

УДК 368

DOI <https://doi.org/10.32782/apcmj.2025.1.1>**Белоусова Наталія Володимирівна,**

доктор економічних наук, професор,
професор кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою
факультету архітектури, будівництва та дизайну,
Державний університет «Київський авіаційний інститут»,
просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5829-1467>
Researcher ID: GLS-2730-2022
Scopus-Author ID: 58034558900
E-mail: nataliia.belousova@npp.nau.edu.ua

АНАЛІЗ ТРАНСФОРМАЦІЇ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ ВНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ

Анотація. Виконано аналіз рівня трансформації ґрунтів на прикладі Сартанської громади (Донецька область), де найбільш суттєво відчуються наслідки бойових дій, починаючи із 2014 року. Використано методики прямого й опосередкованого оцінювання впливів на ґрунти, наслідком чого є глибока, а іноді остаточна трансформація ґрунтового покриву. Використана об'єктно орієнтована програма застосування імітаційних моделей у середовищі "Matlab Simulink", яка дозволяє визначити рівень деградаційних процесів у ґрунтах унаслідок антропо-техногенного навантаження воєнною технікою та вибуховими речовинами різного хімічного наповнення. Означені основні інтегральні показники фізико-хімічних сполук, що мають суттєвий вплив на якість ґрунтового покриву та стан екологічного середовища після їх потрапляння у ґрунт. На прикладі математичної моделі розповсюдження воєнно-техногенних забруднень проведено низку науково-практичних досліджень, результати яких доводять активне та стрімке підвищення вмісту негативних для ґрунтового середовища сполук, які нехарактерні для стабільного ґрунту. Доведено, що ці забруднюючі сполуки мають різні рівні розчинності у воді та високий ступінь проникнення в перехідні шари ґрунту, де, після вивільнення, контактують із ґрунтом, поглинаються і адсорбуються його частинками. Досліджувані автором ряд хімічних елементів впливає на здоров'я людей і спричиняє атеросклероз, злоякісні новоутворення, порушення апарату спадковості. Такий алгоритм трансформаційних процесів притаманний практично всім об'єктам фіто- та біоценозів. Тому логічним є використання епідеміологічного моніторингу, який є необхідним складником комплексної програми дослідження території воєнно-техногенних впливів. Запропоновано інтегральну модель визначення рівня забруднення ґрунтів різними антропо-техногенними механізмами та предметами, що використовуються під час війни.

Ключові слова: трансформація ґрунтів, інтегральна модель визначення рівня забруднення ґрунтів, геохімічний стан ґрунтів, фізико-хімічні сполуки техногенного походження.

Bielousova Nataliia. Analysis of soil transformation in Ukraine as a result of military operations

Abstract. An analysis of the level of soil transformation was carried out using the example of the Sartan community (Donetsk region), where the consequences of military operations were most noticeable, starting in 2014. Methods of direct and indirect assessment of impacts on soils were used, resulting in deep and sometimes final transformation of the soil cover. An object-oriented program for applying simulation models in the Matlab Simulink environment was used, which allows one to determine the level of degradation processes in soils due to anthropogenic load from military equipment and explosives of various chemical contents. The main integral indicators of physicochemical compounds that have a significant impact on the quality of the soil cover and the state of the ecological environment after they enter the soil have been determined. Using the example of a mathematical model of the spread of military-technogenic pollution, a number of scientific and practical studies have been carried out, the results of which prove an active and rapid increase in the content of compounds negative for the soil environment, which are not typical for stable soil. These pollutants have been shown to have varying levels of solubility in water and a high degree of penetration into the transition layers of the soil, where upon release they come into contact with the soil, are absorbed and adsorbed by its particles. A number of chemical elements studied by the author affect human health and contribute to the occurrence of atherosclerosis, malignant neoplasms, violation of the apparatus of heredity. A similar algorithm of transformation processes is inherent in almost all phyto- and biocenoses. Therefore, it is logical to use epidemiological monitoring, which is a necessary component of a comprehensive program for studying areas

of military-technogenic impacts. An integral model is proposed for determining the level of soil contamination by various anthropogenic mechanisms and objects that are used during the war.

Key words: soil transformation, integral model for determining level of soil pollution, geochemical state of soils, physicochemical compounds of technogenic origin.

Вступ. Ведення активних воєнних дій завжди призводить до негативного антропо-техногенного впливу на природно-ресурсний потенціал місцевості. Вивчення наслідків війн, в історичному аспекті, дає можливість краще зрозуміти екологічні проблеми сьогодення. Серед основних показників екологічного середовища аналіз стабільності ґрунтового покриву, дані якого виходять із загальносформованих усереднено-інтеграційних показників.

Найбільш очевидним перетворення екологічного стану природного середовища є пряме знищення ґрунтового-рослинного покриву (цілеспрямоване завдання шкоди у процесі спалювання полів і садів, випалювання територій для виявлення укриттів противника, риття окопів і бомбардування шляхів постачання тощо). Тип наслідків, що часто залишається менш очевидним під час воєнних дій, може мати довгостроковий вплив на ґрундове середовище.

Для оцінювання непрямого впливу на природне середовище зазвичай потрібен більш тривалий час, а наслідки трансформації (або деградації) ґрунтів буде важко передбачити (наприклад, втрата буферності ґрунтів, засолення, дегуміфікація, заболочування тощо).

Матеріали та методи. Під час активної бойової фази зазвичай охоплюється обмежена територія, на якій використовується низка механічної техніки та вибухових пристроїв, що в комплексі мають суттєвий вплив на всі складники ландшафтної структури. Найбільше антропо-техногенне навантаження відчувають на собі ґрунт як природне тіло й ареал життєдіяльності органіки. Тому масове використання різноманітної бойової техніки та снарядів у процесі ведення воєнних дій призводить до значних порушень поверхневого ґрунтового шару та має впливові зміни в навколишньому природному середовищі.

На основі моделей, що існують, які здатні імітувати природне середовище у про-

грамі “Matlab Simulink”, українські науковці О.І. Лисенко, С.М. Чумаченко, І.В. Чеканова, А.М. Турейчук була розроблена програма, орієнтована на об’єкт дослідження, яка дозволяє застосувати метод моделювання стану ґрунтового шару з низькою та високою інтенсивністю воєнно-техногенного навантаження, з урахуванням показників забруднення та тактико-технічних характеристик боєприпасів, що застосовуються під час ведення бойових дій [19, с. 86–139].

Метод моделювання імітаційних ситуацій дозволяє отримати практичні результати досліджень для оцінювання інтенсивності динамічних процесів у ґрунтах, діагностика яких відбувається протягом 10 років, а також оцінити вплив воєнно-техногенного навантаження наслідків бойових дій на загальний стан гео- й екосистем. Окрім того, даний метод використовується як практичний інструмент у процесі ухвалення остаточних рішень щодо процедури створення рекомендацій у вигляді реабілітаційних заходів екологічної безпеки для мешканців (як для людей, так і для фітота зооценозу) зони ведення бойових дій.

Для розрахунку показників антропо-техногенних забруднень унаслідок воєнних дій (різноманітного характеру та зони поширення) використовують математичні розрахунки у формулах, зокрема й формули (моделі) для визначення рівня тиску різних рідин у тріщинах p_1 [20, с. 225–228]:

$$\frac{\partial p_1}{\partial t} - \eta \frac{\partial}{\partial t} \operatorname{div} \operatorname{grad} p_1 = \chi \operatorname{div} \operatorname{grad} p_1$$

$$\text{при } \chi = \frac{k_1}{\mu(\beta_{c_2} + m_0\beta)}, \quad \eta = \frac{k_1}{\alpha}, \quad (1)$$

де χ – коефіцієнт рівня тріщинуватості, пористості, провідності об’єкта дослідження (середовища), який залежить від глибини тріщин (рівня проникності) k_1 , стискання блоків; η – коефіцієнт, який вказує на нові показники тріщинуватості та пористості породи (за

$\eta \rightarrow 0$ – зменшуються блоки та зростає ступінь тріщинуватості породи, за звичайної фільтрації ґрунту за пружного режиму); α – коефіцієнт, який характеризує рівень швидкості й інтенсивності обміну рідини у тріщинах, залежно від проникності у тріщини порід k_2 (за міру k_2 можна взяти питому поверхню тріщин σ):

$$\sigma \sim \frac{1}{L}. \quad (2)$$

У процесі практичного співвідношення показників отримуємо таке рівняння:

$$\alpha \sim k_2 \sigma^2. \quad (3)$$

У підсумку ми отримуємо нову модель рівняння, яка показує реальну картину рівня впливу:

$$\eta \sim \frac{k_1}{k_2 \sigma^2} \sim \frac{k_1}{k_2} L^2, \quad (4)$$

де L – середній розмір окремого блока (питома поверхня тріщин обернено пропорційна середньому розміру окремого блока) [17, с. 163–172].

Окрім того, значення коефіцієнтів запропонованого вище рівняння можна змінювати, щоб отримати додатково результати фільтрації рідини для звичайного пористого або тріщинуватого середовища.

Під час ведення бойових дій відбувається надмірне антропо-техногенне забруднення ґрунтів унаслідок використання боєприпасів, яке констатується під час візуального моніторингу якості ґрунту або в лабораторно-аналітичному дослідженні, характеризується наявністю додаткових домішок у формі залишків (частинок, конкрецій) хімічних сполук, які потрапляють у ґрунт шляхом розсіювання [18, с. 762–769].

Хімічно-забруднювальні сполуки боєприпасів характеризуються різними рівнями розчинності у воді та різною здатністю проникнення в перехідні шари ґрунту (частіше за все високим рівнем активного проникнення). Але найбільша концентрація таких шкідливих хімічних сполук знаходиться у приповерхневому шарі ґрунту (до 15 см) (на рисунку 1 позначено літерою «а»). У процесі

вивільнення сполук вибухових речовин відбувається швидкий контакт із компонентами ґрунту (на рисунку 1 позначено літерою «с») та подальше їх поглинення і адсорбція частинками ґрунту (на рисунку 1 позначено літерою «в») (рис. 1) [19].

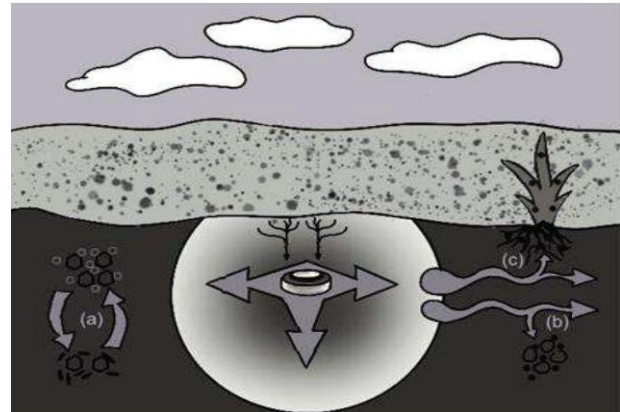


Рис. 1. Поведінка сполук вибухових речовин у ґрунтах

Примітка: джерело [19]

Тривалість процесу адсорбції залежить переважно від структури нових сполук, що потрапляють у ґрунт [19]. Незважаючи на попередні дослідження науковцями воєнно-техногенних впливів на якість ґрунтів, сьогодні показує нам, що сучасна війна передбачає використання новітніх розробок використання наповнювачів снарядів, отже, і нових хімічних концентрацій, які мають несприятливий вплив на здоров'я людей і серйозні наслідки для навколишнього природного середовища.

Уже доведено, що надмірно висока концентрація важких металів у ґрунті та воді може призводити до ураження або зміни діяльності найважливіших систем організму – центральної нервової системи, імунної системи, кровотворення, внутрішньої секреції тощо. Окремі хімічні сполуки здатні спричиняти атеросклероз, злоякісні новоутворення, порушення апарату спадковості. Тому постійний моніторинг якості навколишнього природного середовища в зонах ведення бойових дій є необхідним складником комплексної програми дослідження територій воєнно-техногенних впливів [18, с.762–769].

Для розуміння характеру вищезгаданих впливів на ґрунти, воду та населення у статті пропонуються практичні дослідження, виконані в межах Сартанської громади (Донецька область) як території, яка відчула на собі впливи забруднювальних речовин на ґрунти та наслідки цих впливів під час застосування боєприпасів.

Результати. Як відомо, вміст органічних сполук відіграє важливу роль у формуванні ґрунтів, їх типізації, рівні господарського використання, застосування різних методів обробки землі тощо. Трансформація ґрунтового покриву в бік збільшення металів, хімічних сполук потребує використання тих методів і методик, які забезпечують адсорбцію ґрунту та визначають рівень фізико-механічного й еколого-хімічного забруднювальних впливів речовин на ґрунтове середовище [14].

Наприклад, у ґрунтах, які характеризуються лужністю, спостерігається досить високий рівень розчиненого органічного вуглецю, що в підсумку може призвести до утворення металоорганічних поєднань, які відзначаються значною рухливістю (свинцю (Pb), міді (Cu) та нікелю (Ni)), через значні взаємозв'язки з органічною речовиною і різними органічними домішками [15, с. 567–575].

Період потрапляння, проникнення та закріплення важких металів у ґрунті залежить не тільки від кількісно-якісних хімічних характеристик металів, органічної речовини, мінералогічного складу ґрунту, але й від складу, щільності, пористості та типу ґрунотвірної породи. Попередні дослідження довели, що якість (типізація) ґрунту різниться за вмістом природних компонентів (глини, супісєй, за типом материнської породи тощо) і органічної речовини (біоценозів), загальнопланетарними закономірностями: вологістю, швидкістю газового обміну з атмосферою, кліматичними особливостями, мікробіологічною активністю та іншими ландшафтно-геохімічними чинниками (Таблиця 1) [16, с. 179–191].

Оцінювання еколого-геохімічного стану території Сартанської громади (Донецька область), яка стала експериментальним майданчиком, показала, що майже всі типи воєнно-техногенного навантаження є потуж-

ними забруднювачами ґрунтового покриву порівняно з іншими видами впливу.

Така ситуація практичного дослідження пояснюється специфікою впливів боєприпасів, горючо-мастильних речовин та інших техногенних компонентів (бойові машини, танки, радіолокаційна воєнна техніка тощо) на здатність ґрунту зберігати свої природні властивості та відновлювати їх природним шляхом.

Під час виконання кожного бойового завдання із застосуванням вибухових пристроїв відбувається комплексне забруднення ґрунту продуктами вибуху й уламками боєприпасів, характер розповсюдження та вплив яких на навколишнє середовище значною мірою залежать від швидкості вибухового перетворення вибухової речовини, маси вибухової речовини снаряда (Таблиця 2).

Для всіх видів вибухових пристроїв, які використовуються під час обстрілів (фугасні, осколково-фугасні, бронебійні, кумулятивні снаряди та міни), характерним є утворення ударної хвилі та продуктів вибуху, які розповсюджуються в межах природного середовища. Швидкість ударної хвилі та сам вибух снаряда відбувається миттєво за 10^{-4} – 10^{-5} секунд зі збільшенням радіуса руйнування та маси вибухової речовини у снаряді. Для снарядів 122 та 152 мм (маси вибухової речовини відповідно 4,5 та 8,4 кг) радіус руйнування ґрунтового покриву середньої щільності дорівнює 1,65 (для снаряда 122 мм) та 2,03 м (для снаряда 152 мм) [3, с. 83–92].

Виходячи із цих даних, можемо констатувати, що під час проведення бойових стрільб відбувається суттєва деформація ґрунту в усіх напрямках розповсюдження ударної хвилі. Тому, за даними попередніх досліджень, на тій території, де проводять такі стрільби, уже на глибині до 2 м порушується однорідність ґрунту та відбувається утворення тріщин. Шкідливі впливи на ґрунт, які завдаються під час проведення вогневої підготовки, мають точковий характер, по-перше, вони досить короточасні за своєю дією, якщо порівнювати із процесом інфільтрації рідини у ґрунти, по-друге, вони значно менші за ту територію, на якій відбувається процес розповсюдження забруднення [21].

Таблиця 1

**Складники воєнно-техногенного навантаження на ґрунтовий покрив
від різних видів озброєння та воєнної техніки**

Вид забруднення	Фактори забруднення		Стрілецька зброя				Гранатомет	Ручні гранати	Артилерія				Реактивна сист. залп. вогню	Протитанковий ракетний	Танки	БМП- подібні	Автомобільна техніка
			Пістолет	Гвинтівка	Автомат	Кулемет			Гаубиці	Зенітні гармати	Польові гармати	Міномети					
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Механічне	Гільзи		+	+	+	+			+	+	+						
	Снаряди, осколки						+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Кулі, осколки куль		+	+	+	+											
	Пакувальні матеріали з-під боєприпасів		+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
	Промаслене сміття		+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+	+	+
	Ерозія ґрунту від вибуху						+	+	+		+	+	+	+	+	+	
	Ерозія ґрунту від сховищ								+	+	+	+	+		+	+	
	Ерозія ґрунту від руху								+	+	+	+	+		+	+	+
	Ущільнення ґрунту												+		+	+	+
Кількість факторів механічного забруднення			4	4	4	4	4	2	7	6	7	6	6	4	7	7	3
Фізичне	Теплове	згоряння порохового заряду	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
		згоряння розривної речовини					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
		робота двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ)											+		+	+	+
	Акустичне	згоряння порохового заряду	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
		згоряння розривної речовини					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
		робота ДВЗ											+		+	+	+
	Вібраційне	згоряння порохового заряду	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
		згоряння розривної речовини					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
		робота ДВЗ											+		+	+	+
		рух транспортних засобів								+	+	+	+		+	+	+
	Світлове	згоряння порохового заряду							+	+	+	+	+	+	+	+	
		згоряння розривної речовини							+		+	+	+	+	+	+	
Кількість факторів фізичного забруднення			3	3	3	3	6	3	8	8	9	9	12	8	12	12	4
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Хімічне	Порохові гази від згоряння	порохового заряду	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
		розривної речовини					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Частки, які не згоріли	порохового заряду	+	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	
		розривної речовини					+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Мастильні матеріали		+	+	+	+	+		+	+	+	+			+	+	+
	Вихлопні гази ДВЗ								+	+	+	+	+		+	+	+
	Забруднення ґрунту нафтопродуктами								+	+	+	+	+		+	+	+
	Забруднення води нафтопродуктами														+	+	+
	Важкі метали		+	+	+	+											
	Вольфрам, карбід вольфраму, важкий сплав														+		
Кількість факторів хімічного забруднення			4	4	4	4	5	2	7	7	7	7	6	4	9	8	4
Загальна кількість факторів забруднення			11	11	11	11	15	7	22	21	23	22	24	16	28	27	11

Примітка: джерело [16].

Таблиця 2

**Характеристика впливів забруднювальних речовин різними типами зброї
на природну систему географічного середовища**

Вид зброї, що використовується	Тип зброї, що використовується	Забруднювальні речовини, що виникають унаслідок бойової діяльності
Стрілецька зброя	Пістолети, снайперські гвинтівки, автомати, кулемети ручні, кулемети ротні	Повітря: CO, NO ₂ , SO ₂ , HF, Hg, CnHm, CH ₂ O, Cu, Mn, Al, Mg, Fe C, Pb.
		Вода: Cu, Fe, Al, Mn, Zn, Pb, Sn, Mg.
		Ґрунт: Cu, Fe, Al, Fe, Mn, Zn, Pb, Sn, Mg, P, Al, хлориди, нітрати.
Гранатомети, стрілецька зброя, ручні гранати	автоматичні (підствольні), ручні станкові протитанкові	Повітря: CnHm, CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , C ₂₀ H ₁₇ , Cu, Mn, Al, Mg, Fe C, Pb.
		Вода: Cu, Fe, Al, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr.
		Ґрунт: Cu, Fe, Al, Fe, Mn, Zn, Pb; Sn, Mg, P, Al, Hg, Cd, Cr.
Озброєння БМП (БТР): стрілецька зброя, ручні гранати	14,5 мм КВТ 73 мм П 30 мм П 14,5 мм ВС	Повітря: CnHm, CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , CH ₄ , NH ₃ , SO ₂ , H ₂ S, HCl, Cl ₂ , HF, H ₂ SO ₄ , CH ₂ O, Cu, Mn, Al, Mg, Fe, C, Pb.
		Вода: Cu, Fe, Al, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr, нафтопродукти.
		Ґрунт: Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr.
Озброєння бойових машин піхоти (БМП, БТР), ручні гранати		Повітря: C, CnHm, CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , CH ₄ , NH ₃ , SO ₂ , H ₂ S, HCl, Cl ₂ , HF, H ₂ SO ₄ , CH ₂ O, C ₂₀ H ₁₇ , Cu, Mn, Al, Mg, Fe C, Pb.
		Вода: Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr, нафтопродукти.
		Ґрунт: Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr, нафтопродукти.
Озброєння танків, озброєння САУ, стрілецька зброя, ручні гранати	23 мм ВЯ 115 мм ТП 125 мм ТП	Повітря: CnHm, CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , CH ₄ , NH ₃ , O ₂ , C, SO ₂ , H ₂ S, Cl ₂ , HF, HCL, CH ₂ O, H ₂ SO ₄ , C ₂₀ H ₁₇ , Cu, Mn, Al, Mg, Fe C, Pb, нафтопродукти, пил.
		Вода: Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Zn, Hg, Pb, Cd, Cr, P, нафтопродукти.
		Ґрунт: Cu, Fe, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr, P, нафтопродукти.
Ствольна артилерія, міномети	76 мм П ЗІС-3; 85 мм П Д-44; 100 мм ПТП МТ-12; 122 мм ГД-30; 152 мм ПГ Д-20; 152 мм СГ 2С5; 152 мм СГ 2С19; 203,2 мм П 2С7; 82 мм БМ-38, 2Б9; 120 мм ПМ; 120 мм М 2С9, 2С12; 240 мм М2С4	Повітря: CnHm, CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , CH ₄ , NH ₃ , C, SO ₂ , H ₂ S, HCl, Cl ₂ , HF, H ₂ SO ₄ , C ₂₀ H ₁₇ , CH ₂ O, Cu, Mn, Al, Mg, Fe, C, Pb.
		Вода: Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Zn, Hg, Pb, Cd, Cr, нафтопродукти.
		Ґрунт: Cu, Fe, Al, Mn, Sn, Mg, Pb, Zn, Hg, Cd, Cr, нафтопродукти.
Рух самохідно-артилерійських і зенітних установок, БМП, колісних, гусеничних бронетранспортерів		Повітря: CnHm, CO, CO ₂ , NO, NO ₂ , C ₂₀ H ₁₇ .
		Вода: Pb, нафтопродукти.
		Ґрунт: Pb, нафтопродукти.

Примітка: джерело [21].

Складники вибухових пристроїв мають низку важких металів, іони яких характеризуються слабким рівнем розчинення у воді, але за невеликих швидкостей руху

рідини можуть переміщатися разом із нею [1, с. 45–55].

Характеристики застосування вибухових речовин у боєприпасах і піротехнічних

засобах (піроксилінові та нітрогліцеринові порохи), що застосовуються у процесі бойової діяльності танкових підрозділів, наведені в таблиці 3 [21].

Окрім того, під час проведення стрільб із різним складом пороху та вибухових речовин утворюються такі речовини, як азот, сажа, вуглеводні, свинець, двоокис марганцю та інші. Наприклад, під час пострілу одного осколково-фугасного снаряда з гармати 115 мм утворюється продукт горіння вибухової речовини гексогену. Якщо кількість газу гексогену взяти за 100%, то приблизно 30% газів припадає на розсіювання в повітрі, а інша їхня частина (важкі фракції, важкі метали) осідає на ґрунти [22].

В аналітичному оцінюванні таких досліджень велике значення має часовий аспект, що впливає на період забруднення навколишнього середовища (повітря, ґрунти, водні об'єкти, біологічне розмаїття). Для ґрунтів, у перспективі, спостерігається підкислення ґрунтового середовища, як наслідок, підвищення швидкості міграції забруднювачів, які у формі розчинних органічних речовин перерозподіляються як у горизонтальному, так і у вертикальному напрямках. Горизонтальна міграція найпомітніша відразу після бомбардувань і відбувається насамперед завдяки повітряному переносу.

Температура, річна кількість опадів і характер їх територіального розподілу також мають суттєвий вплив на швидкість розчинення вибухових речовин у ґрунті, підвищують їхню біологічну доступність. Максимально швидкі показники забруднення природного середовища зафіксовані для тротилу, тоді як найнижчі показники характерні для гексогену [10, с. 1546–1555]. Окрім того, підвищення навколишньої температури також впливає на політ куль у діапазонах пострілу [11, с. 526–534], а показники вологості ґрунту підвищують рівень корозії металу (ґрунти з періодичним затопленням класифікуються як помірно корозійні) [9].

Наявність рослинного покриву в межах територій із воєнно-техногенним навантаженням також впливає на рухливість вибухових речовин і важких металів, зменшує їх міграцію до підземних вод [12, с. 81–91]. Тому в період відновлення природного середовища в межах деокупованих територій використовуються багаторічні трави (наприклад, міскантус), деревні види (верби, тополя) [13, с. 1051–1064].

З наведених даних випливає, що більшість забруднювачів, які є наслідком бойової діяльності, являють собою газоподібні, розчинні чи тверді дрібнодисперсні речовини.

Незважаючи на інноваційні технології створення та використання сучасних бойо-

Таблиця 3

Фізичні, хімічні та балістичні характеристики бездимних порохів

Фізичні, хімічні та балістичні характеристики	Піроксилінові порохи	Нітрогліцеринові порохи
Питома вага, кг/дм ³	1,56–1,64	1,54–1,62
Гравіметрична щільність, кг/дм ³	0,5–0,9	0,5–0,9
Гігроскопічність (вміст води), %	1–2	0,5–1
Температура спалаху, °C	170–180	162–174
Питомий об'єм газів, дм ³ /кг	900–950	00–1 000
Теплота вибухового перетворення, кал/кг	700–900	650–1 250
Температура вибухового перетворення, °K	2 900–3 100	2 400–3 600
Сила пороху, кг дм/кг	(1 000–1 050) · 103	(900–1 250) · 103
Вміст азоту в нітроцелюлозі (піроксиліні) N, %	12,6–13,1	11,8–13,0
Вміст нітрогліцерину, %	0,5–2,5	20–40
Вміст стабілізатора, %	0,6–7,0	1–8
Вміст домішок, %	0,06–0,09	1–10
Коволум	0,001 w 1	0,001 w 1
Швидкість горіння за умови щільності в 1 кг/см ² , мм/с	0,06–0,09	0,10–0,20

Примітка: джерело [21].

вих машин під час війни, більшість бойових машин досі оснащені двигунами переважно на дизельному пальному, яке здатне викидати в атмосферу приблизно 200 найменувань забруднювальних речовин загальним обсягом до 2,6 кг (на 1 км пробігу), зокрема й нафтопродукти, важкі метали, ароматичні з'єднання (за один рік експлуатації однієї бойової машини викидається приблизно 6,3 кг свинцю, 180 кг оксиду азоту, 140 кг оксиду вуглеводнів) [2].

Отже, активна експлуатація бойової техніки під час війни призводить до високих ступенів забруднення території горюче-мастильними продуктами, свинцем і різними супутніми хімічними сполуками, як-то: свинець, оксид вуглецю, кадмій та інші, які накопичуються у ґрунтах і підсилюють їхню трансформацію [22].

Висновки. Маючи таблично-інформаційну статистику, викладену вище, ми можемо констатувати, що антропо-техногенні впливи під час війни зумовлюють специфічні забруднення природного середовища: ґрунтового, водного, біологічного й атмосферного. Разом із викидами органічних забруднювачів (вуглеводнями та поліхлорованими біфенілами) спостерігається забруднення ґрунтів важкими мета-

лами унаслідок використання різних систем зброї [4].

Механізм мобілізації забруднювальних речовин у ґрунті значною мірою залежить від утворення органічних комплексів, оскільки комплексне новоутворення змінює доступність до біологічного середовища, підвищує розчинність самих речовин, отже, змінює наявні форми забруднень ґрунту [8].

Викиди забруднювальних речовин категорії вибухонебезпечних мають безпосередній вплив на середовище існування та стан здоров'я цивільного населення (негативні наслідки для здоров'я, пов'язані із серцево-судинними, метаболічними, неврологічними й онкологічними захворюваннями) [5].

Накопичення в організмі людини зазначених вище речовин створює прецедент появи чинника розвитку різноманітних патологій, поширення і ускладнення перебігу низки хвороб, які по-різному можуть впливати на стан здоров'я людини або спричиняти суттєві трансформації в її організмі, навіть летальні. Тому констатація значного вмісту аномально високих токсичних концентрацій у формі різних необхідних для живих організмів мікроелементів є суттєвою загрозою для людини [6, с. 33–36; 8, с. 41–44].

Список використаних джерел:

1. Лисенко А.І., Чумаченко С.М., Чеканова І.В., Турейчук А.М. Математична постановка задач оптимального управління екологічним станом техногенно навантажених територій. *Адаптивні системи автоматичного управління* : міжвідомчий науково-технічний збірник. 2002. Вип. 5 (25). С. 45–55.
2. Підлісна М.С., Мазор І.Г., Катеринчук Б.А. Екологічна безпека військ. Київ, 1998. 130 с.
3. Neffe S. Chemical aspects of environmental contamination at military sites. *Environmental Contamination and Remediation Practices at Former and Present Military Bases*. Dordrecht : Springer, 1998. P. 83–92.
4. Barker A.J., Clausen J.L., Douglas T.A., Bednar A.J., Griggs C.S., Martin W.A., Environmental impact of metals resulting from military training activities: a review. *Chemosphere*. 2021. Vol. 265. P. 110–127. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129110>.
5. Rehman K., Fatima F., Waheed I., Akash M.S.H. Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *J. Cell. Biochem*. 2018. Vol. 119 (1). P. 157–184. URL: <https://doi.org/10.1002/jcb.26234>.
6. Бардик Ю.В. Еколого-гігієнічні та токсикологічні проблеми життєдіяльності. *Сучасні проблеми токсикології*. 2005. № 4. С. 33–36.
7. Вадзюк С.Н., Федорців О.Є. Медико-екологічні проблеми в сучасних умовах. *Збалансований розвиток країни – шлях до здоров'я і добробуту нації* : матеріали Українського екологічного конгресу, 21 вересня 2007 р. Київ : Центр екологічної освіти та інформації, 2007. С. 41–44.
8. Chapman G., Yudken J. Briefing book on the military industrial complex. Council for a livable world education fund. Washington DC, 2000. 543 p.

9. Beck A.J., Gledhill M., Schlosser C., Stamer B., Bottcher C., Achterberg E.P. Spread, behavior, and ecosystem consequences of conventional munitions compounds in coastal marine waters. *Front. Mar. Sci.* 2018. Vol. 5. P. 141.
10. Lynch J.C., Myers K.F., Brannon J.M., Delfino J.J. Effects of pH and temperature on the aqueous solubility and dissolution rate of 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT), hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine (RDX), and octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine (HMX). *J. Chem. Eng. Data* 2001. Vol. 46 (6). P.1549–1555.
11. Cao X., Ma L.Q., Chen M., Hardison D.W., Harris W.G., Weathering of lead bullets and their environmental effects at outdoor shooting ranges. *J. Environ.* 2003. Vol. 32 (2). P. 526–534
12. Fayiga A.O. Remediation of inorganic and organic contaminants in military ranges. *Environ. Chem.* 2019. Vol. 16 (2). P. 81–91.
13. Rylott E.L., Bruce N.C. Right on target: using plants and microbes to remediate explosives. *Int. J. Phytoremediation.* 2019. Vol. 21 (11). P. 1051–1064.
14. Kabata-Pendias A. Trace Metals in Soils and Plants, fourth ed. *CRC Press, Boca Raton, FL.* 2010. 654 p.
15. Cuske M., Karczewska A., Galka B. Speciation of Cu, Zn, and Pb in soil solutions extracted from strongly polluted soils treated with organic materials. *Pol. J. Environ. Stud.* 2017. Vol. 26 (2). P. 567–575
16. Billett M.F., Fitzpatrick E.H., Crisser M.S. Long-term changes in the Cu, Pb and Zn content of forest soil organic horizons from North-east Scotland. *Water, Air and Soil pollution.* 1991. Vol. 59. No 1–2. P. 179–191.
17. Pennington J.C., Brannon J.M. Environmental fate of explosives. *Thermochim. Acta* 2002. Vol. 384. P. 163–172.
18. Taylor S., Bigl S., Packer B. Condition of in situ unexploded ordnance. *Sci. Total. Environ.* 2015. Vol. 505. P. 762–769.
19. Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Чеканова І.В., Турейчук А.М. Використання спостерігача Люін-бергера для оцінки та прогнозування стану ускладненої агроєкосистеми із застосуванням математичного та комп'ютерного імітаційного моделювання. *Агробіорізноманіття України: теорія, методологія, індикатори, приклади*. Кн. 2. Київ : ЗАТ «Нічлава», 2005. С. 86–139.
20. Томашевська Т.В. Математичне моделювання процесів фільтрації в екологічно небезпечних зонах : збірник наукових праць. Київ : ННДЦ ОТ і ВБ України, 2001. № 5. С. 225–228.
21. Сплодитель А., Голубцов О., Чумаченко С.М., Сорокіна Л.Ю. Вплив війни Росії проти України на стан українських ґрунтів : результати аналізу. *Land Matrix*. Екодія, 2023. 155 с.
22. Ганошенко О.М., Ганошенко Г.В. Аналіз наслідків впливу воєнних дій на компоненти довкілля України. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження* : IV Міжнародна науково-практична конференція, м. Полтава, НУПІ, 7–8 грудня 2023 р. С. 41–44.

References:

1. Lysenko, A.I., Chumachenko, S.N., Chekanova, I.V., Tureichuk, A.N. (2002). Mathematical formulation of the problem of rational management of the ecological state of technogenically loaded territories. *Adaptive automatic control systems. Interdepartmental scientific and technical collection*. Issue 5 (25) [in Ukrainian].
2. Podlesnaya, M.S., Mazar, I.G., Katerynchuk, B.A. (1998). *Ekologicheskaya sokhrannost' voysk* [Ecological safety of troops]. M.: MO of Ukraine [in Ukrainian]
3. Neffe, S. (1998). Chemical aspects of environmental contamination at military sites. *Environmental Contamination and Remediation Practices at Former and Present Military Bases*. Springer, Dordrecht [in English]
4. Barker, A.J., Clausen, J.L., Douglas, T.A., Bednar, A.J., Griggs, C.S., Martin, W.A. (2021). Environmental impact of metals resulting from military training activities: a review. *Chemosphere*. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.129110 [in English].
5. Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I., Akash, M.S.H. (2018). Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *J. Cell. Biochem.* DOI: 10.1002/jcb.26234 [in English].
6. Bardyk, Yu.V. (2005). *Ekologo-gigiyenicheskiye i toksikologicheskkiye problemy zhiznedeyatel'nosti* [Ecological, hygienic and toxicological problems of life]. Modern difficulties of toxicology [in Ukrainian].
7. Vadzyuk, S.N., Fedortsev, O.E. (2007). *Mediko-ekologicheskkiye trudnosti v sovremennykh usloviyakh* [Medical and environmental difficulties in modern conditions]. Balanced development of the country is the path to the health and well-being of the nation: materials of the Ukrainian Environmental Congress, September 21. 2007 M.: Center for Environmental Education and Information [in Ukrainian].
8. Chapman, G., Yudken, J. (2000). Briefing book on the military industrial complex. *Council for a livable world education fund, Washington DC* [in English].

9. Beck, A.J., Gledhill, M., Schlosser, C., Stamer, B., Bottcher, C., Stemheim, E., Achterberg P. (2018). Spread, behavior, and ecosystem consequences of conventional munitions compounds in coastal marine waters. *Front. Mar* [in English].
10. Lynch, J.C., Myers, K.F., Brannon, J.M., Delfino, J.J. (2001). Effects of pH and temperature on the aqueous solubility and dissolution rate of 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT), hexahydro-1, 3, 5-trinitro-1, 3, 5-triazine (RDX), and octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 3, 5, 7-tetrazocine (HMX). *J. Chem. Eng.* [in English].
11. Cao, X., Ma, L.Q., Chen, M., Hardison, D.W., Harris, W.G. (2003). Weathering of lead bullets and their environmental effects at outdoor shooting ranges. *J. Environ* [in English].
12. Fayiga, A.O. (2019). Remediation of inorganic and organic contaminants in military ranges. *Environ. Chem.* [in English].
13. Rylott, E.L., Bruce, N.C. (2019). Right on target: using plants and microbes to remediate explosives. *Int. J. Phytoremediation* [in English].
14. Kabata-Pendias, A. (2010). Trace Metals in Soils and Plants, fourth ed. *CRC Press, Boca Raton, FL*. [in English].
15. Cuske, M., Karczewska, A., Galka, B. (2017). Speciation of Cu, Zn, and Pb in soil solutions extracted from strongly polluted soils treated with organic materials. *Pol. J. Environ. Stud.* [in English].
16. Billett, M.F., Fitzpatrick, E.H., Crisser, M.S. (1991). Long-term changes in the Cu, Pb and Zn content of forest soil organic horizons from North-east Scotland. *Water, Air and Soil pollution* [in English].
17. Pennington, J.C., Brannon, J.M. (2002). Environmental fate of explosives. *Thermochim* [in English].
18. Taylor, S., Bigl, S., Packer, B. (2015). Condition of in situ unexploded ordnance. *Sci. Total* [in English].
19. Lysenko, A.I., Chumachenko, S.M., Chekanova, I.V., Tureichuk, A.M. (2005). *Ispol'zovaniye nablyudatelya L'yuinbergera dlya otsenki i prognozirovaniya sostoyaniya uslozhnennoy agroekosistemy s primeneniyem matematicheskogo i komp'yuternogo imitatsionnogo modelirovaniya* [Using the Lewinberger observer to assess and predict the state of a complex agroecosystem using mathematical and computer simulation modeling]. Agrobiodiversity of Ukraine: theory, methodology, indicators, examples. Book 2. Kyiv: JSC "Nichlava" [in Ukrainian].
20. Tomashevskaya, T.V. (2001). *Matematicheskoye modelirovaniye protsessov fil'tratsii v ekologicheski opasnykh zonakh: sb. nauch. pr.* [Mathematical modeling of filtration processes in environmentally hazardous areas: collection of articles]. Scientific M. Ave.: NNIC OT and VB of Ukraine [in Ukrainian].
21. Sploditel, A., Golubtsov, O., Chumachenko, S., Sorokina, L. (2023). *Vliyaniye voyny rossii protiv Ukrainy na sostoyaniye ukrainskikh pochv. Rezul'taty analiza* [The influence of Russia's war against Ukraine on the state of Ukrainian soils. Analysis results]. Land Matrix. Ecodia [in Ukrainian].
22. Ganoshenko, O.M., Ganoshenko, G.V. (2023). Analiz posledstviy vliyaniya voyennykh deystviy na komponenty okruzhayushchey sredy Ukrainy [Analysis of the consequences of the influence of military actions on the components of the Ukrainian environment]: *IV International Scientific and Practical Conference "Ecology. Environment. Energy saving"* (p. 41–44). Poltava: NUPP [in Ukrainian].