

ОЦІНКА ЗАБЕЗПЕЧЕНОСТІ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ РУХОМИМИ ФОРМАМИ ЦИНКУ

Р.П. Паламарчук¹, О.М. Грищенко¹, І.М. Гульванський²,
С.Г. Брегеда³, І.В. Циганов⁴

¹Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України» (м. Київ, Україна)
e-mail: prp777@ukr.net; ORCID: 0000-0002-5965-1305
e-mail: grischenkoel@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1241-7183

²Придніпровський міжрегіональний центр державної установи
«Інститут охорони ґрунтів України» (с. Созонівка, Кіровоградська обл., Україна)
e-mail: obldezhrudjuchist@ukr.net; ORCID: 0009-0004-5941-2760

³Північно-східний міжрегіональний центр державної установи
«Інститут охорони ґрунтів України» (с. Степне, Полтавська обл., Україна)
e-mail: poltavaprc@ukr.net; ORCID: 0009-0007-5904-6547

⁴Запорізький регіональний центр державної установи
«Інститут охорони ґрунтів України» (м. Запоріжжя, Україна)
e-mail: zpgrunt@ukr.net; ORCID: 0009-0000-3478-9968

Наведено результати XI туру агрохімічного обстеження земель сільськогосподарського призначення на вміст рухомих сполук цинку, проведено їх аналіз та порівняння з даними IX і X турів. Це дасть можливість визначити динаміку забезпечення ґрунтів рухомими сполуками цинку та розробити заходи щодо поліпшення еколого-агрохімічного стану ґрунтів. Тренд зниження показника середньозваженого вмісту рухомих сполук цинку загалом по Україні (0,64 мг/кг) становить 20% порівняно з попереднім туром досліджень. По агрокліматичних зонах зниження сягає: в Лісостепу (0,61 мг/кг) — на 29,1%, у Степу (0,57 мг/кг) — на 16,2%, в Карпатському регіоні та зоні Полісся (0,78 мг/кг) на 18,8%. Лише у ґрунтах Закарпатської та Львівської обл. середньозважений вміст рухомих форм цинку відповідає середньому та низькому рівням забезпеченості. Аналіз результатів досліджень в розрізі адміністративних одиниць України засвідчив відсутність сільськогосподарських земель із дуже високим вмістом рухомих сполук цинку в 10 областях, з високим — у 11, з підвищеним і середнім — у 4 регіонах. Найвищий рівень забезпеченості цинком демонструють ґрунти Закарпатської обл., де середньозважений показник становить 2,00 мг/кг, найнижчий — Кіровоградської обл. — 0,28 мг/кг. Зберігається тенденція до зниження вмісту рухомих форм цинку в ґрунтах України із півночі на південь — від ґрунтів із низьким вмістом органічної речовини, невеликою ємністю катіонного обміну та значеннями $pH < 5,5$ до ґрунтів із близькою до нейтральної та лужної реакції ґрунтового розчину, високим вмістом органічної речовини і вбирною ємністю. Впродовж трьох останніх турів агрохімічного обстеження стабільне зростання демонструють лише групи ґрунтів із дуже низьким і низьким рівнем забезпечення цинком — від 85,1% у 2006–2010 рр. до 96,0% — у 2016–2020 рр., або на 10,9%.

Ключові слова: агрокліматична зона, агрохімічне обстеження, дефіцит, моніторинг.

ВСТУП

Забезпеченість ґрунтів рухомими формами цинку є надзвичайно актуальною темою в сучасній агрономії та ґрунтознавстві через ключову роль цього мікроелемента у життєдіяльності рослин і здоров'ї людини. Цинк є одним із найважливіших мікро-

елементів, що беруть участь у численних ферментативних процесах, регуляції гормонального балансу, фотосинтезі, синтезі ДНК і РНК, а також у формуванні імунітету рослин [1–4]. Дефіцит рухомих форм Zn у ґрунтах призводить до зниження врожайності, погіршення якості продукції, а також до виникнення «прихованого голоду» в харчовому ланцюгу, що є загрозою для

здоров'я людей [5–7]. Водночас Н.Т. Van et al. (2018) вказують, що накопичення цинку в ґрунті може спричинити значні екологічні проблеми, включаючи зниження родючості ґрунту та потенційну токсичність як для рослин, так і для мікроорганізмів [8].

За останні 15 років значна кількість досліджень була присвячена вивченню географічної поширеності дефіциту цинку в ґрунтах різних кліматичних зон, зокрема в Індії, Китаї, Африці та країнах Європи [9–11]. Рухомі форми Zn у ґрунті визначають біодоступність елемента для рослин, що залежить від фізико-хімічних властивостей ґрунту, зокрема рН, вмісту органічної речовини, карбонатів, а також від взаємодії з іншими хімічними компонентами [12–15].

В Україні питанню забезпечення ґрунтів мікроелементами приділяли увагу С.А. Балюк, М.М. Мірошніченко, А.І. Фатєєв, Н.А. Макаренко та ін. вітчизняні ґрунтознавці й екологи. Результати їх досліджень свідчать про поширення дефіциту рухомих форм цинку, що має регіональну специфіку, зумовлену поєднанням кліматичних, едафічних і агротехнічних чинників. Тому постійний моніторинг за вмістом цього важливого мікронутрієнта є актуальним для сучасної аграрної науки.

Мета і завдання дослідження — проаналізувати результати останніх трьох турів (2006–2020 рр.) еколого-агрохімічного обстеження земель сільськогосподарського призначення в Україні за вмістом рухомих форм цинку.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

За повідомленням Z. Hu, S. Gao [16] розрахунковий середній вміст Zn у материковій земній корі становить 75 мг/кг. С. Reimann et al. [17] наголошують, що така концентрація цинку може відрізнятись у понад 1000 разів. Причиною таких розбіжностей можуть бути як відмінності у материнській породі [18], так і антропогенний вплив [19]. Залежність вмісту цинку в ґрунтах від материнської породи відзначали у своїх працях В.І. Alloway [5],

D. Cicchella et al. [20] та інші науковці. Зокрема, Р.С. Nagajyoti et al. [21] вказують, що основні магматичні породи містять 240 мг/кг Zn, магматичні породи, збагачені кремнеземом — до 140 мг/кг. В осадових породах за повідомленнями J. Mertens & E. Smolders концентрація може коливатися від 20 до 200 мг/кг із найвищими значеннями у глинах і сланцях [22]. Дослідженнями Т.М. Єгорової [23] встановлено, що позитивна геохімічна і металогенічна спеціалізація підстильних гірських порід сприяє формуванню локальних територій природної екологічної забезпеченості цинком ґрунтів зони Степу.

В огляді FAO (2020) на основі досліджень показників родючості ґрунтів у зонах Лісостепу і Полісся відзначається загальна проблема виснаження поживних елементів та деградації ґрунтів, що ускладнює утримання доступних форм мікроелементів, зокрема Zn [24].

Низка досліджень показує, що велика частина орних земель України має низький вміст рухомих сполук цинку. Зокрема, Н. Макаренко зі співавт. [25] виявили низький коефіцієнт переходу Zn із ґрунту до рослин ($\approx 0,10$), що сигналізує про слабку мобільність Zn в українських ґрунтах. Вони класифікували потенціал мобільності на рівні «дуже низький» (≤ 21 мг/кг) до «високий» (≥ 78 мг/кг), відтак більшість територій України характеризуються дефіцитом Zn. М. Мірошніченко, С. Коваленко [26] встановили, що рухомі Zn мають істотну часову динаміку в орному шарі зональних ґрунтів Лівобережного Лісостепу, яка проявилася в збільшенні їхнього вмісту з весни до осені за кислої реакції середовища та зниженні Zn і Cu за близьких до нейтральних значень рН.

У наукових працях І.В. Шумигай, В.В. Коніщук, П.М. Душко [27] зафіксовано, що в умовах Київської (чорнозем типовий, середньосуглинковий) і Вінницької (сірий опідзолений, легкосуглинковий) обл. рівень забезпеченості рухомих формами становив відповідно 0,90–1,80 мг/кг і 1,05–1,56 мг/кг залежно від системи удобрення, у всіх досліджуваних локалітетах не

виявлені перевищення гранично допустимих концентрацій для важких металів.

Дослідженнями Т.І. Козлик із співавт. [28] встановлено, що у ґрунтах сільськогосподарського призначення лісостепової зони (Любарська ОТГ Житомирської обл.) середньозважений уміст рухомих сполук цинку знаходився на дуже низькому рівні забезпеченості. І.О. Пятковська та ін. [29] повідомляють, що 89,8% обстежених угідь Івано-Франківської обл. мають дуже низький та низький уміст рухомих сполук цинку, і лише 10,2% — це площі з середньою, підвищеною, високою та дуже високою забезпеченістю.

Істотний вплив на вміст валового цинку і рухомих форм цього елемента спричинили мілітарні дії. Дослідження у цьому напрямі лише тільки розпочато, однак перші результати вказують на погіршення еколого-токсикологічного стану земель сільськогосподарського призначення в результаті бойових дій. Зокрема, в Сумській обл. вченими Ю.О. Зайцева, О.М., Грищенко, С.А. Романової та І.О. Зайцевої [30] визначено перевищення фонових рівня вмісту цинку в дев'яти з десяти проб ґрунту, відібраних на місці падіння авіабомб та розбитої військової техніки. Вміст цинку у зразках із місць бойових дій у середньому перевищував фонове значення у 3,9 раза, а в окремих пробах — від 4,7 до 7,6 раза.

О.М. Грищенко, Р.П. Паламарчук, І.В. Циганов та ін. [31] повідомляють, що внаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС та осушення Каховського водосховища зросла потенційна небезпека забруднення навколишнього середовища частками пилу, утвореного після висихання мулу донних відкладів внаслідок вітрової ерозії та пилових бур. Встановлено, що вміст рухомих сполук цинку в таких об'єктах становить 55,06–123,83 мг/кг ґрунту, що у 2,4–5,4 раза перевищує ГДК, вміст валових форм знаходиться на рівні 71,01–262,4 мг/кг ґрунту залежно від локації відбору проб.

Тому, українські науковці консенсусно фіксують широко поширений дефіцит ру-

хомих форм Zn на орних землях, тоді як локальні підвищення валового Zn пов'язані з зонами бойових дій.

Отже, українські науковці консолідовано свідчать про дуже поширений дефіцит рухомих форм цинку на орних землях України, що становить агрономічну загрозу для врожайності та мікронутрієнтної цінності продукції. Паралельно існують локальні підвищення валового Zn в зонах пошкоджень через воєнні дії — ці ситуації вимагають екологічної оцінки і, за потреби, ремедіації. Для ефективного управління ґрунтовими ресурсами потрібен постійний агроекологічний моніторинг рухомих форм цинку.

Для вирішення цього питання в Україні з періодичністю раз у п'ять років Державною установою «Інститут охорони ґрунтів України» здійснюються заходи з еколого-агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення. Впродовж 2015–2020 рр. проведено XI тур агрохімічного обстеження земель сільськогосподарського призначення, зокрема і на вміст рухомих сполук цинку. У статті наводимо результати цього обстеження порівняно з даними IX (2006–2010 рр.) і X (2011–2015 рр.) турів. Це дасть можливість визначити динаміку забезпечення ґрунтів рухомими сполуками цинку та розробити заходи щодо поліпшення еколого-агрохімічного стану ґрунтів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Усі заплановані дослідження проводили за методами, визначеними Методикою проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення [32]. Зразки ґрунту відбирали з глибини 0–30 см відповідно до ДСТУ 4287:2004 [33]. Визначення вмісту рухомих сполук цинку виконували згідно з ДСТУ 4770.2:2007 [34]. Впродовж 2006–2010 рр. здійснено обстеження 25,9 млн га земель сільськогосподарського призначення, зокрема у 2011–2015 рр. — 18,7 млн га та в 2016–2020 рр. — 8579,6 га. У зв'язку з бойовими діями в зоні АТО та анексією Криму провести агрохімічне обстеження

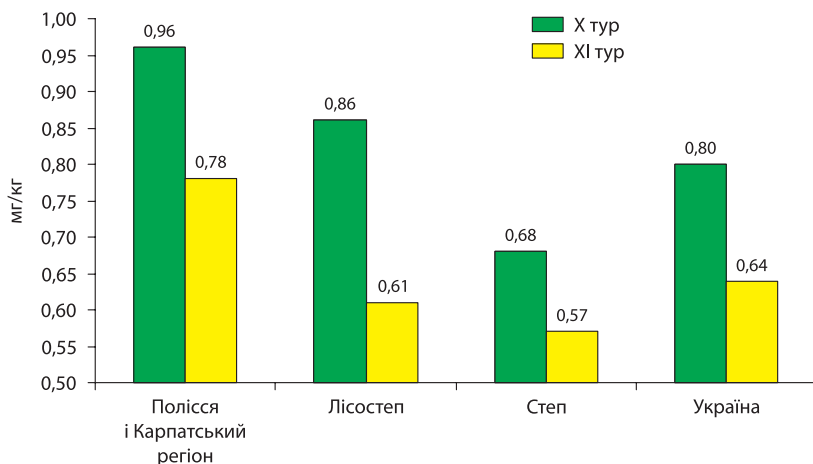


Рис. 1. Середньозважений вміст рухомих сполук цинку в ґрунті за X і XI тури обстеження, мг/кг

земель у Донецькій, Луганській обл. та АР Крим упродовж 2016–2020 рр. не було можливості.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За результатами агрохімічної паспортизації земель, забезпеченість ґрунтів України рухомими формами цинку залишається стабільно низькою, і цей тренд зберігається впродовж мінімум трьох останніх турів.

Середньозважений вміст цинку в ґрунтах України — 0,64 мг/кг — відповідає дуже низькому рівню забезпеченості (рис. 1) з трендом до зниження цього показника порівняно з попереднім туром досліджень на 20%.

Найвищим вмістом рухомих форм цинку характеризуються ґрунти Полісся і Карпатського регіону — у 2011–2015 рр. середньозважений показник знаходився на рівні 0,96 мг/кг, у 2016–2020 рр. — 0,78 мг/кг, спостерігається зниження на 18,8%.

У зоні Степу зафіксовано середньозважений показник місту рухомих форм фосфору у межах 0,57 мг/кг, що на 16,2% нижче за дані X туру досліджень. Найістотніше у площині відносних значень — на 29,1% відбулось зменшення вмісту рухомого цинку в ґрунтах лісостепової зони — від

0,86 мг/кг у 2011–2015 рр. до 0,61 мг/кг ґрунту впродовж 2016–2020 рр.

Аналіз результатів XI туру агрохімічного обстеження дає змогу зробити висновок, що за ступенем забезпеченості рухомими сполуками цинку 88,8% обстежених площ мають дуже низький вміст цього мікроелемента, 7,2 — низький, 2,0 — середній, 1,3 — підвищений, а 0,8% — високий та дуже високий (рис. 2).

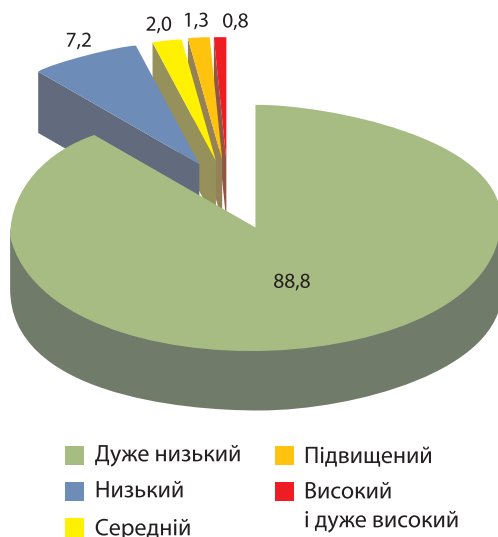


Рис. 2. Розподіл площ ґрунтів України за вмістом рухомих сполук цинку, %

Лише у Закарпатській та Львівській обл. середньозважений вміст рухомих форм цинку відповідає середньому та низькому рівням забезпеченості. Обстежені площі інших регіонів України забезпечені цинком на дуже низькому рівні (*табл.*). Так, у зоні власне Українського Полісся середньозважений показник уміс-

Характеристика ґрунтів за вмістом рухомих сполук цинку за результатами обстеження у 2016–2020 рр.

Область	Обстежена площа, тис. га	Площа земель сільськогосподарського призначення, віднесені за результатами обстеження до категорії забезпеченості, тис. га						Середньо- зважений показник, мг/кг ґрунту (ААБ* – рН 4,8)
		дуже низький <1,1 мг/кг	низький 1,1–1,5 мг/кг	середній 1,6–2,0 мг/кг	підвище- ний 2,1–3,0 мг/кг	високий 3,1–5,0 мг/кг	дуже високий >5,0 мг/ кг	
Волинська	273,1	220,6	36,0	9,3	5,3	2,0		0,72
Житомирська	419,1	416,6	2,5					0,42
Закарпатська	202,4	72,5	34,8	24,0	31,1	25,6	14,4	2,00
Івано- Франківська	216,1	161,8	32,3	12,4	6,5	2,7	0,4	0,80
Львівська	170,3	32,8	67,9	35,3	28,5	5,6	0,2	1,20
Рівненська	289,8	269,9	11,9	4,7	2,4	0,5	0,4	0,53
Чернігівська	324,6	312,9	9,4	1,6	0,7			0,53
Вінницька	536,4	531,3	3,7	0,9	0,5			0,60
Київська	654,7	590,8	35,9	12,4	8,9	5,1	1,5	0,70
Полтавська	371,7	363,9	7,0	0,7	0,1			0,50
Сумська	327,3	317,1	6,6	1,8	1,1	0,7		0,40
Тернопільська	317,3	251,4	49,1	12,8	3,9		0,1	0,90
Харківська	427,3	289,4	98,6	24,9	8,4	5,9	0,1	0,90
Хмельницька	466,6	454,0	9,0	1,9	0,8	0,8		0,50
Черкаська	409,9	392,3	12,4	3,4	1,8			0,40
Чернівецька	182,3	149,8	20,7	6,1	3,5	1,7	0,6	0,60
АР Крим**								
Дніпро- петровська	643,1	543,2	99,8					0,60
Донецька**								
Запорізька	467,9	467,9						0,60
Кіровоградська	410,0	409,8	0,1				0,1	0,28
Луганська**								
Миколаївська	551,9	535,1	7,1	6,0	2,0	1,3	0,4	0,40
Одеська	272,3	268,8	2,4	0,4	0,5		0,1	0,40
Херсонська	645,4	563,9	66,4	10,6	4,5		0,1	0,90

Примітка: * ААБ – ацетатно-амонійний буферний розчин; ** Інформація відсутня.

ту цинку в Житомирській обл. становив 0,42 мг/кг ґрунту, Рівненській і Чернігівській — по 0,53 мг/кг, Волинській — 0,72 мг/кг ґрунту.

Серед обстежених 1895,5 га сільськогосподарських угідь 78,4% ґрунтів мають дуже низький вміст рухомих сполук цинку, 10,3 — низький, 4,6 — середній, 3,9 — підвищений, 2,7% — високий і дуже високий. Варто зауважити, що Чернігівській обл. ґрунти двох останніх категорій відсутні, а в Житомирській визначено ґрунти лише з низьким (0,6% від обстежених площ) або дуже низьким (99,4%) вмістом рухомих сполук цинку.

У зоні Лісостепу найбільший вміст цинку відмічено в ґрунтах Тернопільської (0,85 мг/кг) і Харківської обл. (0,94 мг/кг). До категорії земель із дуже низьким забезпеченням належать 90,4% з 3693,5 тис. га обстежених площ, із низьким — 6,6%, середнім — 1,8%, землі, віднесені інших категорій, сумарно займають 1,3% досліджених угідь. У Вінницькій, Тернопільській, Черкаській і Полтавській обл. відсутні або майже відсутні землі, що можна віднести до категорії високого і дуже високого забезпечення рухомих цинком.

У зоні Степу обстежено 2990,6 тис. га земель сільськогосподарського призначення. З них 2788,7 тис. га (93,3%) забезпечені рухомих сполуками цинку на дуже низькому рівні, 5,9% — на низькому, інші категорії забезпечення 0,87% досліджених

площ. Серед регіонів зони найвищий рівень забезпеченості рухомих сполуками цинку встановлено лише в Херсонській обл. — 0,90 мг/кг ґрунту. Найнижчий рівень забезпеченості цинком зафіксовано у ґрунтах Кіровоградської обл. — 0,28 мг/кг ґрунту.

Тому, зберігається тенденція до зменшення вмісту рухомих форм цинку в ґрунтах України із півночі на південь — від ґрунтів із низьким вмістом органічної речовини, невеликою ємністю катіонного обміну та значеннями $pH < 5,5$ до ґрунтів із близькою до нейтральної та лужної реакції ґрунтового розчину, високим вмістом органічної речовини і вбирною ємністю.

Порівняння результатів трьох останніх турів агрохімічного обстеження дає змогу дійти висновку, що стабільне зростання демонструють лише групи ґрунтів із дуже низьким і низьким рівнем забезпечення цинком — від 85,1% у 2006–2010 рр. до 96,0% — у 2016–2020 рр., або на 10,9% (рис. 3).

Площі, які мають інші концентрації рухомих сполук у ґрунті істотно скоротилися: з середнім вмістом — майже у 5 разів (від 9,5% до 2,0%), з підвищеним — утричі (від 3,9% до 1,3%), з високим — удвічі (від 1,2 до 0,6%). Зростання у 2011–2015 рр. площ із високим (на 1,5%) та дуже високим (на 0,1%) вмістом цинку не знайшло підтвердження за результатами XI туру обстежень.

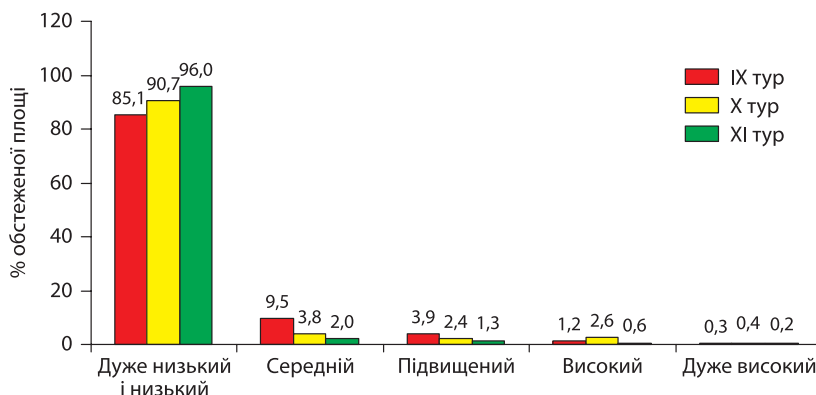


Рис. 3. Динаміка розподілу площ ґрунтів України за вмістом рухомих сполук цинку впродовж 2006–2020 рр. (IX–XI тури обстеження)

ВИСНОВКИ

Забезпеченість ґрунтів України рухомими формами цинку залишається стабільно низькою впродовж мінімум трьох останніх турів агрохімічного обстеження земель сільськогосподарського призначення (2006–2020 рр.). Водночас спостерігається негативна динаміка щодо цього показника у розрізі проаналізованих періодів. Тренд зниження показника середньозваженого вмісту рухомих сполук цинку загалом по Україні (0,64 мг/кг) становить 20% порівняно з попереднім туром досліджень. По агрокліматичних зонах зниження сягає: в Лісостепу (0,61 мг/кг) — на 29,1%, у Степу (0,57 мг/кг) — на 16,2%, в Карпатському регіоні та зоні Полісся (0,78 мг/кг) — на 18,8%. Лише у ґрунтах Закарпатської та Львівської обл. середньозважений вміст рухомих форм цинку відповідає середньому та низькому рівням забезпеченості. Аналіз результатів досліджень у розрізі адміністративних одиниць України засвідчив

відсутність сільськогосподарських земель із дуже високим вмістом рухомих сполук цинку у 10 областях, з високим — у 11, з підвищеним і середнім — у 4 регіонах нашої держави. Найвищий рівень забезпеченості цинком демонструють ґрунти Закарпатської обл., де середньозважений показник становить 2,00 мг/кг, найнижчий — Кіровоградської обл. — 0,28 мг/кг. Отримані дані дають можливість агровиробникам побудувати політику господарювання з урахуванням дефіциту цинку в орних землях, убезпечити себе від недоотримання врожаїв та низької якості продукції.

Результати, висвітлені у статті, одержані до початку широкомасштабних бойових дій, тому не в змозі надати об'єктивну оцінку щодо вмісту цинку в місцях бойових зіткнень. Отже, наразі виникає нагальна необхідність широкого екологоагрохімічного обстеження земель, які постраждали внаслідок мілітарних дій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cakmak, I. (2008). Enrichment of Cereal Grains with Zinc: Agronomic or Genetic Biofortification? *Plant and Soil*, 302, 1–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>.
2. Broadley, M., Brown, P., Cakmak, I., Rengel, Z., & Zhao, F. (2012). Chapter 7 — Function of nutrients: micronutrients. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, 191–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00007-8>.
3. Wessells, K. R., & Brown, K. H. (2012). Estimating the Global Prevalence of Zinc Deficiency: Results Based on Zinc Availability in National Food Supplies and the Prevalence of Stunting. *PLOS ONE* 7(11), e50568. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050568>.
4. Prasad, A. S. (2013). Discovery of Human Zinc Deficiency: Its Impact on Human Health and Disease. *Advances in nutrition*, 4, 176–190. DOI: <https://doi.org/10.3945/an.112.003210>.
5. Alloway, B. J. (2008). Zinc in soils and crop nutrition. International Fertilizer Industry Association. Second edition. 139 p. URL: <https://www.topsoils.co.nz/wp-content/uploads/2014/09/Zinc-in-Soils-and-Crop-Nutrition-Brian-J.-Alloway.pdf>.
6. Alloway, B. J. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *Environmental Geochemistry and Health*, 31, 537–548. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4>.
7. Khokhar, J. S., Broadley, M. R., & Ander, E. L. (2024). Soil zinc surveillance frameworks can inform human nutrition studies: opportunities in India. *Frontiers in Soil Science*, 4, 1421652. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1421652>.
8. Van, H. T., Hoang, V., Luong Thi, Q. N., & Nguyen, V. (2024). Effects of Zn pollution on soil: Pollution sources, impacts and solutions. *Results in Surfaces and Interfaces*, 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100360>.
9. Kabata-Pendias, A. (2010). Trace elements in soils and plants: 4th Edition. Boca Raton. CRC Press. URL: <https://doi.org/10.1201/b10158>.
10. Gupta, S., Brazier, A. K. M., & Lowe, N. M. (2020). Zinc deficiency in low- and middle-income countries: prevalence and approaches for mitigation. *J. Hum. Nutr. Diet*. DOI: <https://doi.org/10.1111/jhn.12791>.
11. Khan, S. T., Malik, A., Alwarthan, A., & Shaik, M. R. (2022). The enormity of the zinc deficiency problem and available solutions; an overview. *Arabian Journal of Chemistry*, 15, 3. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2021.103668>.
12. Azouzi, R., Charef, A., & Hamzaoui, A. H. (2015). Assessment of effect of pH, temperature and organic matter on zinc mobility in a hydromorphic soil. *Environ Earth Sci*, 74, 2967–2980. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4328-4>.
13. Baran, A., Wieczorek, J., & Mazurek, R. (2018). Potential ecological risk assessment and predicting zinc accumulation in soils. *Environ Geochem Health*, 40, 435–450. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9924-7>.
14. Hou, S., Zheng, N., & Tang, L. (2019). Effect of soil pH and organic matter content on heavy metals

- availability in maize (*Zea mays* L.) rhizospheric soil of non-ferrous metals smelting area. *Environ Monit Assess*, 191, 634. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7793-5>.
15. Xu, D., Shen, Z., & Dou, C. (2022). Effects of soil properties on heavy metal bioavailability and accumulation in crop grains under different farmland use patterns. *Sci Rep*, 12, 9211. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13140-1>.
 16. Hu, Z., & Gao, S. (2008). Upper crustal abundances of trace elements: A revision and update. *Chemical Geology*, 253(3–4), 205–221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.05.010>.
 17. Reimann, C., Fabian, K., Birke, M., Filzmoser, P., Demetriades, A., Négrel, P., ... Sadeghi, M. (2018). GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. *Applied geochemistry*, 88, 302–318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.01.021>.
 18. De Vos, W., Tarvainen, T., Salminen, R., Reeder, S., De Vivo, B., Demetriades, A., ... Petersell, V. (2006). *Geochemical Atlas of Europe: Part 2: Interpretation of geochemical maps, additional tables, figures, maps, and related publications*. Espoo: Geological Survey of Finland.
 19. Luo, L., Ma, Y., Zhang, S., & Wei, D. (2009). An inventory of heavy metal inputs to agricultural soils in China. *Journal of environmental management*, 90, 2524–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.01.011>.
 20. Cicchella, D., Giaccio, L., Dinelli, E., Albanese, S., Lima, A., Zuzolo, D., ... De Vivo, B. (2015). GEMAS: Spatial distribution of chemical elements in agricultural and grazing land soil of Italy. *Journal of Geochemical Exploration*, 154, 129–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.11.009>.
 21. Nagajyoti, P. C., Lee, K. D. & Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ. Chem. Lett.*, 8, 199–216. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10031-010-0297-8>.
 22. Mertens, J., & Smolders, E. (2013). Zinc. In: B. Alloway (Eds.), *Heavy Metals in Soils. Environmental Pollution*, 22. Springer, Dordrecht. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7_17.
 23. Єгорова, Т. М. (2020). Вплив геохімічної спеціалізації гірських порід на екологічні особливості ґрунтів. *Агроекологічний журнал*, 2, 24–30. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2020.207677>.
 24. FAO. 2020. Overview of soil conditions of arable land in Ukraine — Study case for steppe and forest-steppe zones. Budapest. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca7761en>.
 25. Makarenko, N., Bondar, V., Makarenko, V., & Symochko, L. (2021). Zinc deficiency in soils of Ukraine: possible causes and regulatory mechanisms. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*, 11(4), 857–866. DOI: <https://doi.org/10.31407/ijees11.424>.
 26. Мірошніченко, М., & Коваленко, С. (2023). Просторово-часова нерівномірність забезпечення ґрунтів рухомими мікроелементами. *Вісник аграрної науки*, 4(841), 5–14. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202304-01>.
 27. Шумигай, І. В., Коніщук, В. В., & Душко, П. М. (2022). Біогеохімічні особливості важких металів агроєкосистем Лісостепу України. *Агроекологічний журнал*, 4, 105–114. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2022.273256>.
 28. Козлик, Т. І., Дрозд, Б. Є., Романчук, Л. М., & Менчинський, Ю. С. (2024). Забезпеченість рухомими сполуками мікроелементів орних земель лісостепової зони Житомирської області. *Науковий збірник «Охорона ґрунтів». Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Моніторинг ґрунтів. Реалії, виклики, перспективи»* (с. 86–89). URL: https://www.iogu.gov.ua/literature/11_10_2024.pdf.
 29. Пятковська, І. О., Матвійчук, В. О., Налужний, Р. І., & Сончак, А. А. (2024). Забезпеченість ґрунтів Івано-Франківської області рухомими сполуками цинку. *Науковий збірник «Охорона ґрунтів». Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Моніторинг ґрунтів. Реалії, виклики, перспективи»* (с. 90–94). URL: https://www.iogu.gov.ua/literature/11_10_2024.pdf.
 30. Зайцев, Ю. О., Грищенко, О. М., Романова, С. А., & Зайцева, І. О. (2022). Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського районів Сумської обл. *Агроекологічний журнал*, 3, 136–149. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>.
 31. Грищенко, О. М., Паламарчук, Р. П., Циганов, І. В., Сироватко В. О., & Яценко, Ю. М. (2024). Уміст важких металів у донних відкладах осушеного Каховського водосховища. *Агроекологічний журнал*, 1, 53–65. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2024.299939>.
 32. Яцук, І. П., & Балюк, С. А. (Ред.). (2019). *Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення* (2-ге вид.). Київ: Вік-Принт. URL: <https://www.iogu.gov.ua/literature/instructions/1.pdf>.
 33. ДСТУ 4287:2004. Якість ґрунту. Відбирання проб. (2005). [Чинний від 2005–07–01]. Київ: Держспоживстандарт України.
 34. ДСТУ 4770.2:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук цинку в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії. (2009). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України.

Стаття надійшла до редакції журналу 15.07.2025