

ПРОСТОРОВА МІНЛИВІСТЬ ВМІСТУ РУХОМИХ ФОРМ КАДМІЮ У ҐРУНТАХ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛ. ЗА ВОЄННОГО ВПЛИВУ

Р.П. Паламарчук¹, О.М. Грищенко¹, Ю.М. Яценко¹,
В.М. Нечитайло², О.В. Міненко²

¹ Державна 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

e-mail: derjgrunt@ukr.net; ORCID: 0009-0006-3402-3093

² Північно-східний міжрегіональний центр Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України» (с-ще Степне, Полтавський р-н, Полтавська обл., Україна)

e-mail: poltavaptc@ukr.net; ORCID: 0009-0001-6366-6155;

ORCID: 0009-0009-0825-6426

У роботі проаналізовано результати агрохімічного обстеження земель сільськогосподарського призначення, що зазнали впливу бойових дій на території Ізюмського, Харківського та Чугуївського р-нів Харківської обл. Ґрунти досліджених ділянок характеризуються високою та середньою природною родючістю, частина з них віднесена до категорії особливо цінних ґрунтів Степової Лівобережної провінції. За результатами проведених досліджень встановлено істотне підвищення вмісту рухомих сполук кадмію в ґрунтах обстежених ділянок у 3,2 раза порівняно з довоєнним рівнем (0,05 мг/кг). Просторова нерівномірність розподілу елемента відображає як інтенсивність бойових дій, так і вплив локальних ґрунтових властивостей на міграцію важких металів. Встановлено, що серед 16 обстежених ділянок лише одна за середньозваженим вмістом рухомих сполук кадмію (0,07 мг/кг) може бути віднесена до незабруднених. Три ділянки мають помірний рівень забруднення (0,20 мг/кг), а дванадцять — слабкий (0,14–0,17 мг/кг) рівень забруднення. Розподіл площ за рівнями забруднення показав, що 69,1% обстежених земель характеризуються слабким рівнем, 24,0% — помірним, а 6,9% площ залишаються умовно чистими, без виявленого забруднення рухомих сполуками кадмію. Перевищення гранично допустимої концентрації (0,7 мг/кг) не зафіксовано, що свідчить про відносно безпечний рівень забруднення та відсутність екологічного ризику для подальшого сільськогосподарського використання. Просторова неоднорідність вмісту кадмію вказує на локальний характер його накопичення, зумовлений впливом техногенних джерел. Основними чинниками цього впливу є ведення активних бойових дій — детонація боєприпасів, згоряння військової техніки, руйнування інженерних споруд та промислових об'єктів, у конструкційних матеріалах яких використовуються кадмієві сплави та захисні покриття. Хоча поточний рівень забруднення не становить безпосередньої екологічної загрози, результати досліджень підкреслюють необхідність проведення системного моніторингу для відстеження динаміки міграції кадмію у часі та просторових масштабах, особливо в районах з локальними осередками забруднення.

Ключові слова: агрохімічне обстеження, гранично допустима концентрація, ґрунт, мілітарні дії, моніторинг, рівень забруднення.

ВСТУП

Кадмій — це важкий метал із високою токсичністю та тривалим періодом напіввиведення з організму людини, який може становити від кількох років до десятиліть. Основними антропогенними джерелами

забруднення кадмієм є видобуток і збагачення руд, металургійне виробництво, застосування мінеральних добрив у сільському господарстві (особливо фосфорних) і промислові викиди. З огляду на здатність до біогеохімічного перенесення у ланцюгу ґрунт — рослина — людина, кадмій становить значну загрозу для продовольчої

© Р.П. Паламарчук, О.М. Грищенко, Ю.М. Яценко,
В.М. Нечитайло, О.В. Міненко, 2025

безпеки та здоров'я населення [1]. Зокрема, Cd накопичується в кортикальному шарі нирок і спричиняє нефротоксичність, демінералізацію кісткової тканини та підвищує ризик серцево-судинних захворювань, а за довготривалого впливу проявляє потенційну канцерогенність [2].

Біодоступність Cd у ґрунтах визначається рівнем рН, вмістом органічної речовини, окисно-відновними умовами та концентрацією конкурентних іонів (Zn, Ca). У кислих ґрунтах кадмій перебуває у більш рухомій формі та легше засвоюється кореневою системою рослин, що підвищує ризик його накопичення у зернових і овочевих культурах [3].

Основними шляхами надходження кадмію (Cd) до організму людини є харчовий — через споживання продуктів, отриманих із забруднених зернових культур, коренеплодів, листових овочів, а також м'ясо-молочних продуктів у разі засмічення сіножатей і пасовищ та інгаляційний — внаслідок вдихання пилу, промислових викидів і тютюнового диму [4; 5]. Сукупна дія цих чинників зумовлює високий токсикологічний ризик кадмію, що визначає його як один із пріоритетних елементів екоотоксикологічного моніторингу довкілля та ключовий об'єкт для формування науково обґрунтованої політики у сфері громадського здоров'я.

З початком російського вторгнення на територію України зросла небезпека механічної, хімічної та фізичної деградації ґрунтів унаслідок бойових дій. Рівні забруднення ґрунтів важкими металами у таких зонах часто перевищують санітарно-гігієнічні норми, до того ж найвищі концентрації спостерігаються для Pb, Zn та Cd [6].

Мета і завдання дослідження — визначити вплив бойових дій на рівень забруднення земель сільськогосподарського призначення кадмієм та оцінити можливість їх подальшого використання для вирощування польових культур.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Кадмій входить до складу багатьох технічних матеріалів і компонентів боєприпа-

сів, тому бойові дії можуть сприяти його локалізації в ґрунті, підвищуючи екологічні ризики для агроєкосистем і продовольчої безпеки [7].

Основні механізми посилення забруднення включають: механічне руйнування (кратери, воронки) з вивільненням металів; аерогенне перенесення пилу та часток із уламків техніки [8]; руйнування гідротехнічних споруд і повторне залучання у кругообіг донних відкладів, збагачених важкими металами [9]. Ґрунти у зонах бойових дій можуть забруднюватися кадмієм із продуктів корозії, металів, згорілих матеріалів і уламків боєприпасів. Це підтверджують дослідження ґрунтів післявоєнних конфліктів в Іраку, Кувейті та Україні.

Так, R. Hamad, H. Balzter та K. Kolo [10], дослідивши забруднення ґрунтів Національного парку Халгурд-Сакран (Курдистан, Ірак) важкими металами (Cu, Pb, Zn, Ni, Co та Mn) після розмінування території контрольованими вибухами, встановили, що рівні забруднення варіюють від дуже високих до помірних. Автори дійшли висновку, що детонація мін спричинила накопичення залишків важких металів у ґрунті, небезпечних для рослинності, тварин і людини.

T. Hussain та M.A. Gondal [11] довели, що після війни у Перській затоці 1990-х років на Близькому Сході спостерігається значне розповсюдження важких металів (до 60 км) через випадання атмосферних опадів із хмар, утворених під час нафтових пожеж у Кувейті.

За даними Державної установи «Інститут охорони ґрунтів України», у зонах бойових дій Сумського та Охтирського р-нів Сумської обл. виявлено перевищення вмісту кадмію у 1,4 раза порівняно з фоновими значеннями [12].

O. Bonchkovskiy та співавт. [13] встановили, що всі проби ґрунтів, відібрані з вирв після вибухів, містили підвищені концентрації важких металів, зокрема Cu, Pb та Zn. Однак їхній вміст переважно перевищував фонові значення лише у 1,1–1,5 раза, що не виходить за межі гранично допустимих концентрацій (ГДК) в

Україні. Водночас місця падіння гелікоптерів і ракет демонстрували критичні рівні забруднення.

М. Solokha та співавт. [14] виявили підвищення вмісту важких металів у ґрунтах Харківської обл. у місцях розташування залишків військової техніки протягом 2023–2024 рр. Зокрема, в 2023 р. вміст сполук кадмію в окремих зразках ґрунту перевищував ГДК у 8,5 раза, а вже в 2024 р. — у 9,77 раза. Така негативна динаміка зумовлена міграцією кадмію у ґрунтового профілі внаслідок вимивання його сполук талими та дощовими водами, що сприяє їх поширенню за межі первинних осередків забруднення.

Отже, для оцінки потенційних екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням ґрунтів кадмієм у зонах бойових дій, необхідне системне проведення моніторингових досліджень агрохімічного стану ґрунтового покриву.

**МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ
ДОСЛІДЖЕНЬ**

Дослідження виконано відповідно до договору з Міністерством освіти і науки України ДЗ / 168-2025 від 12.02.2025 «Вивчення агрохімічного стану та впливу бойових дій на землях сільськогосподарського призначення для забезпечення сталого агропродукування».

Об'єктом досліджень були 318 проб ґрунту, відібраних із 16 земельних ділянок загальною площею 1389,3181 га, що зазнали впливу бойових дій на території Ізюмського, Харківського та Чугуївського р-нів Харківської обл. (табл. 1).

У табл. 2 наведено результати фіксації наслідків бойових дій на досліджуваних територіях, виявлених землевласниками після відходу російських окупаційних військ.

Ґрунти досліджуваних ділянок характеризуються високою та середньою природною родючістю. Окремі з них (53е, 54д, 54е, 58е) належать до особливо цінних ґрунтів Степової Лівобережної провінції (табл. 3).

Для підвищення точності оцінювання агрохімічного стану ґрунтового покриву застосовано деталізовану схему відбору проб. Земельні масиви поділяли на елементарні ділянки площею до 5 га, що істотно менше порівняно зі стандартною щільністю сітки під час агрохімічної паспортизації. Такий підхід забезпечує вищу просторову роздільну здатність, дає змогу точніше локалізувати осередки забруднення або деградації ґрунтів і формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо їх подальшого використання.

Відбір проб ґрунту здійснювали відповідно до вимог ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб», із застосуван-

Таблиця 1. Місця відбору проб ґрунту на території Харківської обл.

№ ділянки	Місце відбору
1	с. Миколаївка Оскільської ТГ Ізюмського р-ну
2, 3	с. Рідне Барвінківської ТГ Ізюмського р-ну
4, 5, 6	с-ще Рогань Роганської селищної громади Харківського р-ну
6, 7	с-ще Докучаєвське Роганської ТГ Харківського р-ну
8	с. Бригадирівка Ізюмської ТГ Ізюмського району
9	с-ще Малинівка Малинівської ТГ Чугуївського р-ну
10	с-ще Гракове Чкаловської ТГ Ізюмського р-ну
11, 12	с. Капитолівка Оскільської ТГ Ізюмського р-ну
13	с. Олександрівка Куньєвської ТГ Ізюмського р-ну
14	с. Левківка Ізюмської ТГ Ізюмського р-ну
15	с. Поляна Куньєвської ТГ Ізюмського р-ну
16	с. Комарівка Оскільської ТГ Ізюмського р-ну

Таблиця 2. Дані про ушкодження території внаслідок ведення бойових дій

№ ділянки	Інформація про мілітарний вплив
1	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, у тому числі касетними боеприпасами, пересування військової техніки. Виявлено значну кількість виврв завглибшки 40–50 см та діаметром до 1,5 м
2	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено 16 виврв завглибшки 1,0–1,5 м та діаметром 3–4 м, фортифікаційні споруди, сліди пожеж, розливи нафтопродуктів, знищену техніку та близько 760 протитанкових мін і касетних боеприпасів
3	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, детонація протитанкових мін, пересування військової техніки. Виявлено 10 виврв завглибшки 1,0–1,5 м та діаметром 3 м, фортифікаційні споруди, сліди пожеж, розливи нафтопродуктів, знищену техніку та близько 300 протитанкових мін і касетних боеприпасів
4	Артилерійські та мінометні обстріли. Виявлено незначну кількість виврв завглибшки до 1 м, залишки боеприпасів, зокрема касетні та їх носії
5	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, вибухи під час детонації мін і розтяжок, пересування військової техніки. Виявлено сліди пожеж, розливи нафтопродуктів
6	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено численні поверхневі пошкодження, 1 виврв завглибшки 0,5 м та діаметром 5 м, залишки фортифікаційних споруд, сліди пожеж, значну кількість осколків
7	Мінування, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено численні поверхневі пошкодження, 3 виврви завглибшки 0,7 м та діаметром близько 10 м, залишки фортифікаційних споруд, сліди пожеж, знищену техніку та значну кількість осколків
8	Артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено бліндажі та окопи, сліди пожеж
9	Мінування, авіаційні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено численні поверхневі пошкодження, 5 виврв завглибшки від 0,5 до 1 м та діаметром близько 1,5 м, значну кількість боеприпасів та їх залишків
10	Мінування, ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено 7 виврв завглибшки 0,5–1,0 м та завширшки 1–1,5 м, значну кількість боеприпасів
11, 12	Ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено виврви завглибшки до 1 м і завширшки 1,5 м, залишки зброї та боеприпасів
13	Обстріли, пересування військової техніки. Виявлено значну кількість виврв від касетних боеприпасів завглибшки близько 0,5 м і завширшки 1,5 м, залишки зброї та боеприпасів, зокрема фрагменти ракет
14	Ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено капоніри, сліди пожеж, велику кількість виврви завглибшки до 1,5 м і завширшки до 2 м, залишки зброї та боеприпасів, фрагменти ракет
15	Ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено 5 виврв завглибшки до 0,8 м і завширшки до 1,5 м, залишки зброї та боеприпасів, фрагменти ракет
16	Ракетні, артилерійські та мінометні обстріли, пересування військової техніки. Виявлено 10 виврв завглибшки до 0,5 м і завширшки до 1,5 м, залишки зброї та боеприпасів, фрагменти ракет

Таблиця 3. Агровиробничі групи ґрунтів на обстежених ділянках

№ ділянки	Шифр та назва агровиробничої групи
1	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкові і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті, 67е — чорноземи звичайні сильнозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті
2	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкові і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті, 66е — чорноземи звичайні середньозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті
3	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкові і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 66е — чорноземи звичайні середньозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті
4	54е — чорноземи типові середньогумусні важкосуглинкові (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 55е — чорноземи типові і чорноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті, 56е — чорноземи типові і легкоглинисті і чорноземи сильнореградовані середньозмиті важкосуглинкові
5	49е — темно-сірі опідзолені і реградовані ґрунти та чорноземи опідзолені і реградовані слабозмиті важкосуглинкові, 54д — чорноземи типові середньогумусні середньосуглинкові (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 54е — чорноземи типові середньогумусні важкосуглинкові (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 55е — чорноземи типові і чорноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті
6, 7	54е — чорноземи типові середньогумусні важкосуглинкові (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 55е — чорноземи типові і чорноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті, 56е — чорноземи типові і легкоглинисті і чорноземи сильнореградовані середньозмиті важкосуглинкові
8	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкові і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті, 66е — чорноземи звичайні середньозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті, 89е — чорноземи середньо- і сильносолонцюваті на щільних глинах слабозмиті важкосуглинкові, 215е — розмиті важкосуглинкові і легкоглинисті ґрунти і відходи рихлих лесовидних порід
9	55е — чорноземи типові і чорноземи сильнореградовані слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті, 53е — чорноземи типові малогу́мусні та чорноземи сильнореградовані важкосуглинкові (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 54е — чорноземи типові середньогумусні важкосуглинкові (<i>особливо цінні ґрунти</i>)
10	53е — чорноземи типові малогу́мусні та чорноземи сильнореградовані важкосуглинкові (<i>особливо цінні ґрунти</i>)
11	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкові і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті
12	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкові і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті, 67е — чорноземи звичайні сильнозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті
13	58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкові і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>), 65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті
14	65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті
15, 16	65е — чорноземи звичайні слабозмиті важкосуглинкові і легкоглинисті, 58е — чорноземи звичайні середньогумусні глибокі важкосуглинкові і легкоглинисті (<i>особливо цінні ґрунти</i>)

ням сучасного GPS-обладнання для фіксації координат точок відбору. Проби відбирали з орного шару (0–30 см), який є репрезентативним для оцінки техногенного забруднення, оскільки саме в цьому горизонті зосереджуються основні процеси акумуляції рухомих форм важких металів і відбувається їхній контакт із кореневими системами рослин.

Лабораторний аналіз проводили в атестованій лабораторії Північно-східного міжрегіонального центру ДУ «Держґрунтоохорона», сертифікованій відповідно до вимог ДСТУ ISO 10012:2025. Визначення вмісту рухомих сполук кадмію у ґрунтах виконували згідно з чинним нормативно-методичним документом ДСТУ 4770.3:2007 [15].

Оцінку еколого-токсикологічного стану ґрунтів за вмістом рухомих сполук кадмію та визначення придатності земельних ділянок для вирощування сільськогосподарських культур виконували шляхом порівняння фактичних концентрацій із показниками довоєнного періоду, ГДК відповідно до чинних нормативів [16] та групування ґрунтів за вмістом рухомих форм елементів-забруднювачів [17].

Для оцінки однорідності вибірки та достовірності отриманих середніх значень визначали коефіцієнт варіації (V , %), який відображає ступінь розсіювання окремих показників відносно середнього арифметичного та слугує критерієм статистичної однорідності даних. Згідно з класифікацією, варіація вважається: слабкою за $V \leq 5\%$, помірною — 6–10%, значною — 10–20%, великою — 21–50%, дуже великою — $V > 50\%$.

Статистичну обробку експериментальних даних проводили із застосуванням програмних пакетів Microsoft Excel та Statistica 6.0, що забезпечувало коректність розрахунків, перевірку достовірності результатів і побудову аналітичних залежностей між досліджуваними показниками.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Кадмій (Cd) належить до високотоксичних важких металів із вираженою здат-

ністю до біоаккумуляції в екосистемах. Він легко поглинається рослинами, особливо зерновими культурами та овочами, переходить у харчовий ланцюг і становить потенційну небезпеку для здоров'я людини. Надходження кадмію в ґрунт може відбуватися як внаслідок природних процесів (вивітрювання мінералів, атмосферні опади), так і через антропогенний вплив, зокрема, бойові дії.

В умовах збройних конфліктів одним із основних джерел надходження кадмію (Cd) у довкілля є детонація боєприпасів, згоряння військової техніки, а також руйнування інженерних споруд і промислових об'єктів, у конструкціях яких застосовуються кадмієві сплави та захисні покриття. Внаслідок цих процесів формується локальне забруднення ґрунтів рухомими формами кадмію — водорозчинними та слабкозв'язаними сполуками, які характеризуються високою мобільністю, біодоступністю та значним рівнем екотоксичності.

За результатами досліджень встановлено, що середньозважений уміст кадмію в ґрунтах обстежених територій становить 0,16 мг/кг, що відповідає слабкому рівню забруднення. Помірний рівень забруднення зафіксовано на трьох ділянках (№№ 2, 3, 15), де середньозважений уміст кадмію досягав 0,20 мг/кг. Слабкий рівень забруднення спостерігається на більшості ділянок (12 із 16), зі значеннями у межах 0,10–0,17 мг/кг, тоді як на ділянці № 7 концентрація елемента була найменшою — 0,07 мг/кг, що свідчить про відсутність перевищення фонових значень (табл. 4).

У межах елементарних ділянок вміст рухомих сполук кадмію коливався від 0,05 до 0,33 мг/кг, а коефіцієнт варіації становив — від 9,9 до 70,3%. Такий широкий діапазон свідчить про виражену просторову неоднорідність розподілу рухомих сполук кадмію у ґрунтового покриві.

Найбільшу варіабельність (70,3%) зафіксовано в межах землеводін с-ща Рогань Роганської селищної громади Харківського р-ну (ділянка № 5), що, ймовірно, зумовлено наявністю локальних осередків накопичення кадмію у місцях руйнувань,

Таблиця 4. Вміст рухомих сполук кадмію у ґрунтах земельних ділянок, які зазнали впливу бойових дій на території Харківської обл.

№ ділянки	Площа ділянки, га	Середньозважений вміст, мг/кг ґрунту	Рівень забруднення	Стандартна помилка	Середньоквадратичне відхилення	Коефіцієнт варіації	Min	Max
1	95,5780	0,15	Слабке	0,01	0,04	23,9	0,09	0,24
2	38,2468	0,20	Помірне	0,01	0,02	9,9	0,16	0,22
3	16,7096	0,20	Помірне	0,01	0,03	14,9	0,17	0,23
4	50,0000	0,17	Слабке	0,01	0,04	22,3	0,13	0,23
5	40,0000	0,11	Слабке	0,02	0,08	70,3	0,04	0,33
6	54,4026	0,10	Слабке	0,01	0,04	37,6	0,06	0,18
7	27,7619	0,07	—	0,01	0,02	29,5	0,05	0,11
8	279,4175	0,16	Слабке	0,01	0,04	25,3	0,09	0,20
9	101,3783	0,17	Слабке	0,01	0,04	25,6	0,10	0,22
10	96,2857	0,16	Слабке	0,01	0,04	22,4	0,11	0,23
11	31,9314	0,16	Слабке	0,01	0,03	19,8	0,10	0,19
12	89,5741	0,15	Слабке	0,01	0,04	26,1	0,09	0,25
13	136,3257	0,17	Слабке	0,01	0,03	16,4	0,13	0,22
14	140,0085	0,15	Слабке	0,01	0,03	21,1	0,10	0,21
15	136,703	0,20	Помірне	0,01	0,03	14,8	0,10	0,23
16	54,9950	0,14	Слабке	0,01	0,04	28,5	0,09	0,23
Середньозважений вміст	1389,3181	0,16	Слабке					
Стандартна помилка		0,01						
Середньоквадратичне відхилення		0,04						
Коефіцієнт варіації		22,5						
Min		0,07						
Max		0,20						

вибухів або згорання військової техніки, а також морфогенетичними особливостями ґрунтів. На відміну від інших ділянок, представлених чорноземами, ця територія мала чергування чорноземів і темно-сірих опідзолених ґрунтів, які відзначаються нижчою буферною здатністю та меншою ємністю поглинання, що зменшує їхню здатність фіксувати важкі метали у верхньому горизонті. У більшості випадків коефіцієнт варіації перебував у межах 15–30%, що свідчить про помірну неоднорідність просторового розподілу кадмію.

Підвищена варіабельність може розглядатися як індикатор техногенного навантаження та просторової складності процесів розсіювання кадмію на територіях, що зазнали воєнного впливу.

За результатами досліджень встановлено, що переважають території зі слабким рівнем забруднення, які охоплюють близько 60–70% загальної площі досліджених ґрунтів. Помірний рівень забруднення зафіксовано приблизно на 25–30% площі, що вказує на локальний характер накопичення кадмію, переважно у зонах інтенсивного

воєнного впливу. Частка ділянок із мінімальним або відсутнім забрудненням є незначною (до 10%), що підтверджує масштабність впливу бойових дій на верхній (0–30 см) шар ґрунту (*рис.*).

Отже, виявлено істотне підвищення вмісту рухомих сполук кадмію у ґрунтах обстежених земельних ділянок у післявоєнний період порівняно з довоєнним станом (*табл. 5*). Після припинення бойових дій на даних територіях, середньозважений

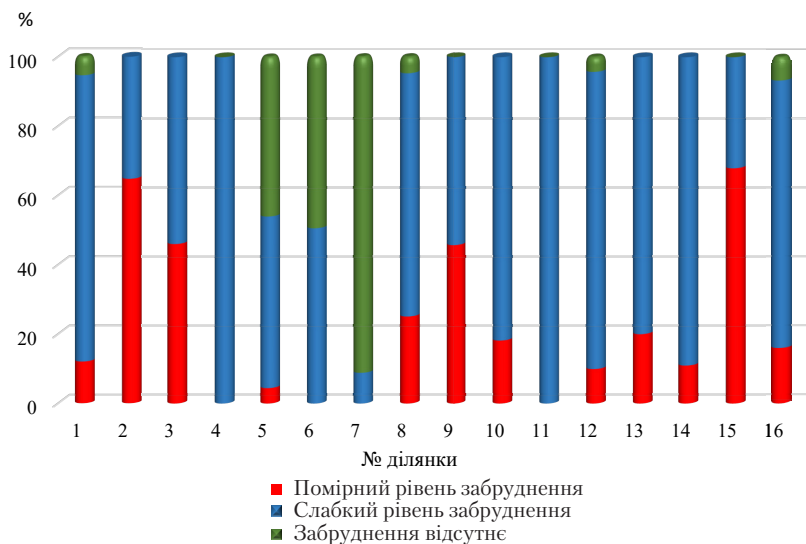
уміст кадмію становив 0,16 мг/кг ґрунту, що відповідає слабкому рівню забруднення. Коливання значень спостерігалось в межах 0,07–0,20 мг/кг, що свідчить про просторову неоднорідність розподілу забруднення, зумовлену різною інтенсивністю бойових дій та характером техногенного навантаження на окремих ділянках.

Для порівняння, у довоєнний період середньозважений вміст кадмію сягав лише 0,05 мг/кг, що засвідчило про відсутність

Таблиця 5. Порівняльна оцінка вмісту рухомих сполук кадмію у ґрунтах у довоєнний та післявоєнний періоди

№ ділянки	Уміст кадмію у післявоєнний період		Уміст кадмію у довоєнний період		± до контролю
	мг/кг	рівень забруднення	мг/кг	рівень забруднення	
1	0,15	Слабке*	0,03	Відсутнє	+ 0,12
2	0,20	Помірне	0,08	Відсутнє	+ 0,12
3	0,20	Помірне	0,10	Слабке	+ 0,10
4	0,17	Слабке	0,06	Відсутнє	+ 0,11
5	0,11	Слабке	0,06	Відсутнє	+ 0,05
6	0,10	Слабке	0,04	Відсутнє	+ 0,06
7	0,07	Відсутнє	0,02	Відсутнє	+ 0,05
8	0,16	Слабке	0,07	Відсутнє	+ 0,09
9	0,17	Слабке	0,06	Відсутнє	+ 0,11
10	0,16	Слабке	0,04	Відсутнє	+ 0,12
11	0,16	Слабке	0,01	Відсутнє	+ 0,15
12	0,15	Слабке	0,01	Відсутнє	+ 0,14
13	0,17	Слабке	0,08	Відсутнє	+ 0,09
14	0,15	Слабке	0,03	Відсутнє	+ 0,12
15	0,20	Помірне	0,07	Відсутнє	+ 0,13
16	0,14	Слабке	0,05	Відсутнє	+ 0,09
Середньозважений уміст	0,16	Слабке	0,05	Відсутнє	+ 0,11
Стандартна помилка	0,01		0,01		
Середньоквадратичне відхилення	0,04		0,03		
Коефіцієнт варіації	22,5		52,9		
Min	0,07		0,01		
Max	0,20		0,10		

Примітка: * – рівень забруднення ґрунту виділено кольором для швидкої оцінки ступеня забруднення на різних ділянках.



Розподіл площ досліджених ділянок за рівнем забруднення ґрунтів рухливими сполуками кадмію, %

забруднення та відповідало природному фоновому рівню для даного регіону.

У ґрунтах більшості досліджених ділянок (12 із 16) встановлено зростання концентрацій кадмію у межах 0,09–0,17 мг/кг, що вказує на антропогенне підсилення забруднення унаслідок воєнних дій. Лише на окремих ділянках (№№ 3, 5, 6, 7) збільшення показників було незначним (+0,05... +0,06 мг/кг), що може бути пов'язано з меншою інтенсивністю бойових дій або особливостями ґрунтового покриву, який обмежує міграцію важких металів.

Максимальні концентрації сполук кадмію зафіксовано на ділянках № 2, 3 та 15–0,20 мг/кг, що відповідає помірному рівню забруднення. Мінімальні значення вмісту кадмію спостерігалися на ділянці № 7 – 0,07 мг/кг, що свідчить про практично природний стан ґрунтового покриву та відсутність істотного техногенного впливу. Найвищі концентрації кадмію характерні для територій із вираженими ознаками воєнного навантаження – у місцях утворення вирв від вибухів, руйнування будівель, локального накопичення уламків військової техніки, згорілих матеріалів і залишків боєприпасів. Це підтверджує

чіткий просторовий зв'язок між інтенсивністю бойових дій та рівнем забруднення ґрунтового покриву важкими металами.

Коефіцієнт варіації післявоєнних показників становив 22,5%, що фіксує помірну неоднорідність просторового розподілу кадмію. Такий рівень варіабельності, ймовірно, зумовлений локальним характером надходження металів – у місцях детонації боєприпасів, руху важкої техніки чи розміщення польових укріплень. Для порівняння, у довоєнний період коефіцієнт варіації був значно вищим (52,9%), що пояснюється низьким фоновим умістом елемента та природною нерівномірністю його розподілу в ґрунтовому середовищі.

Проведені дослідження свідчать, що на більшості обстежених територій забруднення кадмієм має слабкий рівень, проте його наявність є практично на всіх ділянках, що вказує на ознаку широкомасштабного техногенного впливу внаслідок бойових дій.

Водночас збільшення вмісту кадмію є незначним, що можливо пов'язано з особливостями землекористування після припинення військових дій на цих територіях. Упродовж останніх двох років після завершення активних бойових дій території

знову використовуються для вирощування сільськогосподарських культур, здійснюється механічний обробіток ґрунту, внесення органічних і мінеральних добрив, а також зволоження та промивання під час атмосферних опадів. Унаслідок цих процесів частина рухомих сполук кадмію могла: мігрувати у нижні горизонти ґрунтового профілю, особливо на ділянках із легким гранулометричним складом, бути поглинутою рослинами, оскільки кадмій є високорухомих елементом, здатним легко переходити з ґрунтового розчину в кореневу систему, перерозподілитися у ґрунтовому середовищі внаслідок біохімічних та абіотичних процесів, що призводить до зниження його концентрації у верхньому шарі (0–30). Тому, сучасний рівень забруднення ґрунтів кадмієм можна розглядати як залишковий наслідок воєнного впливу, який зберігається попри поступове зниження концентрацій під дією природних процесів самоочищення ґрунтового середовища — міграції, сорбції та розбавлення у товщі ґрунту. Крім того, відновлення господарського використання територій сприяє частковому розсіюванню та зниженню локальних пікових концентрацій важких металів, що поступово вирівнює просторову неоднорідність забруднення.

Наявність помірно забруднених ділянок підкреслює неоднорідність просторового розподілу кадмію та потребу у подальшому детальному картуванні зон підвищених концентрацій.

ВИСНОВКИ

Встановлено чітку тенденцію до підвищення забруднення ґрунтів рухомими сполуками кадмію у післявоєнний період, що є наслідком воєнного впливу і потребує подальшого моніторингу та розроблення заходів із ремедіації і рекультивації порушених земель.

У межах обстежених ділянок вміст рухомих сполук кадмію не перевищує норма-

тивні значення ($\text{ГДК} = 0,7 \text{ мг/кг}$), однак на 93% площі виявлено ознаки слабого або помірного забруднення.

З огляду на високу рухомість сполук кадмію у ґрунтовому середовищі, незначні рівні забруднення можуть бути результатом промивання та перерозподілу металу у глибші горизонти, а також часткового поглинання його рослинністю упродовж двох років після припинення активних бойових дій. Це підтверджує тенденцію до поступового природного зниження концентрацій кадмію, хоча загальний рівень техногенного навантаження на ґрунтовий покрив залишається підвищеним.

Просторова неоднорідність розподілу кадмію вказує на комбінований характер забруднення: локальне підвищення концентрацій кадмію пов'язано із місцевими осередками техногенного впливу, тоді як загальна варіація показників визначається гетерогенністю ґрунтового покриття. Такий тип просторового розподілу є характерним для територій, що зазнали впливу бойових дій, де рівень забруднення формується під поєднаним впливом антропогенних і природних чинників. До антропогенних належать вибухи боєприпасів, згоряння військової техніки, руйнування інфраструктури, тоді як до природних — рельєф місцевості, гідрологічний режим, гранулометричний склад і буферна здатність ґрунтів, які визначають перерозподіл і міграцію сполук кадмію в межах ґрунтового профілю.

Підвищена варіабельність показників може розглядатися як індикатор техногенного навантаження та просторової складності процесів розсіювання кадмію на територіях, що зазнали воєнного впливу.

Хоча поточний рівень забруднення не створює безпосередньої екологічної загрози, потрібний системний моніторинг для оцінки динаміки міграції кадмію в часі, особливо у районах локальних осередків забруднення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Qu, F., & Zheng, W. (2024). Cadmium Exposure: Mechanisms and Pathways of Toxicity and Implica-

tions for Human Health. *Toxics*, 12(6), 388. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12060388>.

2. Davidova, S., Milushev, V., & Satchanska, G. (2024). The Mechanisms of Cadmium Toxicity in Living Organisms. *Toxics*, 12(12), 875. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics12120875>.
3. Genchi, G., Sinicropi, M. S., Lauria, G., Carocci, A., & Catalano, A. (2020). The Effects of Cadmium Toxicity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), 3782. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17113782>.
4. Charkiewicz, A. E., Omeljaniuk, W. J., Nowak, K., Garley, M., & Nikliński, J. (2023). Cadmium Toxicity and Health Effects-A Brief Summary. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 28(18), 6620. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules28186620>.
5. Malik, I. S., Khan, Z. I., Ahmad, K., Nadeem, M., Akhtar, S., Ashfaq, A., & Ullah, S. (2025). Food chain risk assessment of cadmium accumulation and the relationships among diversely irrigated pasture-reared ruminants. *Sci. Rep.* 15, 34868. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-13628-6>.
6. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. DOI: <https://doi.org/10.3390/land13101614>.
7. Shukla, S., Mbingwa, G., Khanna, S., Dalal, J., Sankhyan, D., Malik, A., & Badhwar, N. (2023). Environment and health hazards due to military metal pollution: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100857. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100857>.
8. Datsko, O., Zakharchenko, E., Butenko, Y., Melnyk, O., Kovalenko, I., Onychko, V., ... Solokha, M. (2024). Ecological Assessment of Heavy Metal Content in Ukrainian Soils. *Journal of Ecological Engineering*, 25(11), 100–108. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/192669>.
9. 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. *Агро-екологічний журнал*, 1, 53–65. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2024.299939>.
10. Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2019). Assessment of heavy metal release into the soil after mine clearing in Halgurd-Sakran National Park, Kurdistan, Iraq. *Environ Sci Pollut Res.*, 26, 1517–1536. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3597-3>.
11. Hussain, T., & Gondal, M. A. (2008). Monitoring and assessment of toxic metals in Gulf War oil spill contaminated soil using laser-induced breakdown spectroscopy. *Environ. Monit. Assess*, 136, 391–399. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9694-2>.
12. 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 р-нів Сумської обл. *Агро-екологічний журнал*, 3, 136–149. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419>.
13. Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Bonchkovskiy, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594>.
14. Solokha, M., Melnyk, O., Cannon, N., Horton, M., Datsko O., & O'Connor, D. (2025). Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of The Total Environment*, 995, 180105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180105>.
15. ДСТУ 4770.3:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кадмію в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії (2007). [Чинний від 2009-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України.
16. Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин. Постанова Кабінету Міністрів України № 1325 (2021). (Україна).
17. Яцук, І. П., & Балюк, С. А. (Ред.). (2019). *Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення. керівний нормативний документ*. 2-ге вид., допов. Київ.

Стаття надійшла до редакції журналу 05.10.2025