

ЕКОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО АГРОТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЗА ВИРОЩУВАННЯ КУКУРУДЗИ НА ЗЕРНО НА ҐРУНТІ, ЗАБРУДНЕНОМУ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

Г.В. Давидюк, Л.І. Шкарівська, І.І. Клименко, Н.І. Довбаш, М.А. Кушук

ННЦ «ІЗ НААН»

(с-ще Чабани, Фастівський р-н, Київська обл., Україна)

e-mail: anndavydiuk@gmail.com; ORCID: 0000-0002-3877-2837

e-mail: Luda_Shkarivska@i.ua; ORCID: 0000-0002-4928-3238

e-mail: Ira_Klimenko@i.ua; ORCID: 0000-0001-9449-7377

e-mail: Nadezda_D@ukr.net; ORCID: 0000-0002-4741-2657

e-mail: marinakushyk@gmail.com; ORCID: 0000-0002-3956-4423

Стаття присвячена дослідженню зменшення шкідливого впливу важких металів на ґрунт, що знаходиться у сільськогосподарському використанні. Метою є встановлення особливостей застосування агротехнічних заходів за вирощування кукурудзи на зерно в умовах забруднення сірого лісового ґрунту важкими металами. Використано методи досліджень: полігонний моніторинг, польовий дослід, лабораторний та статистичний. Визначено, що застосування агрозаходів (періодичне вапнування та щорічне внесення побічної продукції з біодеструктором, гумату та обробка насіння комплексним мікро-ризоутворювальним препаратом із властивостями детоксиканта) сприяє підвищенню вмісту гумусу в ґрунті на відносних 19,0–26,0% порівняно з попередніми дослідженнями (1,33–1,39% у 2016–2020 рр.). Рівень гідролітичної кислотності децю знизився і був у межах 1,2–1,4 м-екв/100 г ґрунту, забезпеченість обмінним кальцієм залишилася середньою, магнієм — низькою та середньою. Сума ввібраних основ підвищилась на 1,4–3,3 м-екв/100 г ґрунту з дуже низького до низького та середнього рівнів (9,7–11,1 м-екв/100 г). Кількість сполук рухомого фосфору зросла на 16,0–19,2%, досягнувши дуже високого рівня — 295,9–348,9 мг/кг. Відмічено тенденцію до зниження кількості рухомих форм свинцю на 6,1–31,6%, кадмію — на 14,3–16,7, цинку — на 9,0–21,2% (залежно від рівня забрудненості екотопів), а також рухомих сполук міді — на 27,3%. Урожайність кукурудзи характеризувалася незначною мінливістю за роками ($V = 6,8\%$), а вміст міді, цинку, свинцю та кадмію не перевищував гранично допустиму концентрацію для кормових цілей. Встановлено, що за беззмінного вирощування кукурудзи в умовах техногенного забруднення ґрунту ефективним є впровадження комплексу додаткових агрозаходів, що дає можливість отримати 6,7–8,4 т/га зерна, придатного для кормових і технічних цілей. Дослідження особливостей одержання сталих урожаїв культур на ґрунтах, забруднених важкими металами, і пошук шляхів зменшення їх забруднення є перспективним напрямом досліджень.

Ключові слова: антропогенне навантаження, забруднення ґрунтів, полігонний моніторинг, родючість ґрунту, детоксикація ґрунту.

ВСТУП

Розвиток суспільства і господарської діяльності, у переважній більшості, призводить до збільшення антропогенного навантаження на навколишнє середовище та негативних змін у компонентах довкілля. Використання різноманітних хімікатів у промисловості, сільськогосподарському виробництві й побуті, відходи від робо-

ти двигунів внутрішнього згоряння транспортних засобів, стічні води підприємств і населених пунктів та низка інших чинників зумовлюють надходження в біосферу хімічних елементів, зокрема важких металів (далі ВМ) [1–3]. На сучасному етапі розвитку діяльності людини дедалі більше спричиняє забруднення навколишнього середовища ВМ через щоденне виробництво товарів для потреб населення. Зміна клімату також може впливати на за-

бруднення ґрунту важкими металами за рахунок зниження рН ґрунту, зумовленого посиленням кислотних дощів унаслідок промислових викидів парникових газів та мілітарних дій. Це підвищує мобільність важких металів. Повені та зливові дощі можуть переносити забруднені частинки ґрунту на нові території, розширюючи зону забруднення, а тривалі посухи впливати на концентрування важких металів у верхніх шарах ґрунту. У нинішніх умовах зміни клімату ведення сільськогосподарського виробництва на ґрунтах забруднених важкими металами є істотною екологічною проблемою.

Важливою для зменшення шкідливого впливу ВМ на довкілля є розробка способів використання забруднених ними ґрунтів. Зокрема, питання ефективності вирощування кукурудзи на зерно в умовах змін клімату на ґрунтах забруднених ВМ, кількість яких збільшується, зокрема і внаслідок військової агресії РФ, потребують вивчення. Тому, актуальним є визначення особливостей отримання сталих урожаїв культури на ґрунтах із надфоновим умістом ВМ, а перспективним — пошук шляхів зменшення кількості забруднених ними ґрунтів.

Метою досліджень було встановити особливості застосування агротехнічних заходів за вирощування кукурудзи на зерно в умовах забруднення ґрунту важкими металами.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

ВМ здатні накопичуватись в ґрунтах, що істотно впливає на їх якість і родючість. За даними М. Esmailzadeh, J. Jaafari [4] забруднення сільськогосподарських ґрунтів ВМ може спричинити деградацію ґрунту, перешкоджати росту рослин, створюючи проблеми для всіх живих організмів. Окрім того, А. Paya Perez, N. Rodriguez Eugenio [5] наголошують, що деградація сільськогосподарських ґрунтів впливає на врожайність сільськогосподарських культур і наражає найбільш вразливі верстви населення на ризик економічних втрат і недоїдання.

У працях В.Л. Самохвалової та ін. [6], J. Vareda et al. [7] розглядається питання важливої ролі фізико-хімічних властивостей ґрунту у накопиченні та рухомості ВМ. С.А. Балюк та ін. [8] відмічають, що відновлення родючості забруднених ґрунтів ВМ є досить складним не лише в Україні, а й у світі. Я.Г. Цицюра з співавт. [9], А. Raklami et al. [10] особливу увагу звертають на методи детоксикації, що одночасно впливають на рухомість і транслокацію ВМ у ґрунті. Такі методи забезпечують іммобілізацію забруднювачів, що перебувають в аніонній та катіонній формах і передбачають вирощування рослин, толерантних до ВМ та здатних зменшити вміст елементів забруднювачів. А. Raklami, K. Oufdou [11], X. Wang, L. Fang [12] у своїх дослідженнях показують, що забруднення ґрунтів ВМ перешкоджає таким біохімічним і фізіологічним процесам у рослинах, як проростання насіння, водний баланс, фотосинтез, засвоєння CO₂, мінеральне живлення, накопичення розчинних речовин, затримка росту.

Одним із способів рекультивации сільськогосподарських ґрунтів, забруднених ВМ, є фіторемедіація, що подано у працях В.Л. Самохвалової, А.І. Фатєєва [6], А. Jarin, M. Khan [13], S. Muthusaravanan, N. Sivarajasekar, [14] та багатьох інших учених. Вона полягає у використанні рослин для екстракції, іммобілізації або детоксикації важких металів та інших забруднювачів у навколишньому середовищі. Це складний процес, що включає фітоекстракцію — поглинання забруднювальних речовин кореневою системою рослин та їх перенесення у рослинну біомасу; різкофільтрацію — руйнування забруднювальних речовин ґрунтовими мікроорганізмами у зоні, що оточує кореневу систему рослини та інші процеси. Однак, із огляду на тривалість процесу фіторемедіації, який потребує значного часу, вагомим значення набуває отримання економічної вигоди за вирощування відповідних культур.

Однією з важливих сільськогосподарських культур, яку можна використовувати для фіторемедіації ґрунтів, забруднених

ВМ, є кукурудза. Ця культура посідає одне з провідних місць серед зернових культур у світовому агропромисловому виробництві. Універсальність і високий генетичний потенціал урожайності сприяють розширенню площ посівів цієї культури в різних агрокліматичних зонах. Г.М. Калетнік, В.Д. Паламарчук [15], Н. Tang, L. Zhang [16] у своїх дослідженнях відмічають, що кукурудза є важливою сировиною для виробництва харчових продуктів людини та кормів у тваринництві, фармацевтичних препаратів, косметики та біоенергетичних цілей. Однак на ріст рослин, фізіологічні процеси, потенціал врожайності і продуктивність кукурудзи істотно впливають ґрунтові і погодні умови. Тому, за даними А. El-Sappah., S. Rather [17] такі особливості, як глибока коренева система, осмотична адаптація та активність антиоксидантних ферментів, забезпечують високу стійкість кукурудзи до посухи. Також М. Rizwan, S. Ali [18], W. Xu, G. Lu [19] пояснюють, що кукурудза широко використовується для фітореMediaції ґрунтів, забруднених кадмієм, завдяки високому виробництву біомаси та здатності накопичувати цей елемент. До того ж у працях S.-F. Cheng, C.-Y. Huang [20] показано, що вона є високотолерантною до вмісту свинцю у ґрунті.

Отже, дослідження перспективи вирощування кукурудзи на зерно в умовах забруднення ґрунту ВМ і кліматичних змін є важливим для забезпечення продовольчої безпеки та захисту навколишнього середовища.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Упродовж 2021–2025 рр. польові експерименти здійснювали на ґрунтах, забруднених ВМ, у полігонному моніторингу в умовах Правобережного Лісостепу України (дослідне поле ННЦ «ІЗ НААН», Фастівський р-н, Київська обл.). Дослідження виконувалися на стаціонарному дрібноділянковому досліді, закладеному в 1999 р. на сірому лісовому грубопилуватому легкосуглинковому на лесовидному суглинку ґрунті (рис. 1).

Під час закладання дослідів ґрунт характеризувався близькою до нейтральної реакцією ґрунтового розчину ($pH_{\text{сол.}} = 5,6$), низьким вмістом гумусу (1,65%), дуже низьким — легкогідролізного азоту (85,1 мг/кг), високим — рухомих сполук фосфору (162,0 мг/кг) та підвищеним — калію (120,0 мг/кг). Облікова площа ділянки 4 м², повторність — чотириразова. Досліджували варіанти з природним фоном кислототорозчинної фракції свинцю — 10 мг/кг, цинку — 5, кадмію — 0,2 мг/кг ґрунту (фон — контроль) та варіанти зі штучно створеними фонами, що перевищували природний — у 5, 10 та 100 разів відповідно. В 2014 р. було створено екотоп з перевищенням природного фону кислототорозчинних сполук міді (3,0 мг/кг) у 100 разів.

Вирощували кукурудзу на зерно (гібрид Остреч СВ). На всіх ділянках досліді з 2021 по 2025 рр. щороку вносили: мінеральні добрива в дозі N₁₂₀P₉₀K₁₂₀; побічну продукцію кукурудзи з розрахунку 5 т/га, оброблену біодеструктором; гумат у дозі 10 л/га, а також у 2020 р. було внесено меліорант у вигляді дефекації — 3 т/га. Проводили передпосівну обробку насіння мікоризотворювальним біопрепаратом — 2 л/т.

Проби ґрунту відбирали на глибину 0–20 см навесні — до посіву культури.



Рис. 1. Місце розташування досліді; супутникове зображення досліджуваного агроландшафту в Google Maps із позначенням місць дослідження (карта України, с. Гатне, Фастівський р-н, Київська обл. (50.340565°N, 30.407150°E))

У досліді застосовували різні агротехнічні заходи відповідно до вимог технологічних карт вирощування культур.

Для досліджень використовували методику фізико-хімічного і хімічного аналізів, які виконували у лабораторії відділу агроєкології і аналітичних досліджень ННЦ «ІЗ НААН». У ґрунті визначали: $pH_{\text{сол.}}$ – іонометрично, згідно з ДСТУ ISO 10390:2007; гідролітичну кислотність – за методом Каппена в модифікації ЦІНАО (ДСТУ 7537:2014); суму вибраних основ – титриметрично за методом Каппена-Гільковця (інструкція № 2); уміст органічної речовини (гумус) – за методом Тюрина (ДСТУ 4289:2004); легкогідролізний азот – за методом Корнфілда після компостування ґрунту в чашках Конвея (ДСТУ 7863:2015); рухомі сполуки фосфору і калію – за модифікованим методом Чирикова (ДСТУ 4115-2002); обмінний кальцій і магній – за методом Шолленберга в модифікації ННЦ «ІА імені О. Н. Соколовського» (ДСТУ 7861:2015); рухомі форми важких металів та мікроелементів – у буферній ацетатно-амонійній витяжці (pH 4,8) з подальшим визначенням методом атомно-абсорбційної спектрометрії (ДСТУ 4770:2007).

Аналіз погодних умов вегетаційного періоду 2021–2025 рр. свідчить про відхилення температурного режиму і кількості опадів від середньобагаторічних норм, що могло впливати на ріст і розвиток рослин кукурудзи (рис. 2).

Загалом, вегетаційний період вирощування кукурудзи за всі досліджувані роки характеризувався вищими за норму на 0,9–1,5°C температурами повітря (рис. 2, а). Кількість опадів за вегетаційний період на початку вегетації у травні–червні була в середньому на 16,2–37,2 мм, а в 2023 р. – на 23,6 та 64,6 мм меншою від багаторічної норми (рис. 2, б).

У липні–серпні кількість опадів часто перевищувала норму, проте вони мали зливовий характер. Отже, підвищені температурні показники і нестача вологи, особливо на початку вегетації, мали негативний вплив на ріст і розвиток рослин кукурудзи.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз відібраних проб ґрунту в середньому за 2021–2025 рр. показав, що застосування агрозаходів сприяло підвищенню вмісту гумусу на відносних 19,0–26,0% порівняно з попередніми дослідженнями (1,33–1,39% у 2016–2020 рр.). За середнього показника $pH_{\text{сол.}}$ $4,9 \pm 0,04$ та низького рівня варіювання ($V=1,7\%$) реакція ґрунтового розчину на всіх ділянках досліді була середньобазисною і коливалася в межах 4,8–5,0 (табл. 1). Рівень гідролітичної кислотності за цих умов дещо знизився (за незначного рівня варіювання – $V=7,5\%$) і був у межах 1,2–1,4 м-екв/100 г ґрунту. Забезпеченість обмінним кальцієм залишилася

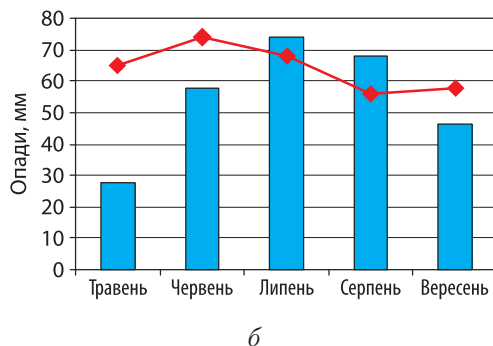
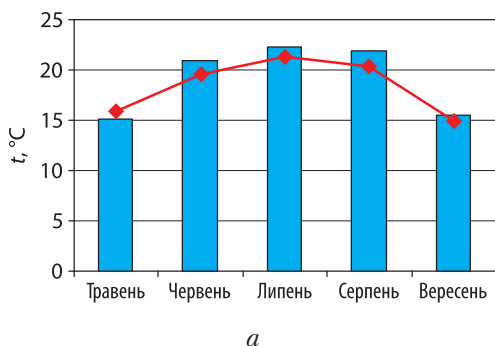


Рис. 2. Погодні умови вирощування кукурудзи на зерно (2021–2025 рр.): а – температурні умови; б – кількість опадів

Таблиця 1. Фізико-хімічні властивості сірого лісового ґрунту в умовах тривалого забруднення важкими металами (2021–2025 рр.)

Варіант дослідю	Гумус, %	рН _{сол.}	Гідролітична кислотність	Обмінний		Сума ввібраних основ
				кальцій	магній	
				м-екв/100 г ґрунту		
Природний фон ВМ (контроль)	1,52	4,9	1,2	9,4	1,3	11,1
Перевищення фону ВМ у 5 разів	1,67	5,0	1,2	9,1	1,0	10,3
Перевищення фону ВМ у 10 разів	1,61	4,8	1,3	8,6	0,8	9,7
Перевищення фону ВМ у 100 разів	1,60	4,9	1,4	8,7	0,8	9,8
$\bar{X} \pm S\bar{x}$	1,60±0,03	4,9±0,04	1,3±0,05	8,95±0,18	0,98±0,12	10,2±0,3
V, %	3,85	1,7	7,5	4,13	24,23	6,3
НІР ₀₅	0,14	0,18	0,2	0,83	0,53	1,4

ся середньою (8,6–9,4 м-екв/100 г ґрунту), а магнієм – низькою та середньою (0,8–1,3 м-екв/100 г ґрунту). Сума ввібраних основ під впливом агрозаходів підвищилась на 1,4–3,3 м-екв/100 г ґрунту: від дуже низького (7,8–8,9 м-екв/100 г у 2016–2020 рр.) до низького та середнього рівнів (9,7–11,1 м-екв/100 г) у 2021–2025 рр. [21].

Аналіз забезпеченості ґрунту нутрієнтами підтвердив вплив агротехнічних заходів на агрохімічні властивості ґрунту (табл. 2). Кількість сполук рухомого фосфору зросла від 170,6–218,2 мг/кг ($V=12,3\%$) у 2016–2020 рр. на 16,0–19,2% до 295,9–348,9 мг/кг (2020–2025рр.) з незначним варіюванням ($V=7,3\%$), забезпечивши дуже високий рівень вмісту цього елементу – 295,9–348,9 мг/кг ($V=7,3\%$). Уміст сполук рухомого калію збільшився на 12,3–14,2%, порівняно з попередніми даними (2016–2020 рр.), забезпечивши дуже високий рівень – 193,9–266,6 мг/кг ґрунту (за середнього рівня варіювання – $V=14,0\%$). Уміст сполук легкогідролізного азоту був дуже низький і знаходився у межах від 87,8 до 94,7 мг/кг з незначним варіюванням ($V=4,2\%$).

Водночас проведені дослідження показали, що запровадження запропонованих агротехнічних заходів у 2021–2025 рр. (щорічне внесення побічної продукції рослинництва, мінеральних добрив, біологічних препаратів і післядія вапнування проведеного в 2020 р.) сприяли зниженню кількості рухомих форм ВМ у ґрунті.

Зокрема, порівняно з періодом 2016–2020 рр., кількість рухомого свинцю зменшилася на 6,1–31,6%, кадмію – на 8,3–16,7, а цинку – на 9,0–30,0% залежно від рівня техногенного навантаження (табл. 3).

Також за цих умов, у екоотпі, забрудненому рухомими сполуками міді відмічено зменшення кількості її рухомих форм на 27,3%. Найінтенсивніше кількість рухомих форм свинцю зменшувалась на варіанті з 10-кратним перевищенням фонових показників – 31,6%, що може бути пов'язано з тим, що помірно високі концентрації металів можуть стимулювати захисні механізми мікрофлори ґрунту або виділення корневих ексудатів рослин, які переводять метали у неактивну форму швидше, ніж за низьких або занадто високих концентрацій. Відмічено, що на природному фоні найбільш інтенсивно зменшувалась кількість

Таблиця 2. Показники родючості сірого лісового ґрунту в умовах тривалого забруднення агроекотопів свинцем, кадмієм і цинком, шар 0–20 см (2021–2025 рр.)

Варіант досліджу	Легкогідролізний азот (N)	Рухомий фосфор (P ₂ O ₅)	Рухомий калій (K ₂ O)
	мг/кг ґрунту		
Природний фон ВМ (контроль)	87,8	348,9	266,6
Перевищення фону ВМ у 5 разів	94,7	330,9	193,9
Перевищення фону ВМ у 10 разів	86,4	309,6	209,8
Перевищення фону ВМ у 100 разів	88,0	295,9	223,4
$\bar{X} \pm S\bar{x}$	89,2±1,9	321,3±11,7	223,4±15,6
V, %	4,2	7,3	14,0
НІР ₀₅	8,4	52,5	70,2

Таблиця 3. Динаміка вмісту рухомих форм важких металів у сірому лісовому ґрунті залежно від фону забрудненості полотантами за застосування агротехнічних заходів, шар 0–20 см, мг/кг

Варіант досліджу	Свинець			Кадмій			Цинк			Мідь		
	I	II	Δ, %	I	II	Δ, %	I	II	Δ, %	I	II	Δ, %
1	1,4	1,1	21,4	0,12	0,11	8,3	1,0	0,7	30,0	0,3	0,4	33,3
2	11,5	10,8	6,1	0,61	0,50	16,7	3,3	2,7	18,2	—	—	—
3	23,7	16,2	31,6	0,70	0,62	14,3	6,6	5,2	21,2	—	—	—
4	319,6	249,4	22,0	6,20	5,30	14,5	102,8	93,5	9,0	20,5	14,9	27,3
ГДК	6,0			0,7			23,0			3,0		
Фон	0,5			0,1			5,0			0,5		

Примітки: I – 2016–2020 рр.; II – 2021–2025 рр.; 1– природний фон ВМ (контроль); 2 – перевищення фону ВМ у 5 разів; 3 – перевищення фону ВМ у 10 разів; 4 – перевищення фону ВМ у 100 разів; Δ, % – зміна показника у %.

рухомих форм цинку та міді, відповідно на 30,0 і 30,3%. На природному фоні коренева система рослин активно розвивається, метаболізм працює на повну потужність, що дає можливість їм ефективно поглинати мікроелементи (цинк і мідь найактивніше) для свого росту. Однак кількість рухомих форм свинцю та міді на досліджуваних ділянках із забрудненням ВМ сірого лісового ґрунту перевищувала гранично допустиму концентрацію (ГДК) [22].

В умовах стабільного техногенного забруднення ґрунту свинцем, кадмієм та цинком застосування біологічних препа-

ратів (гумату і комплексного мікоризотворювального препарату-детоксиканта) як окремо, так і за сумісного поєднання на фоні післядії вапнування, а також внесення побічної продукції рослинництва з біодеструктором та мінеральних добрив, забезпечило середню врожайність зерна кукурудзи за 2021–2025рр. на рівні 6,7–8,4 т/га. Водночас простежувалася тенденція до підвищення вмісту протеїну в зерні. Слід зазначити, що підвищені температури та дефіцит вологи на початку вегетації кукурудзи призводили до стресу, затримуючи сходи, послаблюючи кореневу систему, а

також засвоєння поживних речовин. Однак подальші сприятливі умови нівелювали ці негативні чинники у початковий період розвитку рослин і дали можливість отримати стабільний урожай зерна кукурудзи і не призвели до істотного зниження ефективності біопрепаратів.

Статистичний аналіз засвідчив, що урожайність кукурудзи характеризувалася незначною мінливістю ($V=6,8\%$), амплітуда коливань становила 1,7 т/га (від 6,7 до 8,4 т/га), середньоквадратичне відхилення — 0,5, похибка середнього значення — 0,1 т/га. Варіювання показників вмісту протеїну, крохмалю і жиру в зерні кукурудзи було незначним. Уміст протеїну в усіх варіантах досліджу становив від 8,2 до 9,8%, крохмалю — 73,3–74,5, рослинної олії — 4,24–4,41%.

Уміст міді, цинку, свинцю і кадмію у зерні кукурудзи не перевищував нормативів ГДК для кормових цілей (ДСТУ 4525:2006). Уміст сполук кадмію та свинцю у зерні як на контролі (природний фон металу), так і у варіантах із 5-, 10- та 100-разовим перевищенням природного фону металів у ґрунті становили 0,06–0,13 мг/кг та 0,6–0,9 мг/кг відповідно. Ці значення

перевищують ГДК для продовольчого зерна (0,10 мг/кг для Cd та 0,5 мг/кг для Pb), проте згідно з нормативами для кормової сировини (ГДК — 0,30 мг/кг та 5,0 мг/кг) таку продукцію можна використовувати для кормових і технічних цілей.

ВИСНОВКИ

Отже, в умовах техногенного забруднення сірих лісових ґрунтів важкими металами у кислоторозчинній формі (Pb — 50–1000 мг/кг, Cd — 1,0–20, Zn — 25–500, Cu — 300 мг/кг) та беззмінного вирощування кукурудзи впродовж 2021–2025 рр. із застосуванням комплексу регенеративних заходів забезпечується отримання стабільної врожайності зерна на рівні 6,7–8,4 т/га. Отримане зерно за вмістом токсикантів відповідає нормативам ДСТУ 4525:2006, що дає змогу використовувати його як товарну сировину для кормових і технічних цілей. За цих умов можна досягнути зниження кількості у ґрунті рухомих форм свинцю на 6,1–31,6%, кадмію — на 14,3–16,7, цинку — на 9,0–21,2 та міді — на 27,3% залежно від вихідного рівня забруднення екотопів важкими металами.

ЛІТЕРАТУРА

- Masindi, V., & Muedi, K. L. (2018). *Environmental contamination by heavy metals Heavy Metals*. In Tech. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.76082>.
- Dehodiuk, S., Davydiuk, H., Butenko, A., Litvinova, O., Shkarivska, L., Klymenko, I., ... Litvinov, D. (2025). Chemical composition of bottom silts as an indicator of environmental contamination in a small river basin. *Agriculture and Forestry*, 71(3), 199–223. DOI: <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.71.3.12>.
- Гриньова, Я. Г., & Криштоп, Є. А. (2021). Проблеми забруднення навколишнього середовища важкими металами та шляхи їх подолання. *Інженерія природокористування*, 1(19), 111–119. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6904034>.
- Esmailzadeh, M., Jaafari, J., Mohammadi, A. A., Panahandeh, M., Javid, A., & Javan, S. (2019). Investigation of the extent of contamination of heavy metals in agricultural soil using statistical analyses and contamination indices. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(5), 1125–1136. DOI: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1460798>.
- Paya Perez, A., & Rodriguez Eugenio, N. (2018). *Status of local soil contamination in Europe: Revision of the indicator «Progress in the management contaminated site in Europe»*. (Report No.: JRC 107508; Contract No.: EUR 29124 EN). Luxembourg: Joint Research Centre (EUR). DOI: <https://doi.org/10.2760/093804>.
- Самохвалова, В. Л., Фатеев, А. І., Зуза, С. Г., Погромська, Я. А., Зуза, В. О., Панасенко, Є. В., & Горпинченко, П. Ю. (2015). Фіторе mediaція техногенно забруднених ґрунтів. *Агроекологічний журнал*, 1, 92–100. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2015.272192>.
- Vareda, J. P., Valente, A. J. M., & Duraes, L. (2019). Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal of Environmental Management*, 246, 101–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.126>.
- Балюк, С. А., Воротинцева, Л. І., & Ладних, В. Я. (2014). *Заходи з детоксикації забруднених ґрунтів та зменшення транслокації важких металів в сільськогосподарській культурі*. ТОВ «Смуґаста типографія».
- Цицора, Я. Г., Шкатула, Ю. М., Забарна, Т. А., & Пелех, Л. В. (2022). *Інноваційні підходи до фіторе mediaції та фіторекультивуваці у сучасних системах*

- землеробства: моногр. ТОВ «Друк». URL: <https://repository.vsau.org/getfile.php/31038.pdf>.
10. Raklami, A., Meddich, A., Oufdou, K., & Baslam, M. (2022). Plants — Microorganisms-Based Bioremediation for Heavy Metal Cleanup: Recent Developments, Phytoremediation Techniques, Regulation Mechanisms, and Molecular Responses. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(9), 5031. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms23095031>.
 11. Raklami, A., Oufdou, K., Tahiri, A.-I., Mateos-Naranjo, E., Navarro-Torre, S., Rodríguez-Llorente, I. D., ... Pajuelo, E. (2019). Safe Cultivation of Medicago sativa in Metal-Polluted Soils from Semi-Arid Regions Assisted by Heat- and Metallo-Resistant PGPR. *Microorganisms*, 7(7), 212. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms7070212>.
 12. Wang, X., Fang, L., Beiyuan, J., Cui, Y., Peng, Q., Zhu, S., Wang, M., & Zhang, X. (2021). Improvement of alfalfa resistance against Cd stress through rhizobia and arbuscular mycorrhiza fungi co-inoculation in Cd-contaminated soil. *Environ Pollut*, 277, 116758. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116758>.
 13. Jarin, A. S., Khan, M. A. R., Apon, T. A., Islam, M. A., Rahat, A., Akter, M., ... Tran, L.-S. P. (2025). Plant Responses to Heavy Metal Stresses: Mechanisms, Defense Strategies, and Nanoparticle-Assisted Remediation. *Plants*, 14(24), 3834. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14243834>.
 14. Muthusarayanan, S., Sivarajasekar, N., Vivek, J. S., Paramasivan, T., Naushad, M., Prakashmaran, J., ... Al-Duaij, O. K. (2018). Phytoremediation of Heavy Metals: Mechanisms, Methods and Enhancements. *Environmental Chemistry Letters*, 16, 1339–1359. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0762-3>.
 15. Калетнік, Г. М., Паламарчук, В. Д., Гончарук, І. В., Ємчик, Т. В., & Телекало, Н. В. (2021). *Перспективи використання кукурудзи для енергоефективного та екологічнобезпечного розвитку сільських територій: моногр.* ФОП Кушнір Ю. В. URL: <https://socrates.vsau.org/repository/getfile.php/31069.pdf>.
 16. Tang, H., Zhang, L., Xie, X., Wang, Y., Wang, T., & Liu, C. (2025). Resilience of Maize to Environmental Stress: Insights into Drought and Heat Tolerance. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(11), 5274. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms26115274>.
 17. El-Sappah, A. H., Rather, S. A., Wani, S. H., Elyrs, A. S., Bilal, M., Huang, Q., ... Abbas, M. (2022). Heat Stress-Mediated Constraints in Maize (*Zea mays*) Production: Challenges and Solutions. *Front. Plant Sci.*, 13, 23. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.879366>.
 18. Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Zia-Ur-Rehman, M., Abbas, Z., & Hannan, F. (2017). Use of Maize (*Zea mays* L.) for phytomanagement of Cd-contaminated soils: a critical review. *Environmental Geochemistry and Health*, 39(2), 259–277. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-016-9826-0>.
 19. Xu, W., Lu, G., Dang, Z., Liao, C., Chen, Q., & Yi, X. (2013). Uptake and Distribution of Cd in Sweet Maize Grown on Contaminated Soils: A Field-Scale Study. *Bioinorganic Chemistry and Applications*, 2013(1), 8. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/959764>.
 20. Cheng, S.-F., Huang, C.-Y., Lin, Y.-C., Lin, S.-C., & Chen, K.-L. (2015). Phytoremediation of lead using corn in contaminated agricultural land — An *in situ* study and benefit assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 111, 72–77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.09.024>.
 21. Господаренко, Г. М. (2020). *Практикум з агрохімії*. Вид-во: Сік Груп Україна.
 22. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах. Постанова Кабінету Міністрів України № 1325 (2021). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text>.

Дата першого надходження рукопису до редакції: 12.01.2026
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 02.02.2026
 Дата публікації: 27.02.2026