перевищує гранично допустиму норму і досягає 24,50 мг/кг, а вміст свинцю та кадмію наближається до критичної межі, становлячи 4,82 мг/кг та 0,61 мг/кг відповідно. У міру віддалення від джерела емісії вглиб агроценозу зафіксовано стрімке згасання техногенного тиску: вже на відстані 50 метрів вміст елементів знижується суттєво нижче ГДК, а на відстані 500 метрів стабілізується на рівні природного геохімічного фону території, що дає змогу чітко детермінувати межі придорожньої буферної зони.

Важливою складовою роботи є дослідження транслокаційного потенціалу важких металів у системі «ґрунт – рослина» на прикладі стратегічної продовольчої культури – пшениці озимої. Виявлено виражену вибірковість накопичення та поорганного розподілу токсикантів у вегетативних і генеративних органах рослин. На основі розрахункових коефіцієнтів накопичення та переходу експериментально підтверджено ефективне функціонування природних фізіологічних бар'єрних систем озимої пшениці, які лімітують надходження ультратоксикантів до репродуктивних органів, депонуючи основну масу абсорбованих свинцю, кадмію та цинку в соломі. Встановлено, що найбільшу рухливість демонструє кадмій, тоді як свинець характеризується мінімальним коефіцієнтом переходу в зерно, що свідчить про надійну роботу кореневих та стеблових бар'єрів пшениці за умов поліметалевого навантаження. *Ключові слова:* важкі метали, свинець, кадмій, цинк, чорноземи типові, пшениця озима, транслокація, бар'єрний ефект, агроекосистема.

Assessment of Technogenic Pollution of Agroecosystems by Heavy Metals. Kucherenko V.

The article presents the results of a comprehensive ecological assessment and detailed monitoring of the spatial distribution of mobile forms of lead, cadmium, and zinc in the arable layer of typical chernozems in the Right-Bank Forest-Steppe of Ukraine under the impact of technogenic load from the transport infrastructure of Vinnytsia region. The selection of research locations directly adjacent to highways with high traffic intensity is scientifically substantiated, which allowed tracing the migration patterns of priority toxic elements in the "highway – soil – plant" system. It was experimentally proven that the highest level of heavy metal accumulation is formed in the impact zone at a distance of 10 meters from the road edge, where the concentration of mobile zinc exceeds the maximum permissible level and reaches 24.50 mg/kg, while the content of lead and cadmium approaches the critical limit, amounting to 4.82 mg/kg and 0.61 mg/kg, respectively. With distance from the emission source deeper into the agrocoenosis, a rapid decline in technogenic pressure was recorded: already at a distance of 50 meters, the content of elements decreases significantly below the maximum permissible concentration, and at a distance of 500 meters, it stabilizes at the level of the natural geochemical background of the territory, which makes it possible to clearly determine the boundaries of the roadside buffer zone.

An important component of the research is the study of the translocation potential of heavy metals in the "soil – plant" system using winter wheat as a strategic food crop. A pronounced selectivity of accumulation and organ-specific distribution of toxicants in vegetative and generative organs of plants was revealed. Based on the calculated accumulation and transfer factors, the effective functioning of natural physiological barrier systems of winter wheat was experimentally confirmed. These barriers limit the transport of toxicants to reproductive organs, depositing the bulk of absorbed lead, cadmium, and zinc in the straw. It was established that cadmium exhibits the highest mobility, while lead is characterized by a minimal transfer factor to the grain, indicating the reliable performance of root and stem barriers of wheat under conditions of polymetallic load. *Key words*: heavy metals, lead, cadmium, zinc, typical chernozems, winter wheat, translocation, barrier effect, agroecosystem.

Постановка проблеми. Збереження екологічної стабільності чорноземів Правобережного Лісостепу України в умовах техногенезу є ключовою передумовою сталого розвитку аграрного сектору та гарантування продовольчої безпеки [1]. На сучасному етапі інтенсивний розвиток транспортної інфраструктури та хімізація землеробства зумовлюють надходження в агроекосистеми широкого спектра токсикантів, серед яких за ступенем небезпеки та персистентності провідне місце посідають важкі метали [2].

© Кучеренко В.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Особливо гостро ця проблема проявляється у придорожніх зонах автомагістралей, які виступають потужними лінійними джерелами постійної емісії свинцю, кадмію та цинку в орні горизонти прилеглих полів [3].

Зазначені елементи характеризуються високою мобільністю в системі «ґрунт – рослина» та здатністю накопичуватися в біомасі сільськогосподарських культур, порушуючи фізіологічні процеси та знижуючи якість сировини [4]. Водночас реакція стратегічних продовольчих культур, зокрема пшениці озимої, на локальне поліметалеве забруднення чорноземів типових в умовах Правобережного Лісостепу залишається з'ясованою не до кінця. Існує об'єктивна наукова потреба у точнішій деталізації просторових меж імпактного впливу автотранспорту та визначенні кількісних параметрів транслокації металів у генеративні органи рослин для обґрунтування екологічно безпечних режимів землекористування.

Актуальність дослідження. Необхідність гарантування продовольчої безпеки та збереження екологічної стійкості земельних ресурсів України в умовах інтенсивного техногенезу зумовлює високу актуальність моніторингу агроекосистем Правобережного Лісостепу. Цей регіон, що володіє значним природно-ресурсним потенціалом чорноземів типових, піддається постійному антропогенному впливу через розвинену транспортну інфраструктуру, зокрема на території Вінницької області. Поєднання інтенсивного землеробства та хронічної аерогенної емісії важких металів від автотранспорту створює передумови для накопичення свинцю, кадмію та цинку у верхніх горизонтах ґрунту, що загрожує стійкості біогеохімічних процесів та біологічній чистоті вирощуваної продукції.

Значущість вирішення цієї проблеми полягає у необхідності детального вивчення механізмів транслокації пріоритетних токсикантів у системі «ґрунт – рослина» на прикладі пшениці озимої як головної продовольчої культури. Встановлення бар'єрних функцій вегетативних та генеративних органів рослин за різних рівнів поліметалевого навантаження дозволяє оцінити реальні ризики надходження екотоксикантів до трофічних ланцюгів і виявити фізіологічні особливості сортів щодо затримання шкідливих елементів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлені у роботі матеріали є складником науково-дослідної роботи, що виконується на кафедрі екології Уманського національного університету в межах комплексної теми «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування» (державний реєстраційний номер 0108U009772).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема техногенного забруднення агроекосистем і транслокації важких металів у системі «ґрунт – рослина» перебуває в центрі уваги багатьох іноземних дослідників, які акцентують увагу на довготривалих екологічних ризиках для глобальної продовольчої безпеки. Наукові праці підтверджують, що інтенсивний розвиток дорожньо-транспортних мереж є домінуючим чинником локального поліметалевого забруднення сільськогосподарських угідь, оскільки процеси зносу гальмівних колодок, шин та згоряння палива призводять до постійної емісії токсикантів [5]. Результати досліджень придорожніх екосистем у різних країнах світу доводять, що концентрація таких елементів, як свинець, кадмій та цинк, сягає свого максимуму у вузькій придорожній смузі завширшки до десяти метрів від полотна дороги, після чого стрімко знижується з віддаленням углиб полів [6–8]. Це узгоджується із концепцією формування локальних буферних зон і підтверджує необхідність встановлення чітких просторових меж для безпечного ведення рослинництва.

Особливе місце в сучасній іноземній літературі присвячено вивченню бар'єрних механізмів культурних рослин, зокрема пшениці озимої, щодо акумуляції важких металів. Дослідники зазначають, що здатність рослин транспортувати іони металів з кореневої системи до надземних органів залежить як від біологічних особливостей генотипу, так і від рухомості хімічних сполук у грунтовому розчині [9, 10]. Встановлено, що кадмій характеризується значно вищим коефіцієнтом біоакумуляції та транслокації порівняно зі свинцем, що робить його одним із найнебезпечніших токсикантів для продовольчих ланцюгів через його здатність проникати безпосередньо в генеративні органи рослин [11].

Попри значний масив накопичених даних, іноземні автори наголошують на необхідності проведення регіональних досліджень, оскільки рухомість і доступність важких металів для рослин безпосередньо регулюються фізико-хімічними властивостями конкретних типів ґрунтів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість фундаментальних праць, присвячених поведінці екотоксикантів у навколишньому середовищі, поза увагою дослідників часто залишаються питання комплексної оцінки поліметалевого навантаження на чорноземи типові в умовах реальних локальних зон придорожніх агроценозів Правобережного Лісостепу України. Існує об'єктивний дефіцит емпіричних даних щодо одночасної міграції та взаємодії трьох найбільш поширених токсикантів – свинцю, кадмію та цинку – в системі «автотранспортний простір – ґрунт – вегетативні та генеративні органи озимої пшениці». Недостатньо вивченим залишається кількісне вираження бар'єрних функцій сучасних сортів зернових культур та просторове диференціювання коефіцієнтів переходу цих металів у критичній близькості до лінійних джерел емісії, що обмежує

можливості точного прогнозування якості рослинницької сировини в регіоні.

Новизна. Наукова новизна отриманих результатів полягає у встановленні просторових закономірностей розподілу та параметрів поорганої транслокації рухомих сполук свинцю, кадмію та цинку в агроекосистемах Правобережного Лісостепу на різній відстані від автомагістралі з високою інтенсивністю руху. Уперше для умов чорноземів типових Вінницької області кількісно охарактеризовано екологічну ємність системи та захисний потенціал пшениці озимої через призму розрахункових коефіцієнтів накопичення та переходу. Отримано нові дані щодо меж інтенсивного накопичення важких металів у соломі та зерні, що дозволило чітко детермінувати просторовий діапазон імпактного впливу транспорту та довести селективну вибірковість фізіологічних бар'єрів рослин щодо акумуляції кадмію та свинцю в генеративній зоні.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне та загальнонаукове значення проведеного дослідження полягає у вдосконаленні науково-методичних підходів до оцінювання екологічної безпеки придорожніх агроекосистем на основі інтегрованого аналізу ґрунтово-рослинного покриву. Розроблені концептуальні засади просторового моніторингу екотоксикантів дозволяють точніше оцінювати стійкість біогеоценозів до техногенного пресу та розраховувати екологічні ризики для трофічних ланцюгів. Загальнонауковий внесок роботи полягає в поглибленні теоретичних уявлень про механізми біогеохімічної міграції хімічних елементів у штучно змінених ландшафтах, що слугуватиме фундаментальною базою для оптимізації придорожнього землекористування та розробки екологічно безпечних технологій вирощування стратегічних продовольчих культур.

Викладення основного матеріалу. Екологічний стан агроекосистем Правобережного Лісостепу України на сучасному етапі визначається складним поєднанням високого природно-ресурсного потенціалу чорноземних ґрунтів та зростаючого антропогенного тиску. Вибір локацій для проведення досліджень обумовлений необхідністю комплексної оцінки впливу основних джерел техногенезу, характерних для даного регіону. Вінницька область характеризується густою мережею автомобільних доріг міжнародного та національного значення, які виступають потужними лінійними джерелами емісії токсикантів, а також інтенсивним веденням сільського господарства із систематичним застосуванням мінеральних добрив і засобів захисту рослин.

Для детального моніторингу просторового розподілу важких металів було обрано модельні агроекосистеми, безпосередньо прилеглі до автомагістралі з високою інтенсивністю руху транспорту. Такий підхід дозволив простежити міграційні процеси в системі «джерело викидів – грунт – рослина» на різній відстані від епіцентру техногенного впливу. Пріоритетними екотоксикантами для контролю було визначено свинець, кадмій та цинк, оскільки саме ці метали мають найвищий ступінь небезпеки, характеризуються тривалим періодом напіввиведення з ґрунтового профілю та здатні активно залучатися до трофічних ланцюгів. Дослідження геохімічної структури ґрунтового покриву на різному віддаленні від полотна автодороги дало змогу встановити реальні масштаби та межі зони аерогенного забруднення.

Аналіз отриманих експериментальних даних щодо просторового розподілу рухомих форм важких металів в орному шарі чорноземів типових засвідчив чітко виражений гетерогенний характер накопичення елементів, що безпосередньо залежить від відстані до транспортної артерії. Було зафіксовано закономірне зниження концентрацій усіх трьох досліджуваних металів у міру віддалення від полотна автодороги вглиб агроценозу. Найбільш критична екологічна ситуація спостерігається у безпосередній близькості до автошляху, де процеси акумуляції токсикантів відбуваються найінтенсивніше, що підтверджується конкретними кількісними показниками аналізу ґрунтових зразків (рис. 1).

Аналіз експериментальних даних, наведених у рис. 1, свідчить про наявність чітко вираженого локального забруднення чорноземів типових рухомими сполуками важких металів у зоні безпосереднього впливу автомагістралі. При зіставленні отриманих концентрацій із законодавчо встановленими гранично допустимими концентраціями (ГДК) виявлено, що у придорожній смузі на відстані 10 метрів від полотна автодороги спостерігається перевищення нормативу за вмістом цинку, який досяг 24,50 мг/кг при величині ГДК 23,00 мг/кг. Концентрації свинцю та кадмію у цій же зоні наближаються до критичної межі, становлячи 4,82 мг/кг (80,3% від ГДК) та 0,61 мг/кг (87,1% від ГДК) відповідно. Така ситуація вказує на високий рівень екологічного ризику для сільськогосподарських угідь, розташованих у безпосередній близькості до транспортної інфраструктури, де поєднуються процеси постійної аерогенної емісії токсикантів та їх тривалої акумуляції у верхньому гумусовому горизонті.

У міру віддалення від транспортної артерії інтенсивність техногенного тиску стрімко згасає, що простежується через послідовне зниження рівнів накопичення всіх досліджуваних елементів у ґрунтовому профілі. Вже на відстані 50 метрів від джерела емісії концентрації свинцю, кадмію та цинку опускаються суттєво нижче межі допустимого стандарту і становлять відповідно 52,5%, 60,0% та 79,1% від величини ГДК. На віддалі 500 метрів, яка прийнята за контрольну зону, вміст рухомих форм металів стабілізується на мінімальних значеннях і є в кілька разів нижчим за граничні нормативи, фіксуючи природний геохімічний фон території Правобережного

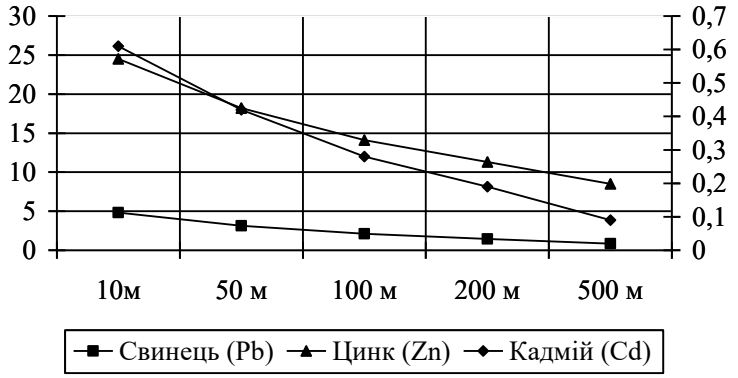


Рис. 1. Вміст рухомих форм важких металів у ґрунті залежно від віддалі до джерела техногенного навантаження, мг/кг абсолютно сухого ґрунту

Лісостепу. Отримана закономірність просторового розподілу підтверджує, що зона інтенсивного транскордонного забруднення ґрунтового покриву вздовж автошляхів є відносно локальною і зосереджена переважно в межах 50-метрового буферного поясу.

Дослідження транслокаційного потенціалу важких металів у системі «ґрунт – рослина» на прикладі культури пшениці озимої виявило виражену вибірковість накопичення елементів різними органами рослин. Вегетативна маса (солома) виступає потужнішим бар'єром на шляху міграції токсикантів порівняно з генеративними органами (зерном) (табл. 1).

Аналіз експериментальних даних щодо накопичення екотоксикантів в органах пшениці озимої дозволяє виявити чітку закономірність розподілу важких металів між вегетативними та генеративними органами рослин. Результати досліджень підтверджують функціонування природних фізіологічних бар'єрів озимої пшениці, спрямованих на захист репродуктивних органів від надмірного надходження токсичних елементів. У всіх досліджуваних варіантах, незалежно від ступеня техногенного навантаження та відстані до джерела емісії, концентрація свинцю, кадмію та цинку в соломі суттєво перевищувала їхній вміст у зерні. Це свідчить про те, що саме вегетативна маса бере на себе основну роль депонуючого середовища, затримуючи значну частину рухомих сполук металів на шляху їхнього висхідного току від кореневої системи до колосу.

Детальний аналіз демонструє, що інтенсивність транслокації елементів має виражену специфіку залежно від хімічної природи металу та зони вирощування. Так, у найбільш забрудненій імпактній зоні (10 м від магістралі) вміст свинцю в соломі становив 1,22 мг/кг, тоді як у зерні його концентрація була у 3,5 рази меншою і досягала 0,35 мг/кг. Подібний бар'єрний ефект виявлено і для кадмію: за максимального тиску його концентрація зменшувалася з 0,18 мг/кг у соломі до 0,08 мг/кг у зерні. Цинк, будучи життєво необхідним мікроелементом, транспортувався до генеративних органів активніше, проте й для нього зафіксовано утримання у соломі на рівні 28,10 мг/кг проти 15,40 мг/кг у зерні.

Оцінка отриманих результатів у контексті гігієнічної безпеки та порівняння з гранично допустимими концентраціями свідчить про задовільний стан вирощеної продукції за більшістю показників. Навіть в імпактній зоні вміст кадмію (0,08 мг/кг) та цинку (15,40 мг/кг) у зерні не перевищував чин-

Таблиця 1

Концентрація важких металів в органах пшениці озимої за різного рівня забруднення ґрунту, мг/кг сухої речовини

Елемент	Зона відбору (відстань)	Вміст у соломі	Вміст у зерні
Свинець (Pb)	Імпактна (10 м)	1,22	0,35
	Буферна (100 м)	0,64	0,18
	Фонова (500 м)	0,21	0,05
Кадмій (Cd)	Імпактна (10 м)	0,18	0,08
	Буферна (100 м)	0,09	0,04
	Фонова (500 м)	0,03	0,01
Цинк (Zn)	Імпактна (10 м)	28,10	15,40
	Буферна (100 м)	19,30	11,20
	Фонова (500 м)	12,40	8,60

 ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

них нормативів безпеки рослинницької сировини, які становлять 0,10 мг/кг та 50,00 мг/кг відповідно. Певне занепокоєння викликає лише концентрація свинцю у зерні на відстані 10 метрів від полотна дороги (0,35 мг/кг), яка наближається до критичного порогу безпеки. Проте вже в межах буферної зони (100 м) і на контролі (500 м) спостерігається стрімке падіння вмісту всіх елементів у зерні до абсолютно безпечних рівнів, що підтверджує можливість отримання екологічно безпечної продукції рослинництва за умов дотримання просторової ізоляції посівів від лінійних джерел забруднення.

Головні висновки. Проведені комплексні дослідження просторового розподілу та особливостей транслокації пріоритетних важких металів в агроекосистемах Вінницької області дозволяють констатувати наявність вираженого локального техногенного впливу транспортної інфраструктури на стан ґрунтового та рослинного покриву. На основі аналізу геохімічного профілю орного шару чорноземів типових доведено існування чіткої зони імпактного навантаження, яка локалізована в межах 50-метрової смуги від автодороги. Саме в цьому радіусі фіксуються максимальні концентрації рухомих форм токсикантів, що за вмістом цинку перевищує гранично допустимі ліміти, а за показниками свинцю та кадмію наближається до критичної межі. На віддалі понад 50 метрів техногенний тиск різко згасає, а на відстані 500 метрів повністю нівелюється, стабілізуючись на рівні природного фону, що вказує на локальний характер транскордонної аерогенної емісії та високу детоксикаційну здатність чорноземних ґрунтів регіону.

Експериментально встановлені параметри накопичення металів у біомасі пшениці озимої підтверджують високу ефективність фізіологічних захисних систем культури на шляху міграції забруднювачів до репродуктивних органів. Показники розподілу свідчать, що вегетативна маса виступає основним бар'єрним та акумулюючим середовищем, затримуючи переважну частину абсорбованих сполук свинцю, кадмію та цинку, завдяки чому їхня концентрація в генеративних органах знижується у кілька разів. Хоча в імпактній зоні вміст свинцю в зерні наближається до гранично допустимих нормативів харчової безпеки, загальна екологічна якість вирощеної продукції залишається задовільною. Це дозволяє стверджувати, що за умов дотримання регламентованої просторової ізоляції агроценозів від джерел викидів стає можливим стабільне виробництво екологічно безпечної та гігієнічно повноцінної продукції рослинництва.

Перспективи використання результатів дослідження. Практична значущість та наукові перспективи використання отриманих результатів лежать у площині розробки та впровадження систем високоточного екологічного моніторингу та раціонального природокористування в зоні техногенного тиску. Накопичений експериментальний матеріал слугуватиме надійною основою для проведення просторового екологічного зонування сільськогосподарських угідь, що дозволить диференціювати технології вирощування культур залежно від їхнього віддалення від транспортних магістралей. Зокрема, встановлені межі 50-метрової буферної зони вказують на необхідність оптимізації структури посівних площ у придорожніх смугах шляхом виключення з сівозмін продовольчих культур і переходу на вирощування технічних рослин або біоенергетичної сировини.

Література

1. Фурдичко О.І., Дребот О.І., Дем'янюк О.С. та ін. *Наукові основи формування збалансованих агроекосистем України в умовах змін клімату: монографія* / за науковою редакцією академіка НААН О.І. Фурдичка. Київ: ДІА, 2021. 320 с.
2. Khan MM, Qiu B, Zhu Z. Heavy Metals in Agriculture: Sources, Industrial Applications, Plant Toxicity, and Remediation Approaches. *International Journal of Molecular Sciences*, 2026. 27(14):6192. https://doi.org/10.3390/ijms27146192
3. De Silva S., Ball A.S., Indrapala D.V., Reichman S.M. Review of the interactions between vehicular emitted potentially toxic elements, roadside soils, and associated biota. *Chemosphere*, 2021. 263:128135. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128135.
4. Ali Hazrat, Khan Ezzat, Ilahi Ikram. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation, *Journal of Chemistry*, 2019. 6730305. https://doi.org/10.1155/2019/6730305.
5. Peng X., Zhang Y., Li J. Heavy metals in roadside soil along an expressway connecting two megacities in China: Accumulation characteristics, sources and influencing factors. *Science of The Total Environment*, 2024. Vol. 955. 177095. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177095.
6. Binner H., Sullivan T., Jansen M.A.K., McNamara M.E. Metals in urban soils of Europe: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 2023. Volume 854. 158734. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158734.
7. Fotini Botsou, Ali Sungur, Efstratios Kelepertzis, Mustafa Soylak. Insights into the chemical partitioning of trace metals in roadside and off-road agricultural soils along two major highways in Attica's region, Greece. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Volume 132. P. 101-110. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.05.032.
8. Zhang X.N., Guo Q.P., Shen X.X., Yu S.W., Qiu G.Y. Water Quality, Agriculture and Food Safety in China: Current Situation, Trends, Interdependencies, and Management. *J. Integr. Agric*, 2015. 14. P. 2365–2379.
9. Fuyong Liu, Chuang Ma, Martina Fattobene, Elisa Santoni, Raffaele Emanuele Russo, Silvia Zamponi, Paolo Conti, Hongzhong Zhang, Mario Berrettoni. Comparative analysis of wheat heavy metal accumulation across multiple regions and the influence of cultivation practices. *Ecotoxicology and Environmental Safety,* 2025, Volume 303. 118875. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.118875.

10. Guo Jiahong, Chen Yiping, Zhao Yan, Tian Hanwen, Jiang Yao, Zhang Yuchen. Molecular mechanisms of wheat acclimation to soil degradation: Insights into salt stress, heavy metal contamination, and nutrient deficiency. *Environmental and Experimental Botany*, 2025. Volume 237. id.106193. 10.1016/j.envexpbot.2025.106193.
11. Zhao F.J., Ma Y., Zhu Y.G., Tang Z., McGrath S.P. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies. *Environmental Science & Technology*, 2015. 49(2). P. 750–759. https://doi.org/10.1021/es5047099.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026