

ANALYTICAL CONSIDERATION OF THE ISSUES OF SOIL POLLUTION BY HAZARDOUS SUBSTANCES, WHICH CONTAINED IN SHELLS AND ROCKETS AND POSSIBLE WAYS OF THEIR INFLUENCE ON THE POPULATION

Babiy V.F., Kondratenko O.Ye., Lytvychenko O.M., Hlavachek D.O.,
Zhdan-Pushkina O.V., Stankevych V.V., Brytsun V.M.,
Rudnytska O.P., Suvorova I.M., Tetenova I.O.

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗГЛЯД ПИТАНЬ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ НЕБЕЗПЕЧНИМИ РЕЧОВИНАМИ, ЯКІ МІСТЯТЬСЯ У СНАРЯДАХ І РАКЕТАХ, ТА МОЖЛИВІ ШЛЯХИ ЇХНЬОГО ВПЛИВУ НА НАСЕЛЕННЯ

ПА
БАБІЙ В.Ф.,
КОНДРАТЕНКО О.Є.,
ЛИТВИЧЕНКО О.М.,
ГЛАВАЧЕК Д.О.,
ЖДАН-ПУШКІНА О.В.,
СТАНКЕВИЧ В.В.,
БРИЦУН В.М.,
РУДНИЦЬКА О.П.,
СУВОРОВА І.М.,
ТЕТЕНЬОВА І.О.
ДУ "Інститут громадського
здоров'я
ім. О.М. Марзеєва
НАМН України", Київ

овномасштабне вторгнення рф в Україну у лютому 2022 року стало причиною не лише величезних людських втрат, а й руйнівних впливів на довкілля у вигляді масового хімічного забруднення повітря, води та ґрунту. Приблизно 30% території України забруднено наземними мінами та боеприпасами, що не розірвалися.

Переважна більшість цих факторів забруднення загрожує здоров'ю населення. Одним із основних джерел небезпеки є шкідливі речовини, які потрапили у ґрунт внаслідок бойових дій. За влучним визначенням Cahyana D. та

Mulyanto B.A. [2], ґрунт – це «багатошаровий матеріал на поверхні землі, який утворився внаслідок хімічних та біологічних процесів і фізичної організації мінералів та органічних речовин, який підтримує наземні екосистеми та людство».

Тому ґрунт часто виступає як кінцевий «поглинач» забруднення навколишнього середовища, оскільки глинисті мінерали та гумінові матеріали у ньому мають велику кількість хімічних груп і органічних частинок, до яких можуть приєднуватися забруднювачі. Забруднені ґрунти можуть становити проблему для суспіль-

УДК: 614.7: 628.5

АНАЛІТИЧНИЙ РОЗГЛЯД ПИТАНЬ
ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ НЕБЕЗПЕЧНИМИ
РЕЧОВИНАМИ, ЯКІ МІСТЯТЬСЯ
У СНАРЯДАХ І РАКЕТАХ, ТА МОЖЛИВІ
ШЛЯХИ ЇХНЬОГО ВПЛИВУ НА НАСЕЛЕННЯ

Бабій В.Ф., Кондратенко О.Є.,
Литвиченко О.М., Главачек Д.О.,
Ждан-Пушкіна О.В., Станкевич В.В.,
Брицун В.М., Рудницька О.П.,
Суворова І.М., Тетенєва І.О.

ДУ «Інститут громадського здоров'я
ім. О.М. Марзеєва НАМН України», Київ

Метою статті є визначення важких металів, які можуть бути потенційними забруднювачами ґрунту внаслідок обстрілів снарядами, ракетами та іншою зброєю, а також способів моніторингу важких металів.

Матеріали та методи. Здійснено аналітичний огляд наукових інформаційних ресурсів, теми яких відповідають меті цієї статті. Пошук наукових публікацій вітчизняних та зарубіжних вчених проводили з використанням баз даних PubMed і Google

Scholar за 1997-2014 роки за ключовими словами «війна», «бойові дії», «забруднення ґрунту», «хімічне забруднення», «метали», «напівметали», «довкілля», «здоров'я», «екоцид», «моніторинг».

Результати та обговорення. Існують різні джерела металів у залишках вогнепальної зброї, включаючи капсюлі (Pb, Sb, Ba), кулі з металевою оболонкою (Cu, Zn) і стволи (Fe). Вибухові речовини також відіграють значну роль у викидах металів у довкілля, оскільки частки, викинуті від артилерійських ударів, містять високий рівень Pb і Cu. Вибухові гранати також вважаються значним джерелом високих концентрацій Pb.

Військова діяльність, особливо в умовах війни, призводить до забруднення ґрунту Pb і Cu, а також іншими металами, включаючи Cd, Sb, Cr, Ni, Zn, з подальшим перемищенням металів у воду, збільшуючи таким чином ризик впливу на людину. У різних країнах біомоніторингові дослідження територій, де відбувалися бойові дії, показали підвищене накопичення металів у рос-

© **Бабій В.Ф., Кондратенко О.Є., Литвиченко О.М., Главачек Д.О.,**
Ждан-Пушкіна О.В., Станкевич В.В., Брицун В.М.,
Рудницька О.П., Суворова І.М., Тетенєва І.О. СТАТТЯ, 2024.

ства у разі їхнього негативного впливу на сільськогосподарські функції, здоров'я людини чи екологічні системи [1].

Метою даної оглядової статті є визначення важких металів, які можуть бути потенційними забруднювачами ґрунту внаслідок обстрілів снарядами, ракетами та іншою зброєю, а також способів їх моніторингу.

Матеріали та методи. Здійснено аналітичний огляд наукових інформаційних ресурсів, теми яких відповідають меті цієї статті. Пошук наукових публікацій вітчизняних та зарубіжних вчених проводили з використанням баз даних PubMed і Google Scholar за 1997-2014 роки за ключовими словами «війна», «бойові дії», «забруднення ґрунту», «хімічне забруднення», «метали», «напівметали», «довкілля», «здоров'я», «екоцид», «моніторинг».

Результати та обговорення. Ушкодження, завдані ґрунту внаслідок воєнних дій, можна поділити на дві великі групи: фізичні ушкодження, до яких належить викопування тунелів і траншей, ущільнення внаслідок великомасштабних переміщень військ з техні-

кою та утворення глибоких вибуховими речовинами, та хімічне забруднення, спричинене металами та речовинами, що входять до складу вибухових матеріалів ракет, боєприпасів та патронів для стрілецької зброї. Хімічне забруднення відбувається також внаслідок використання боєприпасів, розливів хімічних речовин через пошкодження промислових об'єктів і сховищ, а також витоків і розливів нафти та мастильних матеріалів. Хімічні речовини, особливо елементи та сполуки, які не піддаються біологічному розкладанню і використовуються у військовій амуніції та вибухових речовинах, можуть забруднювати ґрунт і поверхневі води, а згодом мати негативний вплив на здоров'я людини та порушувати нормальне функціонування екосистеми [3-6]

Воєнні дії зумовлюють стійке забруднення довкілля важкими металами та напівметалами (свинець, сурма, хром, миш'як, ртуть, нікель, цинк, кадмій, мідь). Зокрема, значне накопичення металів спостерігалось на полях боїв, стрільбищах із стрілецької зброї, артилерійських, мінометних і ракетних полі-

гонах та гранатометних майданчиках [7].

Наприклад, ґрунти регіону Фландрії у Бельгії під час Першої світової війни все ще містять підвищені концентрації міді через інтенсивні обстріли на полях битв понад 100 років тому. У Франції відчужена територія, відома як «Червона зона», залишається надто зруйнованою для ведення сільського господарства через бомбардування і, відповідно, засмічення колишнього поля битви залишками військових уламків, нерозірваних снарядів і боєприпасів [8].

Також військова діяльність пов'язана з впливом металів на людину внаслідок вдихання або проковтування вивільнених частинок, а також травм з подальшим вивільненням металу із уламків, які потрапили у рану. Слід зазначити, що локальне накопичення металу після військової травми може статися навіть без виявлення уламків. При цьому доведено, що вплив токсичних металів спричиняє несприятливі наслідки для здоров'я, пов'язані з серцево-судинними, метаболічними, неврологічними та нирковими захворюваннями, а також раком [9].

Викиди металів у навколишнє середовище під час військової діяльності відбуваються із залишків вогнепальної зброї, що містять високий рівень металовмісних частинок [10], а також внаслідок використання артилерії, гранат і ракет [7]. Існують різні джерела металів у залишках вогнепальної зброї, включаючи капсюлі (свинець (Pb), сурма (Sb), барій (Ba)), кулі з металовою оболонкою (Cu, Zn) і стволи (Fe). Було виявлено [11], що у закритих тирах вміст Pb, Cu, Ni та Zn пов'язаний з різними фракціями специфічних речовин у повітрі, а саме: 1,95 мкм, 0,01 мкм, 1,22 мкм, 8,10 мкм

линах, безхребетних і деяких видах хребетних (риби, птахи, ссавці).

Ступінь забрудненості ґрунтів металами можна моніторувати за допомогою рослин, які є хорошими індикаторами ґрунтових умов, в яких вони ростуть. Верхівки рослин є колекторами забруднювачів повітря, і їхній хімічний склад може бути хорошим індикатором для забруднених територій, якщо порівнювати його з фоновими значеннями, отриманими для незабрудненої рослинності. Водні та наземні рослини, як відомо, здатні до біонакопичення важких металів, отже є потенційним джерелом цих забруднювачів для харчового ланцюга людини.

Висновки. *Встановлення шляхів надходження важких металів до харчових ланцюгів та, відповідно, аналіз їхньої кількості у шарах ґрунтів і рослинах може допомогти розробити методи моніторингу для пошкоджених воєнними діями територій України, щоб запобігти подальшому впливу забруднювачів ґрунту на людину та довкілля. У свою чергу, можуть бути розроблені механізми більш ефективного відновлення довкілля.*

Ключові слова: *війна, бойові дії, забруднення ґрунту, хімічне забруднення, метали, напівметали, довкілля, здоров'я, екоцид, моніторинг.*

УДК: 614.7: 628.5
ANALYTICAL CONSIDERATION
OF THE ISSUES OF SOIL POLLUTION
BY HAZARDOUS SUBSTANCES, WHICH
CONTAINED IN SHELLS AND ROCKETS
AND POSSIBLE WAYS OF THEIR INFLUENCE
ON THE POPULATION

**Babiy V.F., Kondratenko O.Ye.,
Lytvychenko O.M., Hlavachek D.O.,
Zhdan-Pushkina O.V., Stankevych V.V.,
Brytsun V.M., Rudnytska O.P.,
Suvorova I.M., Tetenova I.O.**

*SI «O.M. Marzieiev Institute for Public
Health, National Academy of Medical
Sciences of Ukraine», Kyiv, Ukraine*

The aim of the article is to identify heavy metals that can be potential soil pollutants as a result of shelling, rockets, and other weapons, as well as ways to monitor heavy metals.

Materials and methods: an analytical review of scientific information resources, the topics of which correspond to the purpose of this article, was carried out. Scientific publications of domestic and foreign scientists were searched using the PubMed and Google Scholar databases for 1997-2014 under determination by the keywords «war», «armed conflict», «soil pollution», «chemical pollution», «metals», «semi-metals», «environment», «health», «ecocide», «monitoring».

Results and discussion. There are various sources of metals in firearms residues, including shell casings (Pb, Sb, Ba), metal jacketed bullets (Cu, Zn) and barrels (Fe).

Explosives also play a significant role in the release of metals into the environment, as the particles ejected from artillery strikes contain high levels of Pb and Cu. Explosive grenades

are also considered a significant source of high Pb concentrations.

Military activities, especially in conditions of armed conflicts, lead to soil contamination with Pb and Cu, as well as other metals including Cd, Sb, Cr, Ni, Zn, with subsequent movement of metals into water, thus increasing the risk of human exposure. In various countries, biomonitoring studies of territories where military operations took place showed increased accumulation of metals in plants, invertebrates, and some species of vertebrates (fish, birds, mammals).

The degree of soil contamination with metals can be monitored with the help of plants, which are good indicators of the soil conditions in which they grow. Plant tops are collectors of air pollutants, and their chemical composition can be a good indicator for polluted areas when compared with background values obtained for unpolluted vegetation.

Aquatic and terrestrial plants are known to bioaccumulate heavy metals and are therefore a potential source of these pollutants for the human food chain.

Conclusions. Establishing the ways of including heavy metals in food chains and, accordingly, analyzing their amount in soil layers and plants, can help to develop monitoring methods for war-damaged territories of Ukraine aimed at preventing the further impact of soil pollutants on humans and the environment. In turn, mechanisms for more effective environmental restoration can be developed.

Keywords: war, armed conflict, soil pollution, chemical pollution, metals, semi-metals, environment, health, ecocide, monitoring.

відповідно [12]. Крім того, було показано, що викид металів з залишками вогнепальної зброї досить різний для пістолетів, рушниць і гвинтівок [13], що вказує на корисність аналізу залишків вогнепальної зброї у криміналістиці [10].

Було показано [11], що викиди металу залежать від типу боєприпасів. Зокрема, у результаті вибуху NM229, що містить сталевий сердечник, призводить до значного викиду Cu та Zn, тоді як SS109 зі свинцевим сердечником утворює велику кількість частинок Pb (NM229 та SS109 – патрони НАТО калібром 5,56x45 [14]). У свою чергу, стрільба малокаліберними боєприпасами, що не містять свинцю, призводить

до значного викиду твердих частинок, які складаються переважно з Cu, Zn і Fe, а також сажі, що виникає внаслідок неповного згоряння [11].

У викидах металів у довкілля та їхній кількості також суттєву роль відіграють вибухові речовини. Було виявлено, що частки, викинуті від артилерійських ударів, містять високий рівень Pb і Cu, які можуть походити від артилерійських снарядів, стволів рушниць або осідання пилу. Вибухові гранати також вважаються значним джерелом високих концентрацій Pb [15]. Загальний характер небезпеки важких металів дозволимо собі проілюструвати на прикладі збідненого урану та сурми.

Збіднений уран (DU) широко використовується у війсьній промисловості, особливо у виробництві снарядів. Відповідно було показано, що пенетратори, що містять DU, вивільняють частинки DU під час стирання, згоряння та корозії [11].

Як наслідок, військова діяльність призводить до забруднення ґрунту Pb і Cu, а також іншими металами, включаючи Cd, Sb, Cr, Ni, Zn, з подальшим переміщенням металів у воду, збільшуючи таким чином ризик впливу на людину. Біомоніторингові дослідження [11] показали підвищене накопичення металів у рослинах, безхребетних і деяких видах хребетних (риби, птахи, ссавці).

Сурма є напівметалом, який використовується у складі патронів до стрілецької зброї. Забруднення Sb стає глобальною екологічною проблемою через значну екологічну небезпеку для тварин, рослин, мікроорганізмів і людини. Показано, що Sb може пригнічувати ріст мікроорганізмів і активність ферментів у ґрунтах, водночас негативно впливає на ріст і розмноження бактерій, грибів, актиноміцетів і деяких чутливих ферментів у ґрунтах. Sb легко поглинається селезінкою та клітинами крові людини перед накопиченням у васкуляризованих органах і тканинах, що призводить до серйозних ризиків для здоров'я людей, таких як респіраторні і серцево-судинні захворювання та захворювання печінки [16]. Нині Sb класифікується Агентством з охорони навколишнього середовища США (US EPA) та Європейським Союзом (ЄС) як новий забруднювач у результаті різноманітної антропогенної діяльності, включаючи видобуток, виплавку, спалювання вугілля та іншу промислову діяльність [17-19].

У природі концентрації Sb у ґрунтах зазвичай становлять <1-4 мг/кг [20]. У деяких випадках підвищені концентрації Sb у ґрунтах перевищують 1500 мг/кг [16]. У ґрунтах Sb представлений переважно у вигляді $Sb(OH)_3$ та $Sb(OH)_6$ [21, 22]. Широко відомо, що Sb в основному існує у двох неорганічних ступенях окислення – Sb (III) і Sb (V). Показано також [16], що Sb (V) домінує в окислювальних умовах, переважно у неглибоких шарах ґрунтів, тоді як Sb (III) – у безкисневих умовах, особливо у більш глибоких насичених зонах. У ґрунтах і підземних водах Sb наявний переважно у формі Sb (V). Sb (III) є найбільш токсичною формою, яка може швидко

та необоротно поглинатися мінералами ґрунту, такими як органічні речовини та карбонати у лучних ґрунтах, а також окислюватися до Sb (V) за більш низьких значень pH [16].

Територія, на якій проходили воєнні дії, може мати залишкове забруднення, особливо якщо вона стала громадським місцем. У дослідженні [23] виконується оцінка ризику для здоров'я людини після визначення концентрацій Pb, Ni та Zn у верхньому шарі ґрунту колишнього тиру, перетвореного на громадський парк у муніципалітеті Кесаріані (Афіни, Греція).

Повідомляється, що ґрунт колишніх стрільбищ збагачений низкою мікроелементів через присутні у боєприпасах метали, які викидаються у повітря та осідають на землю. Потенційне забруднення колишнього стрільбища можна не помітити, коли місце вже реконструйовано, але існує ймовірність того, що навіть через багато років забруднюючі речовини все ще залишаються на місці як прихована загроза, оскільки мікроелементи можуть залишатися у ґрунті протягом десятиліть і піддаватися процесам змішування, що може змінити їхню біодоступність [23].

Ступінь забрудненості ґрунтів металами можна моніторувати за допомогою рослин, які є хорошими індикаторами ґрунтових умов, в яких вони ростуть. Вони також безпосередньо реагують на стан повітря. Верхівки рослин є колекторами забруднювачів повітря, і їхній хімічний склад може бути хорошим індикатором для забруднених територій, якщо порівнювати його з фоновими значеннями, отриманими для незабрудненої рослинності. Водні та наземні рослини, як відомо, здатні до біонакопичення важких металів, отже є потенційним джере-

лом цих забруднювачів у харчовому ланцюгу людини. Оцінку вмісту важких металів було проведено [24] у зразках рослинності, зібраних на базі підготовки озброєнь Атлантичного флоту (AFWTF) у В'єкесі, Пуерто-Ріко. Щоб зрозуміти потенційні ризики, пов'язані з мобілізацією важких металів через біологічні системи, спочатку необхідно встановити фонові значення, отримані у контрольних місцях. Ця інформація дозволяє краще інтерпретувати значення антропогенних факторів у зміні стану мікроелементів у ґрунті та рослинах.

За допомогою аналізу метаболізму рослин можна встановити підвищену кількість вольфраму (W) у ґрунті. Збільшення військового застосування та, відповідно, виробництва продуктів на основі W сприяє його потраплянню в екологічні системи.

Зокрема, показано [25], що використання W у складі боєприпасів призводить до значного підвищення його концентрації у ґрунті (до 2000 мг/кг).

Результати досліджень [25] виявили, що ризик потрапляння W у харчовий ланцюг був значно більшим у ґрунтах з високим pH через підвищену розчинність переважно мономерного W. Вплив текстури ґрунту на розчинність W та фітодоступність був менш вираженим порівняно з впливом pH ґрунту. Зокрема, проміжними додаваннями W (500 мг/кг) симбіотична фіксація азоту могла компенсувати знижену активність нітратредуктази листя.

Водночас полімерні сполуки W мали загальний негативний вплив на засвоєння поживних речовин і ріст рослин, що свідчить про більшу фітотоксичність W-полімерів [25].

Дослідження біомоніторингу з використанням різ-

них організмів виявили значне забруднення металами, пов'язане з військовою діяльністю, та його небезпеку для біоти. Зокрема, на додаток до значно підвищених рівнів Pb і Cu у ґрунті на нерегульованих майданчиках для стрільби з вогнепальної зброї на відкритому повітрі дослідження біомоніторингу продемонструвало збільшення біоаккумуляції Pb у голчастих (*Bidens alba* L.) і трав'яних креветках (*Palaemonetes paludosus*). Відповідно, листя кульбаби лікарської (*Taraxacum officinale*), що росте у районах бойових дій, також накопичує метали військового призначення (As, B, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Li, Mg, Ni, P, Pb, Sb, Si, Sr, U, V і Zn) [26]. Нещодавнє дослідження показало, що лишайники *Evernia prunastri* та *Ramalina farinacea* характеризуються значним накопиченням металу, а також метаболічним стресом, про що свідчить зміна цілісності клітинної мембрани після трьох місяців на стрільбищі. Подібним чином *Eisenia fetida* (гноєвий черв'як), піддана впливу забрудненого ґрунту зі стрільбища, багатого на Pb, характеризувалася високою смертністю, втратою ваги, а також нижчим ступенем розмноження [11].

Хоча накопичення металів у кормових рослинах, що ростуть на колишніх швейцарських військових стрільбищах, не перевищувало національних обмежень, інше дослідження повідомляло про накопичення потенційно токсичних рівнів Pb, Cu та Ni у рослинах, що вказує на потребу у відновленні ґрунту на колишніх швейцарських військових полігонах.

У сукупності ці результати демонструють, що високий рівень металів, накопичених у ґрунті та повітрі у результаті військової діяльності, є біодоступним і накопичу-

ється у живих організмах, які є частиною глобального харчового ланцюга. Водночас можливі певні відмінності через варіації забруднення ґрунту та перенесення металів у біоту [11].

Згідно з сучасними еколого-токсикологічними даними [27], отриманими голландськими екологами, важкі метали/металоїди утворюють таку послідовність за ступенем небезпеки у ґрунтах: Se > Tl > Sb > Cd > V > H > Ni > Cu > Cr > As > Ba (табл.).

Потрапляючи у відкрите середовище, небажані концентрації забруднюючих речовин можуть розсіюватися через численні біотичні та абіотичні процеси. Природне чи антропогенне походження, фрагментація ґрунту через вибухові речовини збільшить співвідношення поверхня/об'єм ґрунту, отже геодоступність металів, утворення пилу та ерозію. Транспортування, час перебування та частка забруднювачів в екосистемі є серйозними соціальними проблемами [24].

Забруднювачі у ґрунті, навіть якщо вони потенційно токсичні, не завдають шкоди, доки вони міцно зв'язані з твердою фазою ґрунту. Тільки рухома (біодоступна) частина може впливати на організми. Ця фракція дуже мінлива, оскільки залежить від багатьох факторів і тривалості контакту між забруднювачами та ґрунтом. Відповідна оцінка ризику забруднюючих речовин спрямована на оцінку біологічних ефектів забрудненого ґрун-

ту, а не на загальну концентрацію забруднювачів, які у ньому містяться [1]. Тому розуміння динаміки мікроелементів та інших забруднювачів може допомогти встановити методи управління, спрямовані на запобігання подальшому впливу їх на людину та довкілля. У свою чергу, можуть бути розроблені механізми кращого відновлення довкілля [24].

Наразі не існує міжнародних стандартів для вимірювання впливу воєнних дій на довкілля [8]. Незважаючи на це кілька країн і міжнародних організацій, включаючи Україну, ЄС та Сполучені Штати, розробили стратегії моніторингу та документування для оцінки впливу збройних конфліктів на довкілля [8, 28]. Попередня оцінка шкоди включає визначення зони бойових дій, визначення ресурсів навколишнього середовища під загрозою, визначення передвоєнних базових умов та оцінку змін у ресурсах, які, ймовірно, постраждали від військових дій, і величини збитків, завданих довкіллю [28]. Попередня оцінка зосереджена на матеріальних втратах, а не на повному впливі війни на екосистемні послуги. Повна оцінка впливу на довкілля буде можливою лише після закінчення війни. Дані, використані у цій попередній оцінці, включають письмові та візуальні записи загальнодоступних даних із Інтернету, дистанційне зондування з використанням технологій супутника та безпілотників у ре-

Таблиця

Небезпека металів/металоїдів згідно з нідерландськими стандартами для ґрунтів [27]

Клас небезпеки	MPA* для ґрунтів, мг/кг
1. Високонебезпечні	<1: Be, Se, Tl, Sb, Cd
2. Помірно небезпечні	1–10: V, Hg, Ni, Cu, Cr, As, Ba
3. Малонебезпечні	>10: Zn, Co, Sn, Ce, Pb, Mo

Примітка: * MPA – maximum permissible addition – гранично допустима добавка.

альному часі, інформацію із відкритих джерел, зібрану цивільними особами за допомогою фотографій і свідчень очевидців, а також відвідування місць з відбором проб довкілля, коли це можливо [8].

Українські державні установи, громадські організації та міжнародні партнери зібтали безпрецедентний обсяг даних про вплив війни на довкілля. Ці оцінки допоможуть зібрати докази, необхідні для визначення компенсацій внаслідок війни. Міжнародне право передбачає, що методи ведення війни слід застосовувати з належною увагою до захисту та збереження природного середовища. Справедливий і міцний мир потребує, серед інших вимог, відбудови та відновлення природного та антропогенного середовища України [8].

Висновки

Вплив воєнних дій на довкілля, особливо до ґрунти та ґрунтові води, створює велику небезпеку для здоров'я і добробуту людей. Тому важливим є встановлення шляхів надходження важких металів до харчових ланцюгів та, відповідно, аналіз їхньої кількості у шарах ґрунтів і рослинах, що може допомогти розробити та впровадити методи моніторингу пошкоджених воєнними діями ґрунтів України для запобігання подальшому впливу забруднювачів ґрунту на людину та навколишнє середовище. У свою чергу, можуть бути розроблені механізми більш ефективного відновлення довкілля.

Внески авторів:

Бабій В.Ф., Кондратенко О.Є. – адміністрування проекту; концептуалізація;

Ждан-Пушкіна О.В. – збір даних, переклад матеріалів; Главачек Д.О. – написання початкового проекту, методології;

Литвиченко О.М. – напи-

сання рецензування та редагування;

Брицун В.М. – моніторинг даних, ресурси.

Рудницька О.П., Станкевич В.В. – ведення, перевірка;

Суворова І.М., Тетеньова І.О. – формальний аналіз, редагування заключного варіанту.

Фінансування. Дослідження профінансоване за рахунок Державного бюджету України (Академією медичних наук України).

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

REFERENCES

1. van Straalen NM, Roelofs D. Genomics technology for assessing soil pollution. *Journal of Biology*. 2008;7(6):19. <https://doi.org/10.1186/jbiol80>

2. Cahyana D, Mulyanto B. A simple definition of soil. *Soil Security*. 2024 May; 16 :100146. <https://doi.org/10.1016/j.soilsec.2024.100146>

3. Spinova Y, Vyshenska I, Sakva A, Vasyliuk O. Study of the military actions impact on the Buchansky district soils (Kyiv Region, Ukraine). EGU General Assembly 2024; 2024 Apr 14-19; Vienna, Austria. <https://doi.org/10.5194/egu-sphere-egu24-21994>

4. Certini G, Scalenghe R, Woods WI. The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*. 2013 Dec;127:1-15. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009>

5. Broomandi P, Guney M, Kim JR, Karaca F. Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*. 2020 Oct 29;12(21):9002. <https://doi.org/10.3390/su12219002>

6. Koban LA, Pfluger AR. Per and polyfluoroalkyl substances (PFAS) exposure through munitions in russia

ukraine conflict. Integrated Environmental Assessment and Management. 2022 Aug 19.

<https://doi.org/10.1002/ieam.4672>

7. Barker AJ, Clausen JL, Douglas TA, Bednar AJ, Griggs CS, Martin WA. Environmental impact of metals resulting from military training activities: a review. *Chemosphere*. 2021 Feb;265:129110. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129110>

8. Hryhorczuk D, Levy BS, Prodanchuk M, Kravchuk O, Bubalo N, Hryhorczuk A, Erickson TB. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024 Jan 5;19(1). <https://doi.org/10.1186/s12995-023-00398-y>

9. Rehman K, Fatima F, Waheed I, Akash MS. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of Cellular Biochemistry*. 2017 Aug 2;119(1):157-84. <https://doi.org/10.1002/jcb.26234>

10. Charles S, Geusens N, Vergalito E, Nys B. Interpol review of gunshot residue 2016–2019. *Forensic Science International: synergy*. 2020;2:416-28. <https://doi.org/10.1016/j.fsi-syn.2020.01.011>

11. Skalny AV, Aschner M, Bobrovnitsky IP, Chen P, Tsatsakis A, Paoliello MM, Buha Djordevic A, Tinkov AA. Environmental and health hazards of military metal pollution. *Environmental Research*. 2021 Oct;201:111568. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111568>

12. Orru H, Pindus M, Harro H, Maasikmets M, Herodes K. Metallic fumes at indoor military shooting ranges: lead, copper, nickel, and zinc in different fractions of airborne particulate matter. *Propellants*,

- Explosives, Pyrotechnics*. 2018 Jan 18;43(3):228-33. <https://doi.org/10.1002/pre.p.201700225>
13. Bailey MJ, Kirkby KJ, Jeynes C. Trace element profiling of gunshot residues by PIXE and SEM-EDS: a feasibility study. *X-Ray Spectrometry*. 2009 May;38(3):190-4. <https://doi.org/10.1002/xrs.1142>
14. Mariussen E, Fjellsbo L, Fromyr TR, Johnsen IV, Karsrud TE, Voie OA. Toxic effects of gunshot fumes from different ammunition for small arms on lung cells exposed at the air liquid interface. *Toxicology in Vitro*. 2021 Apr;72:105095. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2021.105095>
15. Weber AK, Bannon DI, Abraham JH, Seymour RB, Passman PH, Lilley PH et al. Reduction in lead exposures with lead-free ammunition in an advanced urban assault course. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2020 Nov 17;17(11-12):598-610. <https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1836375>
16. Mu ZQ, Xu DM, Fu RB. Insight into the adsorption behaviors of antimony onto soils using multidisciplinary characterization. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022 Apr 2;19(7):4254. <https://doi.org/10.3390/ijerph19074254>
17. Chang C, Li F, Wang Q, Hu M, Du Y, Zhang X, Zhang X, Chen C, Yu HY. Bioavailability of antimony and arsenic in a flowering cabbage-soil system: controlling factors and interactive effect. *Science of the Total Environment*. 2022 Apr;815:152920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152920>
18. Li Y, Lin H, Gao P, Yang N, Xu R, Sun X, Li B, Xu F, et al. Variation in the diazotrophic community in a vertical soil profile contaminated with antimony and arsenic. *Environmental Pollution*. 2021 Dec;291:118248. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118248>
19. Zhong Q, Li L, He M, Ouyang W, Lin C, Liu X. Toxicity and bioavailability of antimony to the earthworm (*Eisenia fetida*) in different agricultural soils. *Environmental Pollution*. 2021 Dec;291:118215. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118215>
20. Busby RR, Barbato RA, Jung CM, Bednar AJ, Douglas TA, Ringelberg DB, Indest KJ. Alaskan plants and their assembled rhizosphere communities vary in their responses to soil antimony. *Applied Soil Ecology*. 2021 Nov;167:104031. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104031>
21. Rong Q, Nong X, Zhang C, Zhong K, Zhao H. Immobilization mechanism of antimony by applying zirconium manganese oxide in soil. *Science of the Total Environment*. 2022 Jun;823:153435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153435>
22. Xia B, Yang Y, Li F, Liu T. Kinetics of antimony biogeochemical processes under pre-definite anaerobic and aerobic conditions in a paddy soil. *Journal of Environmental Sciences*. 2022 Mar;113:269-80. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.06.009>
23. Urrutia-Goyes R, Argyraki A, Ornelas-Soto N. Assessing lead, nickel, and zinc pollution in topsoil from a historic shooting range rehabilitated into a public urban park. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2017 Jun 30;14(7):698. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070698>
24. Massol-Deyá A, Páirec D, Pérez E, Berrios M, Dhaz E. Trace elements analysis in forage samples from a US navy bombing range (vieques, puerto rico). *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2005 Aug 14;2(2):263-6. <https://doi.org/10.3390/ijerph2005020009>
25. Oburger E, Vergara Cid C, Preiner J, Hu J, Hann S, Wanek W, Richter A. PH-Dependent bioavailability, speciation, and phytotoxicity of tungsten (W) in soil affect growth and molybdoenzyme activity of nodulated soybeans. *Environmental Science & Technology*. 2018 Apr 27;52(11):6146-56. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06500>
26. Bijeli L, Puntari D, Gvozdi V, Vidosavljevic D. Presence of war related elements in dandelion (*Taraxacum officinale*) as a possible consequence of military activities in east Croatia. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*. 2018; 68(3):264–272. <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1394485>
27. Crommentuijn T, Sijm D, de Bruijn J, van den Hoop M, van Leeuwen K, van de Plassche E. Maximum permissible and negligible concentrations for metals and metalloids in the Netherlands, taking into account background concentrations. *Journal of Environmental Management*. 2000 Oct;60(2):121-43. <https://doi.org/10.1006/jem.a.2000.0354>
28. Wenning RJ, Tomasi TD. Using U.S. natural resource damage assessment (NRDA) to understand the environmental consequences of the war in Ukraine. *Integrated Environmental Assessment and Management*. 2022 Nov 29. <https://doi.org/10.1002/ieam.4716>

Стаття надійшла до редакції 12.09.2024