

УДК 631.41:504.05(477)

[https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1\(46\).332359](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1(46).332359)

В. І. Михайлюк, доктор геогр. наук, проф.

Одеський державний аграрний університет,

кафедра геодезії, землеустрою та земельного кадастру

вул. Пантелеймонівська, 13, м. Одеса, 65012, Україна

mykhailiukv@osau.edu.ua <https://orcid.org/0000-0001-8526-0802>

ХІМІЧНИЙ СКЛАД ҐРУНТІВ ВИРВ У ЗОНАХ ВИБУХІВ МІН І СНАРЯДІВ: ОЦІНКА ВОЄННО-ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Дослідження присвячене оцінці хімічного складу ґрунтів у вирвах, утворених вибухами боєприпасів під час бойових дій і розмінування в південній частині України. На 10 локаціях визначено вміст хімічних елементів (Pb, Cd, Hg, Zn, Cu, Mn, Ni, B, Mo, As), за якими розраховані індикатори забруднення для оцінки воєнно-техногенного впливу на ґрунтове середовище.

Ключові слова: ґрунти кратерів вибуху, забруднення ґрунтів, воєнно-техногенне навантаження, токсичні метали і металоїди, зона бойових дій в Україні.

ВСТУП

В умовах сучасних збройних конфліктів, особливо внаслідок повномасштабної війни в Україні, питання екологічної безпеки набуває особливої актуальності. Однією з найменш досліджених, але критично важливих проблем є забруднення ґрунтів внаслідок вибухів протитанкових та протипіхотних мін і артилерійських снарядів.

Дослідження, проведені в різних регіонах світу, свідчать про значне підвищення концентрацій важких металів у ґрунтах після вибухів боєприпасів (Broomandi P. et al., 2020). Зокрема, у районах після мінної детонації в Іраку та Лівії фіксується формування локальних геохімічних аномалій з різким зростанням концентрацій таких елементів, як Zn, Pb, Ni, Cd та As (Hamad et al., 2019). У роботі Altahaan Z., & Dobslaw D. (2024) зазначено, що навіть через кілька років після вибухів у ґрунтах зберігаються концентрації металів, які перевищують фонові значення. Основними механізмами забруднення є безпосереднє вивільнення металів із фрагментів боєприпасів і продуктів вибуху, а також їх подальше вивітрювання з утворенням мобільних і біодоступних форм.

Дослідження військових полігонів також засвідчило їхнє забруднення вибуховими речовинами та рештками боєприпасів, що містять стійбий, свинець, уран. Більшість з них стійкі до біологічного розкладання і є джерелом забруднення компонентів біосфери (Bai Juan & Zhao Xiaofen, 2020). Всі ці дані свідчать про можливе формування в зоні бойових дій локальних геохімічних аномалій токсичних елементів у ґрунтах, спричинених підривами боєприпасів.

Перевищення гранично допустимих концентрацій валового вмісту кадмію у 5,6–7,6 раза, міді – у 1,5–5,0 раза, цинку – у 2,6–3,9 раза, свинцю – у 1,9 раза, нікелю – в 2,5 раза виявлено у чорноземах звичайних зони бойових дій Харківської області (Вплив війни, 2023).

У середньостеповій і сухостеповій підзонах України, де переважають чорноземи південні та темно-каштанові ґрунти, вплив вибухів боєприпасів на вміст токсичних металів і металоїдів у ґрунтах залишається майже не дослідженим. Це ускладнює достовірну оцінку воєнно-техногенних екологічних ризиків і стримує розробку ефективних заходів із реабілітації пошкоджених земель.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проведені на правобережній частині Херсонської області. Визначено валовий вміст хімічних елементів Pb, Cd, Hg, As, Cu, Zn, Ni, Mn, B і рухоми форму молібдену (Mo) у ґрунтах вирв, утворених вибухами артилерійських снарядів калібру 122 чи 152 мм, а також протитанкових (ТМ-62) та протипіхотних (ПМН-2) мін під час бойових дій в осінній період 2022 року (локації 2, 7, 8) і розмінування території шляхом підриву мін (локації 1, 3–6) у літній період 2023 року (табл. 1). Досліджувався також горілий ґрунт (локації 9, 10). Аналіз хімічних елементів проведений у зразках ґрунту, відібраних у серпні 2023 року.

Зразки ґрунту відбиралися в центрі вирви, а також на відстані 1, 2 і 3,5 м від центру вирви. На локації 3 через великий діаметр вирви відбір здійснювався на відстані 1, 2, і 5–6 м від центру. У центрі кожної вирви відбирався одиничний зразок із шару ґрунту 0–15 см, а інші зразки, що відбиралися в шарі 0–15, 15–30 і 30–45 см, складалися із 6–8 одиничних зразків; вони відбиралися по колу на відповідній відстані. Окремо, враховуючи мінну небезпеку, на відстані 50–750 м від вирв відбиралися змішані зразки ґрунту на контрольних ділянках, що не зазнали впливу бойових засобів.

Вміст міцно фіксованих форм важких металів визначався у хлористоводневій (1Н) витяжці на атомноабсорбційному спектрофотометрі С-115М1 відповідно до МВВ 31–497058–016–2003 Ґрунти.

Для оцінки екологічної небезпеки забруднення ґрунтів хімічними елементами розраховано: індекс забруднення (P_i) – як відношення концентрації забруднювача в ґрунті до його гранично допустимої концентрації (ГДК); фактор забруднення (Кф) – як відношення концентрації забруднювача в ґрунті вирви до його фонові концентрації за даними літературних джерел; коефіцієнт концентрації (Кк), або коефіцієнт перевищення місцевого контролю – як відношення концентрації забруднювача в ґрунті вирви до його значення у ґрунті на контрольній площадці. Останній показник є більш інформативним, оскільки усуває суб'єктивність, пов'язану з вибором фонові концентрації хімічного елемента. Індеси сумарного забруднення PLI (Pollution Load Index), як інтег-

Таблиця 1

Характеристика локацій відбору зразків ґрунту

№ вирви	UTM: пн.ш.; сх.д.	Розміри вирви (діаметр × глибина, м); вид боєприпасу; строк відбору зразків
1*	46°44'38,41"; 32°11'59,59"	2,5×0,35; ТМ-62; біля 1–2 місяців після підриву
2	46°44'34,91"; 32°12'51,48"	5×0,9; декілька ТМ-62; біля 10 місяців після підриву
7	46°45'03,07"; 32°12'43,61"	0,8×0,3; артилерійський снаряд, калібру 122 чи 156 мм; біля 10 місяців після вибуху
8	46°45'03,13"; 32°12'42,43"	3,5×1,1; артилерійський снаряд, калібру 122 чи 156 мм; біля 10 місяців після вибуху
9	46°45'03,66"; 32°12'43,60"	Ґрунт із рештками від горіння запальнового снаряду; біля 1–2 місяців після горіння
10	46°44'35,68»; 32°12'43,17»	Горілий ґрунт поза вирвою
3	46°42'54,45"; 32°24'27,30"	7×2; декілька ТМ-62; біля 1–2 місяців після підриву
4	47°19'58,44"; 33°15'26,36"	0,25×0,1; ПМН-2; біля 1–2 місяців після підриву
5	47°19'57,92"; 33°15'27,92"	0,3×0,15; ПМН-2; біля 1–2 місяців після підриву
6	47°13'06,77"; 33°27'05,82"	0,7×0,25; декілька ПМН-2; біля 1 місяця після підриву

*№ 1, 2, 7–10: Рівнинне слабостічне плато. Переліг в межах нефункціонуючої зрошувальної системи. Ґрунт – темно-каштановий залишково-солонцюватий слабогумусний важкосуглинковий на лесі. Вирва № 2 знаходиться на відстані 14 м від зрошувального каналу, у зоні з ознаками порушення будови ґрунтів;

№ 3: Днище балки Білозерки, рілля. Каштаново-лучний малогумусний важкосуглинковий на делювіальному суглинку;

№ 4, 5: Галявина на межі ріллі і полезахисної лісосмуги (№ 4) і дорога, прокладена розміновувачем у лісовій посадці (№ 5) на заплавній терасі р. Інгулець. Лучний малогумусний середньосуглинковий ґрунт;

№ 6: Переліг на рівнинному плато. Чорнозем південний малогумусний важкосуглинковий на лесі.

ральні еколого-геохімічні індикатори воєнно-техногенного навантаження на ґрунтове середовище, розраховані на основі значень коефіцієнтів перевищення місцевого контролю по окремих хімічних елементах (K_{Pb} , K_{Cd} , K_{Hg} тощо):

$$PLI = \sqrt[n]{K_{k1} \cdot K_{k2} \cdot \dots \cdot K_{kn}}$$

Фактор забруднення (Кф) визначається на основі природного геохімічного фону зонального ґрунту, який для досліджуваної території однозначно не визначений, що становить певну проблему у зв'язку з оцінкою впливу воєнних дій на ґрунти. В якості фонових значень нами використаний середній вміст елементів у чорноземах південних Одещини, визначений під час агрохімічної паспортизації у 2003–2013 рр., які становлять для свинцю 12,3 мг/кг ґрунту, кадмію 0,5 мг/кг і міді 6,4 мг/кг (Голубченко В. Ф., Куліджанов Е. В., 2015); фоновий вміст цинку (62 мг/кг), мангану (670 мг/кг) і нікелю (25 мг/кг) взято як середнє для ґрунтів Степу України (Фоновий, 2003); для ртуті (0,02 мг/кг) і арсену (5 мг/кг) використаний середній вміст для ґрунтів України (Методика, 2003).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХНІЙ АНАЛІЗ

Порівняльний аналіз вмісту хімічних елементів (Pb, Cd, Hg, As, Cu, Zn, Ni, Mn, B, Mo) засвідчив, що їхня концентрація в ґрунтах вирв, у тому числі в порівнянні з контрольними ділянками, визначається переважно географо-генетичними особливостями ґрунтів, особливостями господарського використання земель і попереднім (до війни) техногенним впливом.

Свинець. Його валовий вміст в усіх зразках не перевищував ГДК (32 мг/кг): індекс забруднення становив 0,15–0,47. У більшості зразків фактор забруднення (Кф) щодо фону для чорноземів південних (12,3 мг/кг) є меншим за одиницю, що свідчить про незначний техногенний вплив. Проте у вирві № 2, особливо в горизонті 0–15 см, Кф становив 1,3–1,5. Крім того, там же у шарі 30–45 см Кф досягав 2,0, що може свідчити про локальне забруднення або внаслідок вибуху мін, або через вплив факторів у приканальній зоні (земляні роботи при його будівництві і можливе підтоплення при експлуатації). В інших точках відбору проб суттєвих відхилень не зафіксовано. Розраховані значення коефіцієнту концентрації (Кк) свідчать про відсутність забруднення у вирвах локацій №№ 1, 3, 5. Найбільше перевищення зафіксовано у вирві приканальної зони (локація № 2), де в шарі 30–45 см вміст елемента вдвічі перевищує контрольні показники. В інших вирвах перевищення по окремих горизонтах – у 1,1–1,4 раза (іноді 1,5) порівняно з контрольними ділянками (рис. 1).

Кадмій. Валовий вміст кадмію в усіх зразках був нижчим за ГДК (3 мг/кг) і індекс забруднення становив 0,08–0,38. Відповідно до фонових концентрацій для чорноземів (0,3–0,5 мг/кг), у більшості зразків значення Кф < 1, що свідчить про низький рівень техногенного забруднення. Виняток – локація № 2 у приканальній зоні, де Кф в шарі 0–15 см становив 3,9. У цій же вирві спостерігається перевищення у 2–4 рази вмісту кадмію порівняно з контрольною ділянкою.

Ртуть. Концентрації ртуті в усіх зразках були нижчими за ГДК (2,1 мг/кг): індекс забруднення – 0,01–0,02. Визначення фактору забруднення (Кф) засвідчило, що лише у лучних ґрунтах заплавної тераси Інгульця вміст ртуті відповідає фоновому значенню 0,02 мг/кг ґрунту. В усіх інших зразках ґрунтів вміст ртуті перевищує вказаний фон у 1,3–2,5 раза. При цьому найбільшими значеннями (Кф=2–2,5) характеризуються ґрунти на локації № 2. Порівняння з контрольними ділянками засвідчило, що у ґрунтах на локаціях №№ 1, 3, 5 немає виразних ознак накопичення ртуті. На інших локаціях в окремих горизонтах є перевищення вмісту ртуті по окремих горизонтах (Кк=1,2–1,6); у ґрунтах на локації № 2 (ґрунти приканальної зони) в горизонті 30–45 см на віддалі 2 м від центру вирви Кк=2,4.

Арсен. Фонова концентрація міцно зв'язаного арсену в ґрунтах України становить 5 мг/кг при ГДК 2 мг/кг. У досліджуваних ґрунтах вміст арсену перевищує ГДК на всіх локаціях, при цьому індекс забруднення (Рі) коливається від 1,1 до 1,5. Найбільше перевищення нормативного значення (Рі=1,9–2,9) зафік-

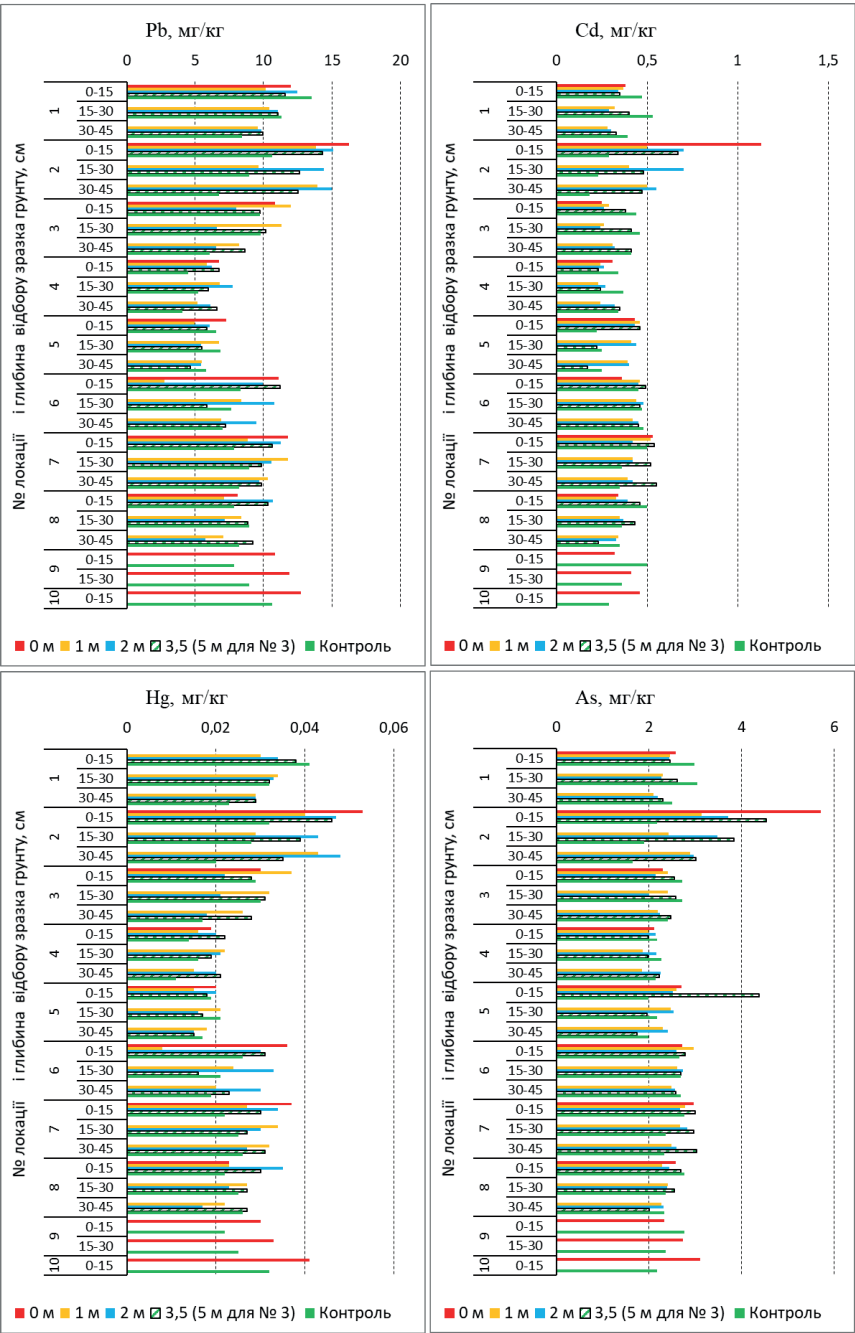


Рис. 1. Пошаровий розподіл валових форм Pb, Cd, Hg і As у ґрунтах вирів

совано на локації № 2 в зоні впливу зрошувального каналу. При цьому в усіх зразках ґрунтів, окрім одного (локація № 2, шар 0–15 см), вміст арсену менший за фонове значення. Вміст арсену у більшості вирв також не перевищує його рівень на контрольних ділянках. Закономірно виділяються лише ґрунти приканальної зони (локація № 2), де вміст арсену перевищує контрольні значення в окремих горизонтах у 1,8–2,6 раза.

Мідь. Валовий вміст міді в усіх зразках не перевищував ГДК (55 мг/кг): індекс забруднення – 0,04–0,25. За регіональним фоновим значенням для чорноземів (6,4 мг/кг), фактор забруднення (Кф) становив 1,1–3,7; натомість за загальноукраїнським фоном (20 мг/кг) Кф був значно нижчим – у межах 0,3–1,2 (рис. 2).

Цинк. Усі концентрації міцно зв'язаного цинку були нижчими за ГДК (100 мг/кг): індекс забруднення – 0,02–0,35. За регіональним фоновим значенням для чорноземів (62 мг/кг) Кф здебільшого < 1. Помітне накопичення виявлено на локації № 2, де Кк досягав 4,5–6. Виразне, порівняно з контролем, але одиничне перевищення вмісту цинку в горизонті 0–15 см лучних ґрунтів (локація № 5) на віддалі 3,5 м від центру вирви є не закономірним; це відхилення, можливо, пов'язане із випадковим потраплянням у зразок цинк-вмісного включення.

Нікель. Отримані результати показали, що вміст міцно зв'язаного нікелю в ґрунтах не перевищує ГДК (85 мг/кг); індекс забруднення варіює від 0,04 до 0,19. Фактор забруднення (Кф), розрахований на основі фонові концентрації нікелю в ґрунтах Степу України (25 мг/кг), становить від 0,2 до 0,6, що вказує на дефіцит цього елемента, особливо в лучних середньосуглинкових ґрунтах долини річки Інгулець. Коефіцієнт, розрахований на основі значень на контрольній ділянці (Кк), засвідчив відсутність накопичення міцно зв'язаного нікелю у всіх ґрунтах окрім локацій № 2–4, 10, де коефіцієнт Кк по окремих горизонтах ґрунтів дорівнює 1,15–1,45.

Манган. Результати досліджень показали, що вміст міцно зв'язаного мангану в ґрунтах не перевищує гранично допустиму концентрацію (1500 мг/кг); індекс забруднення в середньому дорівнює 0,2. Фактор забруднення (Кф), розрахований на основі фонові концентрації мангану в ґрунтах Степу України (670 мг/кг), варіює від 0,3 до 0,6, що вказує на дефіцит цього елемента в ґрунтах. Порівняно з контрольною ділянкою найбільше перевищення (в 1,4–1,7 рази) вмісту мангану спостерігається на локації № 2 в горизонті 30–45 см.

Бор. Результати досліджень показали, що вміст міцно зв'язаного бору в усіх зразках ґрунтів, окрім одного, не перевищує ГДК (30 мг/кг). Перевищення ГДК зафіксовано в горизонті 0–15 см ґрунтів локації № 5 на надзаплавній терасі річки Інгулець, на відстані 3,5 м від вирви, утвореної підривом протипіхотної міни. У ґрунтах локації № 2 (приканальна зона) вміст бору становить від 0,5 до 1 ГДК. Фактор забруднення за вмістом бору (Кф) для більшості зразків не показав перевищень, за винятком локацій № 2 та № 5. В окремих зразках вирви

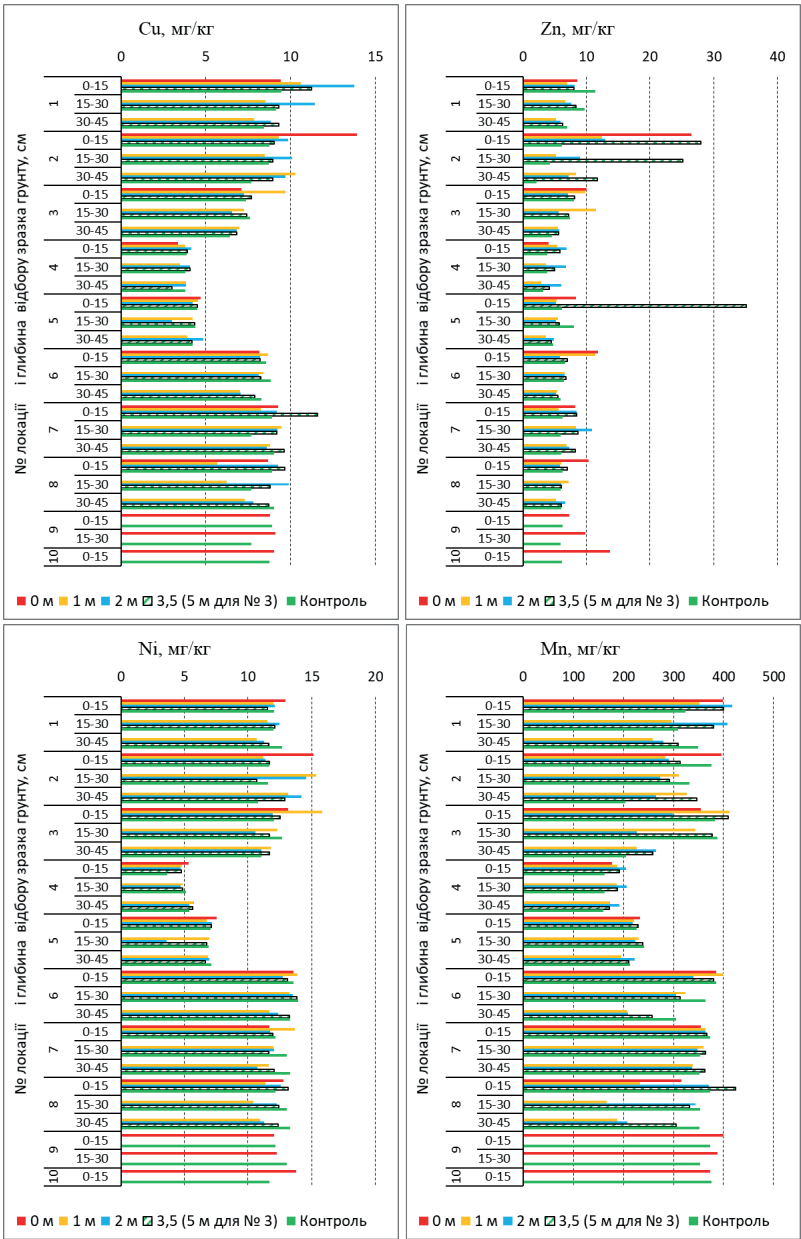


Рис. 2. Пошаровий розподіл валових форм Cu, Zn, Ni і Mn у ґрунтах вирв

на локації № 2 Кф варіює від 2,3 до 2,8. Коефіцієнт, розрахований на основі контрольних значень (Кк), також показав відсутність накопичення бору в ґрунтах, окрім локацій на заплаві річки Інгулець та в приканальній зоні, де вміст бору перевищує контроль в 4–7 разів (рис. 3).

Молибден. Фонова концентрація рухомої форми молибдену для ґрунтів України дорівнює 2 мг/кг ґрунту при гранично допустимій концентрації (ГДК) 10 мг/кг ґрунту. Усі досліджувані ґрунти не забруднені молибденом; спостерігається дефіцит цього мікроелемента.

Просторовий аналіз вмісту основних токсичних елементів (Cd, Pb, Hg, Zn, As) у центрі вирв та на відстані до 6 м від епіцентру показав наявність кількох чітких закономірностей. У більшості випадків найвищі значення коефіцієнту перевищення місцевого контролю (Кк) фіксуються в центрі вирви, з подальшим зменшенням на периферії. Так, у вирві № 3 для міцно зв’язаної форми цинку коефіцієнт перевищення контролю у центрі становив 1,24, на відстані 1 м – 1,22, на відстані 2 м – 0,87, а за межами вирви (5–6 м від епіцентру) – знову зростав до 1,01, що вказує на нерівномірне переміщення Zn у ґрунті після вибуху (рис. 4).

Особливо виразна геохімічна аномалія зафіксована у вирві № 2, що розташована поблизу зрошувального каналу. Тут коефіцієнт перевищення контролю (Кк) для Cd в епіцентрі сягав 3,90, а для Zn – 4,32, що значно перевищує фон

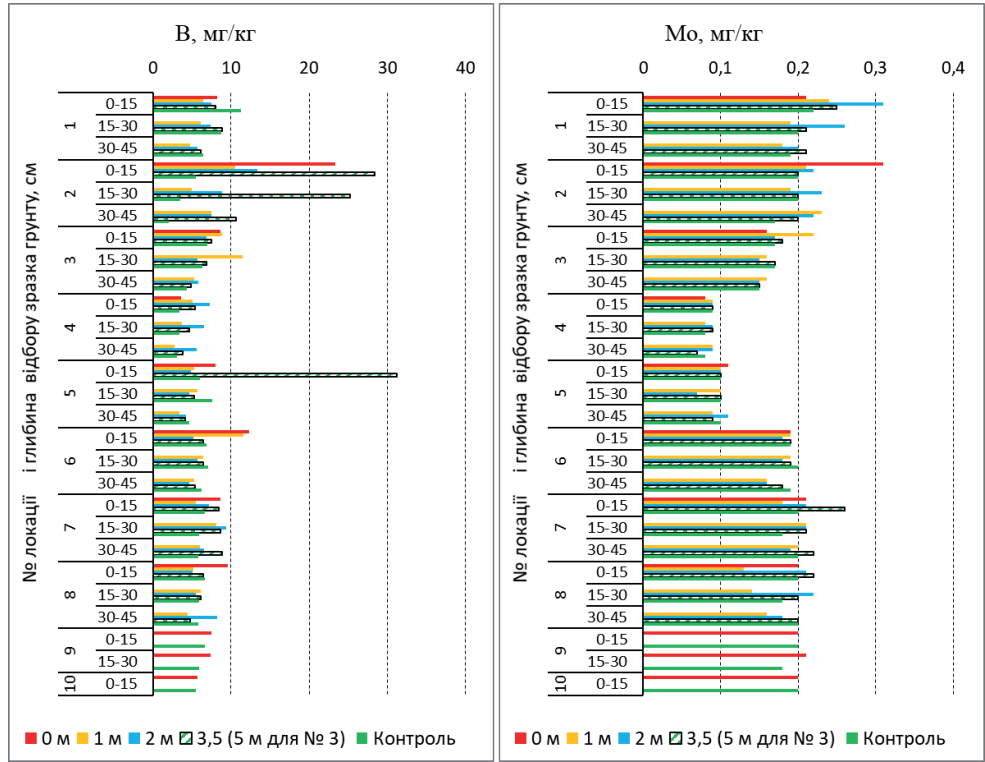


Рис. 3. Пошаровий розподіл валового вмісту бору і рухомої форми молибдену в ґрунтах вирв

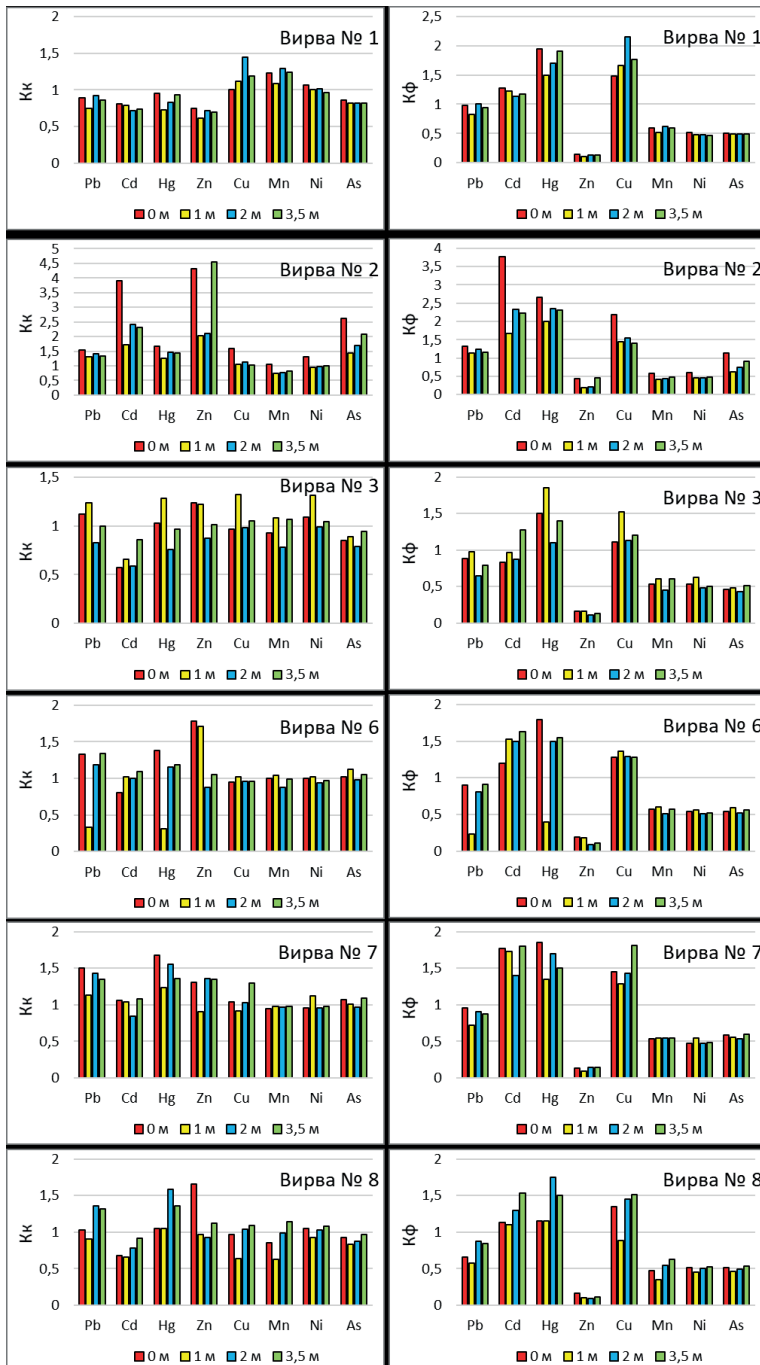


Рис. 4. Фактор забруднення (Kf) та коефіцієнт концентрації (Kk) хімічних елементів у ґрунтах вибухових вирв: Kk – відношення до концентрації на контрольних ділянках; Kf – відношення до фонового рівня, встановленого за даними літературних джерел.

і свідчить про інтенсивне накопичення цих металів у зоні вибуху. Поясненням цього може бути порушення ґрунтового профілю під час будівництва каналу та наявність глинистих фракцій, здатних фіксувати мобільні форми металів (у вирві виявлялися глеюваті включення породи з глибоких горизонтів). Водночас у вирвах № 1 і № 3, розташованих у стабільніших умовах (переліг, рілля), коефіцієнти залишаються на рівні 0,7–1,2 для більшості елементів, що свідчить про незначне забруднення або його відсутність.

Найвищий показник PLI виявлено у вирві № 2 (1,987), що підтверджує локальне забруднення високої інтенсивності. Значення індексу у вирвах № 6 і № 7 становлять 1,123 та 1,172 відповідно, що також вказує на наявність техногенного впливу вибуху як протипіхотних мін, так і вибуху артилерійських снарядів. Водночас у вирвах № 1, № 3 та № 8 індекс був нижчим за 1 (відповідно 0,934; 0,953; 0,998), що свідчить про переважно фонові умови. Таким чином, виявлено просторове розмежування ділянок з підвищеним еколого-геохімічним ризиком, причому характер забруднення значною мірою зумовлений не тільки видом боєприпасу, а й особливостями ґрунту, історією його використання та гідрологічними умовами (табл. 2).

Таблиця 2

Індекси сумарного забруднення (PLI) для центрів вирв

№ вирви	1	2	3	6	7	8
Індекс сумарного забруднення (PLI) для центру вирви	0,934	1,987	0,953	1,123	1,172	0,998

Отримані результати підтверджують, що коефіцієнти перевищення контролю (Кк) та розраховані на їхній основі індекси сумарного забруднення (PLI) є більш надійними показниками локального техногенного навантаження на ґрунт у зоні бойових дій. Їх застосування дає змогу не лише виявити «гарячі точки» забруднення, а й сформувати просторову модель ризику для ґрунтових екосистем, яка стане основою для подальшого моніторингу та розробки ремедіаційних заходів.

Таким чином, аналіз вмісту токсичних елементів у ґрунтах вибухових кратерів, спричинених підривами протитанкових і протипіхотних мін та артилерійських снарядів, а також на прилеглих ділянках і в зонах термічного впливу засвідчив наявність накопичення окремих хімічних елементів, зокрема Pb, Cd, Zn та As. Виявлене збагачення пов’язане як із впливом вибухів боєприпасів – надходженням до ґрунту металевих уламків, залишків вибухових речовин та продуктів детонації, – так і з виносом на поверхню ґрунтового матеріалу, що зазнав техногенного впливу в минулому. Порівняння з контрольними ділянками та фоновими показниками засвідчило, що вміст багатьох елементів у зоні вибуху перевищує рівні непорушених ґрунтів (табл. 3; рис. 5). Зокрема, максимальні значення цинку перевищували контрольні в 5–6 разів, а кадмію – у 2–3 рази. При цьому середні концентрації усіх досліджуваних елементів залиша-

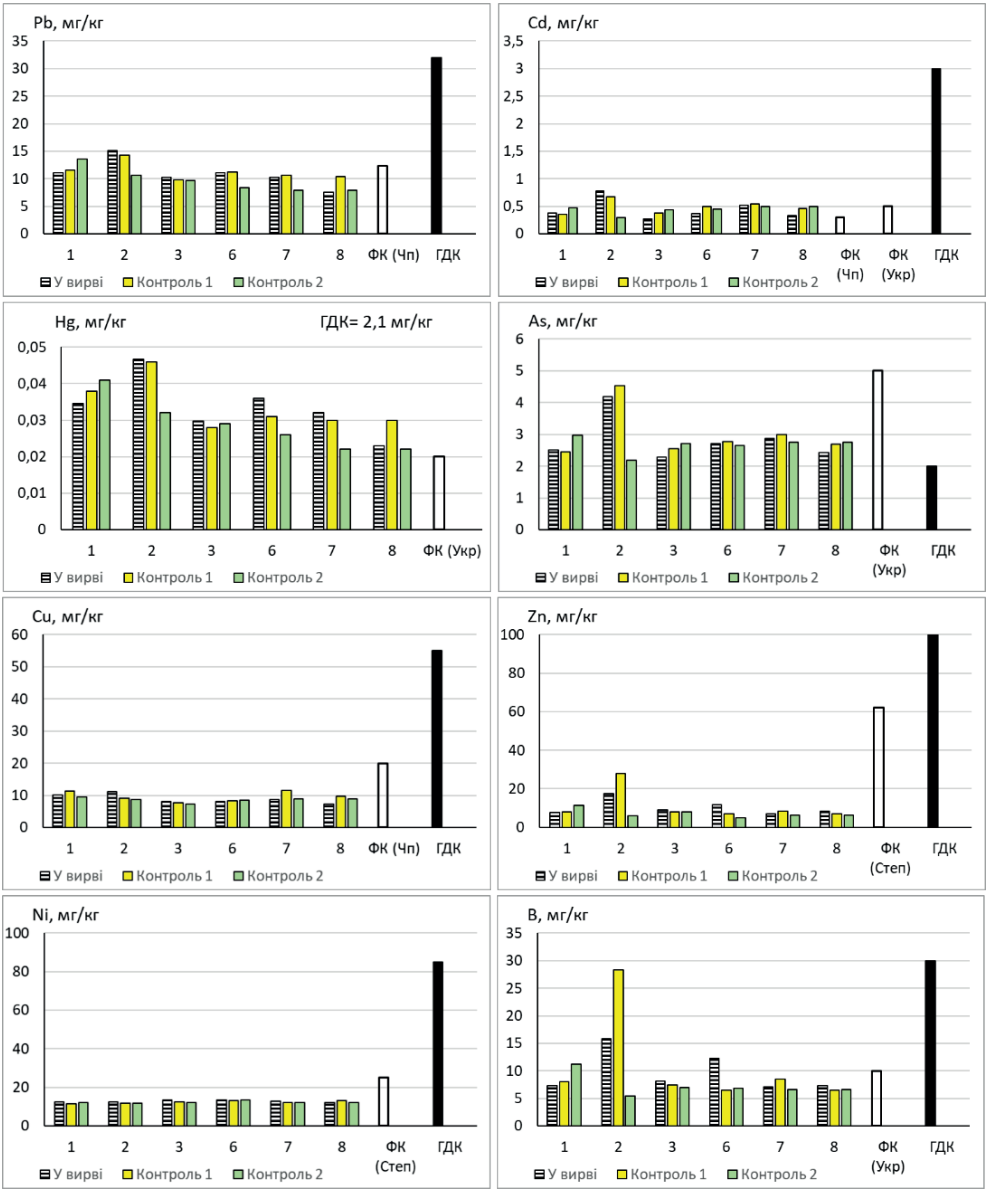


Рис. 5. Концентрації хімічних елементів у верхньому горизонті ґрунтів (0–15 см) безпосередньо у вирві та на контрольних ділянках відносно фону та ГДК (контроль 1 – на відстані 1–3 м від краю вирви; контроль 2 – на відстані 50–750 м від вирви)

лися нижчими за гранично допустимі концентрації (ГДК), що вказує на відсутність забруднення як такого.

Середній вміст арсену у ґрунтах перевищує гранично допустимий рівень, проте залишається нижчим за фон. Для інших металів, таких як мідь, манган і нікель, вміст залишається або нижчим за фон, або незначно перевищує його, що підтверджує обмежене поширення продуктів вибуху в просторі. Особливу увагу заслуговують кадмій і цинк; це елементи з високою біологічною активністю та токсичністю, які при зміні ґрунтових умов можуть переходити в більш мобільні форми.

Таблиця 3

Вміст хімічних елементів у ґрунтах виврв, навколо виврв та у зонах термічного впливу на локаціях 1–10 у порівнянні з контрольними ділянками та критеріями оцінки, мг/кг

Елемент	Pb	Cd	Hg	Zn	Cu	Mn	Ni	B	As	Mo
Середнє значення вмісту на локаціях 1–10	9,0	0,4	0,03	7,7	7,5	296	10,7	7,3	2,6	0,2
Мінімальне значення на локаціях 1–10	2,8	0,2	0,01	2,2	3,0	160	3,6	2,0	1,6	0,1
Максимальне значення на локаціях 1–10	16,2	1,1	0,05	35,1	13,9	424	15,8	31,2	5,7	0,3
ГДК	32	3	2,1	100	55	1500	85	30	2	10
Фоновий вміст в зональному ґрунті чи близькому до нього	12,3	0,3	0,02	62	6,4	670	25	10	5	2
Вміст на контрольній ділянці	8,1	0,4	0,02	6,1	7,4	309	11	5,9	2,4	0,2

Загалом результати засвідчують мозаїчний характер забруднення ґрунтів після вибухів боєприпасів. Незважаючи на відсутність перевищення ГДК, наявність локального збагачення вказує на потенційну екологічну загрозу в разі тривалого накопичення або зміни ґрунтових умов. Тому отримані результати доцільно розглядати як підґрунтя для подальшого моніторингу екологічного стану ґрунтів на територіях, що зазнали воєнно-техногенного впливу.

ВИСНОВКИ

Аналіз хімічного складу ґрунтів виврв у зонах вибухів мін і снарядів показав накопичення важких металів та металоїдів над фоновими рівнями. Коефіцієнти перевищення контролю (Кк) для окремих хімічних елементів та індекси сумарного забруднення (PLI) у більшості випадків перевищують одиницю. Найвищі значення Кк зафіксовано для важких металів: свинцю, кадмію, міді, цинку.

Порівняльний аналіз засвідчив, що вміст хімічних елементів у ґрунтах виврв зумовлений не лише вибухами, а й природно-географічними та генетичними особливостями ґрунтів, характером їх господарського використання і техногенним навантаженням до війни. Найвищі концентрації елементів виявлено

на ділянках поблизу зрошувального каналу, де проводились земляні роботи; тут у ґрунтах через вибухове підняття ґрунтової маси з глибоких горизонтів та її перемішування спостерігається суттєве перевищення фонових значень цинку, міді та особливо кадмію. Значення індексів сумарного забруднення (PLI) вказують також на наявний низький ступінь накопичення хімічних елементів при одночасному підриві кількох протипіхотних мін на ріллі із чорноземами південними або вибуху артилерійського снаряду на полі із темно-каштановими ґрунтами.

Просторова картина розподілу забруднювачів показала максимальні концентрації токсичних елементів у безпосередній зоні вибуху – центрі вирви. У деяких випадках спостерігалось вторинне зростання концентрацій забруднювачів на периферії, що вказує на можливе їхнє розсіювання.

У зонах вибухів мін і снарядів не виявлено ознак значного забруднення. Концентрації Cd і Hg у всіх зразках нижчі за 0,5 ГДК, а вміст мікроелементів (Zn, Cu, Mn, Ni) не перевищує допустимі норми та здебільшого відповідає фоновим рівням. Водночас у частини зразків зафіксовано знижений рівень мікроелементів, що, ймовірно, є наслідком агровиснаження ґрунтів.

Вміст арсену в середньому перевищує ГДК, але залишається в межах фонових концентрацій для ґрунтів України. Його підвищені значення на контрольних ділянках свідчать, що джерело може бути не пов'язане з вибухами.

Підрив боєприпасів спричиняє надходження в ґрунт потенційно токсичних сполук у вигляді решток боєприпасів. Їхній екологічний вплив може проявитися з часом – після зміни фізико-хімічних умов середовища. Це становить ризик для екологічних функцій ґрунтів і вимагає подальшого моніторингу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Голубченко В. Ф., Куліджанов Е. В. Порівняльна оцінка вмісту мікроелементів в ґрунтах Одеської області. *Аграрний вісник Причорномор'я. Сільськогосподарські науки*. 2015. Вип. 76. С. 27–31.
- Забруднення земель внаслідок агресії Росії проти України. Огляд. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf>.
- Методика агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення / За ред. С. М. Рижука, М. В. Лісового, Д. М. Бенцаровського. Київ, 2003. 64 с.
- Фоновий вміст мікроелементів у ґрунтах України: монографія / А. І. Фатєєв, Я. В. Пашенко, С. А. Балюк та ін. Укр. акад. аграр. наук, Нац. наук. центр «Ін-т ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського». Харків, 2003. 118 с.
- Altahaan, Z.; Dobslaw, D. The Impact of War on Heavy Metal Concentrations and the Seasonal Variation of Pollutants in Soils of the Conflict Zone and Adjacent Areas in Mosul City. *Environments* 2024, 11, 247. <https://doi.org/10.3390/environments11110247>.
- Bai Juan & Zhao Xiaofen. (2020). Ecological and Human Health Risks of Heavy Metals in Shooting Range Soils: A Meta Assessment from China. *Toxics*. 8. 32. URL: <https://doi.org/10.3390/toxics8020032>.
- Broomandi P. et al. Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*. 2020. 12 (21): 9002. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219002>.
- Hamad, R., Balzter, H. & Kolo, K. Assessment of heavy metal release into the soil after mine clearing in Halgurd-Sakran National Park, Kurdistan, Iraq. *Environ Sci Pollut Res*, 2019. 26. 1517–1536. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3597-3>.

REFERENCES

- Holubchenko, V.F., & Kulidzhanov, E.V. (2015). Poriavnialna otsinka vmistu mikroelementiv v rruntakh Odeskoi oblasti (Comparative assessment of microelement content in soils of Odesa region). *Agrarian Bulletin of the Black Sea Region. Agricultural Sciences*, (76), 27–31. [In Ukrainian]
- Zabrudnennia zemel vnaslidok ahresii Rosii proty Ukrainy. Ohliad (Land contamination as a result of Russia's aggression against Ukraine). A review. Retrieved from. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/zabrudnennia-zemel-vid-rosii1.pdf>. [In Ukrainian]
- Metodyka ahrokhimichnoi pasportyzatsii zemel silskohospodarskoho pryznachennia (Methodology of agrochemical land passportization for agricultural purposes) / Edited by S.M. Ryzhuk, M.V. Lisovyi, D.M. Bentsarovskiy. Kyiv, 2003. 64 p. [In Ukrainian]
- Fonovi vmist mikroelementiv u rruntakh Ukrainy: monohrafiia (Background content of microelements in soils of Ukraine: Monograph) / A.I. Fateiev, Ya. V. Pashchenko, S.A. Baliuk et al. Ukrainian Academy of Agrarian Sciences, National Scientific Center «O.N. Sokolovsky Institute of Soil Science and Agrochemistry». Kharkiv, 2003. 118 p. [In Ukrainian]
- Altahaan, Z.; Dobslaw, D. (2024). The Impact of War on Heavy Metal Concentrations and the Seasonal Variation of Pollutants in Soils of the Conflict Zone and Adjacent Areas in Mosul City. *Environments*. 11, 247. <https://doi.org/10.3390/environments11110247>.
- Bai Juan & Zhao Xiaofen. (2020). Ecological and Human Health Risks of Heavy Metals in Shooting Range Soils: A Meta Assessment from China. *Toxics*. 8. 32. URL: <https://doi.org/10.3390/toxics8020032>.
- Broomandi P. et al. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*. 12 (21): 9002. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219002>.
- 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>.

Надійшла 01.05.2025

V.I. Mykhailiuk

Odesa State Agrarian University,
Department of Geodesy, Land Management and Land Cadastre
13 Panteleimonivska St, Odesa, 65012, Ukraine
mykhailiukv@osau.edu.ua

CHEMICAL COMPOSITION OF CRATER SOILS IN MINE AND SHELL EXPLOSION ZONES: ASSESSMENT OF MILITARY-TECHNOGENIC CONTAMINATION

Abstract

Problem Statement and Purpose. In the context of modern armed conflicts, the threat of soil contamination by toxic elements has become increasingly relevant. Detonations of landmines and artillery shells are among the primary sources of such contamination, as they mechanically disrupt the soil profile and promote the accumulation of heavy metals in surface horizons. Numerous studies have reported geochemical anomalies in explosion-affected areas, where concentrations of toxic elements frequently exceed regional background levels. In Ukraine, such exceedances have been documented in the chernozem soils of the Kharkiv region; however, comprehensive assessments for the southern steppe zone remain largely absent. This lack of region-specific data hinders accurate evaluation of environmental risks and complicates the planning of land rehabilitation measures. The aim of this study is to determine the degree of contamination by toxic metals and metalloids in crater-affected soils formed by the detonation of landmines and artillery shells under the natural and climatic conditions of the Kherson region in southern Ukraine.

Data & Methods. The study was conducted at ten sites in the right-bank part of Kherson region. The total content of Pb, Cd, Hg, As, Cu, Zn, Ni, Mn, B, and the mobile form of Mo was analysed in crater soils formed by the explosions of 122/152 mm artillery shells, anti-tank mines (TM-62), and anti-personnel mines (PMN-2), as well as in soils affected by thermal impact. Soil samples were collected in layers from the centre of each crater and at varying distances from it (up to 6 meters), as well as from control plots located 50–750 meters away from the craters. Chemical analysis was performed using atomic absorption spectrophotometry in a 1N HCl extract. To assess the level of contamination, the following indices were calculated: the pollution index (Pi), the contamination factor (CF), the local control exceedance coefficient (Kk), and the Pollution Load Index (PLI). The obtained results make it possible to evaluate the potential environmental risks of soil contamination by toxic elements in combat zones and to substantiate the need for the restoration of affected areas.

Results. Analysis of the spatial distribution of chemical elements in crater soils formed by the detonation of anti-tank mines (TM-62), anti-personnel mines (PMN-2), and 122/152 mm artillery shells revealed that the pattern of contamination is determined not only by the type of explosive device, but primarily by soil properties, environmental conditions, and previous land use. In most cases, the coefficients of control exceedance (Kk) for toxic elements (Cd, Zn, Pb, Hg, As) in the centre of the craters were greater than 1, indicating localized technogenic contamination. This was most pronounced in the crater located near an irrigation canal, where Kk values for Zn and Cd reached 4.32 and 3.90, respectively. Such levels of contamination point not only to a military-technogenic origin of the metals but also to the influence of redistributed soil mass in the area of the irrigation canal. In some cases, secondary increases in contaminant concentrations were observed on the crater periphery, suggesting potential dispersion of toxic elements in the soil environment. To integrate contamination data, the Pollution Load Index (PLI) was applied. The calculated values indicate localized technogenic pressure at specific sites. The results demonstrate a mosaic pattern of contamination. The impact of munition explosions on the chemical composition of soils varies depending on soil type and environmental conditions. In areas with anthropogenically disturbed soils, contamination levels are higher, as reflected by elevated values of CF, Kk, and PLI. In relatively undisturbed agroecosystems, no significant contamination was observed. This highlights the need for a spatially differentiated approach to risk assessment and the planning of environmental protection measures.

Keywords: explosion crater soils, soil contamination, military-technogenic impact, toxic metals and metalloids, combat zone in Ukraine.