

УДК 631.4:[504.61:355.01](477.52)

DOI <https://doi.org/10.32782/geotech2025.39.02>

Ольховик Ю.О., Дудар Т.В.

Ольховик Ю.О., доктор технічних наук, професор кафедри екології Державного університету «Київський авіаційний інститут», ORCID: 0000-0001-5653-2370, yolkhovik@gmail.com

Дудар Т.В., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології Державного університету «Київський авіаційний інститут», ORCID: 0000-0003-3114-9732, dtv.nau@gmail.com

ГЕОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ УКРАЇНИ ПІД ЧАС ВІЙНИ

Під час повномасштабного вторгнення Росії в Україну в районі інтенсивних воєнних дій відбувається деградація ґрунтів і виникають техногенні ландшафтно-геохімічні аномалії внаслідок ракетно-артилерійських обстрілів на площі в десятки тисяч квадратних кілометрів. Зміну ландшафтів і геохімічні аномалії підвищеного змісту важких металів у ґрунті традиційно пов'язують із численними вибухами боєприпасів. Інтенсивність війни поставили перед екологами та виробниками сільськогосподарської продукції проблему забруднення ґрунтів залишками вибухових речовин (тротил, гексоген, динітротолуол), які є токсичними речовинами. Детонація низького порядку або часткова детонація боєприпасів із значним строком зберігання утворюють достатньо великі за розміром частинки токсичних вибухових речовин, які осідають на ґрунт і утворюють локальні джерела забруднення з концентрацією до декількох грамів на квадратний метр. Сільськогосподарське виробництво на землях, які зазнали інтенсивний вплив артилерійських обстрілів, може призвести до наявності в продукції помітних слідів токсичних компонентів вибухових речовин, що унеможливіть безпечність споживання, а отже, експорт зернових культур. Кількісну оцінку рівнів забруднення внаслідок осадження залишків бризантних ВР необхідно визначати шляхом відбору проб. Ситуація мозаїчності забруднення потребує розробки спеціальної методики, яка передбачитиме як рівномірну сітку точок пробовідбору, так і згущення проб поблизу чітко виражених локальних джерел забруднення. Зазначено актуальність розробки і впровадження комплексу заходів щодо контролю рівня забруднення ґрунтів сільськогосподарського призначення як основи економічної оцінки вибраної для відповідної локації стратегії повоєнного використання сільськогосподарських угідь.

Ключові слова: ґрунт, забруднення, детонація, вибухові речовини, гексоген, тротил.

Вступ. Агресивні воєнні дії РФ проти України, що почалися у 2014 році, викликали багатогранні й часто незворотні негативні екологічні зміни в навколишньому природному середовищі. З початку широкомасштабного вторгнення в лютому 2022 року екологічні наслідки, спричинені окупантами РФ, набули загрозливих форм і спричинили екологічні збитки у 3,8 трлн гривень станом на березень 2025 року (Завдані збитки, 2025. <https://ecozagroza.gov.ua>). Масштаб воєнних дій дає змогу стверджувати, що це є найбільшим воєнним конфліктом XXI століття. Під час війни зафіксовано надходження мільйонів тон забруднювачів у атмосферу й поверхневі води, але найбільш постраждалим компонентом довкілля, безумовно, є ґрунти (Uruskyi et al., 2024). Саме проблеми негативних змін якості ґрунтів, насамперед земельних ресурсів, що використовуються для вирощування продукції сільського господарства, розглянуто в цій роботі. Дослідження виконано в рамках наукової тематики кафедри екології Державного університету «Київський авіаційний інститут» (КАІ) «Відновлення екосистем, порушених внаслідок воєнних дій та інших антропогенних впливів» (№ 0123U101252 від 2023 р.).

Фактори впливу. Зазвичай наслідками впливу воєнних дій на ґрунт передусім пов'язують із механічним впливом у вигляді ущільнення, руйнації структури ґрунту. Безумовними причинами таких змін є рух важкої броньованої техніки, загальна кількість якої налічує десятки тисяч одиниць, і спорудження сотень кілометрів фортифікаційних споруд. Але, на погляд авторів, головним чинником, що призвів до деградації ґрунтів на площі в десятки тисяч квадратних кілометрів і виникнення техногенних ландшафтно-геохімічних аномалій, є інтенсивне застосування ракетно-артилерійської зброї. Тільки за три роки після вторгнення обидві сторони використали, за оцінкою авторів, 30–32 мільйони артилерійських снарядів переважно калібру 152 мм, 5–7 мільйонів мінометних мін переважно калібру 120 мм і до 2 мільйонів ракет 9M22 «Град» калібру 122 мм.

Кожний вибух боєприпасу призводить до утворення вирви, розмір якої і відповідно об'єм викинутого ґрунту залежать від кількості вибухівки, що детонувала. Унаслідок вибуху частково або повністю знищується рослинний і ґрунтовий покрив, сильно

порушується ґрунтовий профіль і гідрологічний режим ґрунтів. Водночас навколо вирви утворюється новий ґрунтовий профіль, не характерний для цієї місцевості, і знижується родючість земельних ресурсів.

Воєнно-техногенний вплив також пов'язаний із забрудненням ґрунтів важкими металами. Адже оболонка кожного боєприпасу виготовлена з чавунного сплаву, а сам снаряд має конструктивні елементи, до складу яких входять мідь, свинець, ртуть і інші метали. Важкі метали застосовуються здебільшого в ініціюючих вибухових речовинах (наприклад, гримуча ртуть, азид свинцю, стибієві сполуки), які забезпечують спрацьовування підрильника та передачу детонації на основний заряд. Водночас пороховий заряд для гармати 155 мм містить 85 грамів свинцевої фольги.

Під час вибуху утворюється велика кількість диспергованих уламків. Під впливом факторів навколишнього середовища зазначені хімічні елементи окислюватимуться, потраплятимуть у кругообіг речовин і включатимуться в трофічні ланцюги, формуючи специфічний спектр забруднення важкими металами. Ця складна суміш хімічних речовин, які осідають в товщі ґрунту та на роки або десятки років, пригнічують ріст рослинності, скорочують популяцію ґрунтових тварин і бактерій, загалом руйнують існуючий там біогеоценоз. Важливо зазначити, що рослини здатні акумулювати в собі важкі метали, якими отруюються ґрунти після вибухів боєприпасів (Ангурець та ін., 2022). Вживання в їжу сільськогосподарських культур, вирощених на полях після обстрілів, може бути небезпечним для життя і здоров'я людей.

Прикладом масштабу забруднення ґрунтів важкими металами є результати експериментальних досліджень вмісту валових форм важких металів у пробах ґрунтів, відібраних на землях сільськогосподарського призначення Сумського та Охтирського районів Сумської обл. Встановлено перевищення ГДК валового вмісту свинцю, цинку та марганцю, міді у зразках ґрунтів з місць бойових дій (Зайцев та ін., 2022). Слід зазначити, що ці результати отримані для зразків із місцевості, де воєнні дії були короточасними й неінтенсивними. За інформацією лабораторії Prime Lab Tech (Україна), у ґрунтах із районів активних бойових дій зафіксовані значні перевищення нормативних концентрацій важких металів (таблиця 1).

Наразі геохіміками й екологами встановлені основні закономірності міграції важких металів в ґрунтах і накопичений значний досвід застосування методів очищення ґрунту (ремедіація), встановлені значення ГДК важких металів у ґрунтах, що дає можливість контролю за станом забруднення. Найефективнішими методами ремедіації є фітосанация, вапнування та застосування біопрепаратів на основі бактерій.

Однак реалії інтенсивності та масштабів війни поставили перед екологами й виробниками сільськогосподарської продукції проблему забруднення ґрунтів залишками вибухових речовин, більшість із яких є токсичними речовинами.

Вибухові речовини. Бризантні вибухові речовини та металні вибухові речовини (пропеленти) – це високоенергетичні хімічні речовини на основі азоту, які швидко вивільняють велику кількість енергії та газоподібних продуктів під час детонації чи пострілу.

Пропеленти зазвичай складаються з нітроцелюлози (NC), просоченої 2,4-динітротолуолом (2,4-ДНТ), або нітрогліцерином і нітрогуанідином. Широко використовуваний у західній зброї пропелент М1 містить до 9 % 2,4-ДНТ. Залишки пропеленту – це частково згорілі та незгорілі частинки металюного порошу, які утворюються за кожного пострілу й осідають на поверхні ґрунту у вигляді гранул розміром 0,5–1 мм. Маса осаду на ґрунти токсичного 2,4-ДНТ суттєво різниться для різних боєприпасів. Наприклад, маса, що виділяється під час пострілу 155-мм гаубиці, оцінюється в 1,2 мг, тоді як маса осаду 2,4-ДНТ для гаубиці 105 мм становила 34 мг на один випущений снаряд (Walsh MR et al., 2009). Для артилерії осаді пропелентів фіксуються на відстані до 75 м від вогневої позиції. З огляду на вищезазначену кількість використаних артилерійських боєприпасів можна очікувати наявності слідів забруднення ґрунтів 2,4-ДНТ, що є стійким у природних умовах канцерогеном.

Сучасні збройні сили як бризантні вибухові речовини зазвичай використовують нітроароматичний тротил (2,4,6-тринітротолуол) і циклічні нітроаміни RDX гексоген (гексагідро-1,3,5-тринітро-1,3,5-тріазин) і октаген (октагідро-1,3,5,7-тетранітро-1,3,5,7-тетразодин) (рис. 1) у вигляді достатньо складних за складом сумішей (Вибухові боєприпаси. Посібник для України. <https://sprotyvg7.com.ua/lesson/>

Таблиця 1. Концентрації важких металів у ґрунтах із районів активних бойових дій (Важкі метали, 2025.

<https://ukragroconsult.com/news/vazhki-metaly-v-gruntah-ukrayiny-pislya-bojovyh-dij-zagrozy-ta-metody-remediaciyi/>)

Table 1. Heavy metal concentrations in soils from areas of active hostilities (Heavy metals, 2025. <https://ukragroconsult.com/news/vazhki-metaly-v-gruntah-ukrayiny-pislya-bojovyh-dij-zagrozy-ta-metody-remediaciyi/>)

Елемент	Джерело	Середня концентрація, мг/кг	ГДК**, мг/кг
Pb (Свинець)	Боєприпаси, бронебійні снаряди, залишки акумуляторів, компоненти порохових зарядів*	150–800	32
Cd (Кадмій)	Горіння пального, металокопункції	2–5	1
Cu (Мідь)	Електронне обладнання, військова техніка	70–150	55
Zn (Цинк)	Боєприпаси, сталеві копункції	200–500	146
Ni (Нікель)	Бронебійні осердя, хімічне забруднення	100–250	50

* – додано автором

** – ГДК – гранично допустима концентрація для сільськогосподарських ґрунтів.

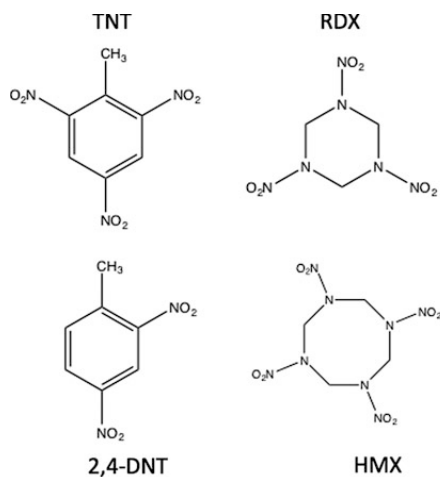


Рис. 1. TNT – тротил, тринітротолуол; RDX – гексоген; HMX – октоген; 2,4-DNT – динітротолуол

Fig. 1. TNT – TNT, trinitrotoluene; RDX – hexogen; HMX – octogen; 2,4-DNT – dinitrotoluene

vibuxovi-boyeripasi-posibnik-dlya-ukraini). Наприклад, РФ у танкових снарядах ОФ-17 і артилерійських снарядах ОФ-25 використовує вибухову речовину А-IX-2 «гексал», яка є сумішшю гексогену (73 %), алюмінієвої пудри (23 %) і воску (4 %), що використовується як флегматизатор. Поширений 125-мм протитанковий кумулятивний постріл БМ-14 має споряджену бойову частину у вигляді 1,8 кг вибухівки «окфол», що складається з 95 % октогену і 5 % воску. Осколково-фугасний снаряд ОФ-462 калібром 122 мм містить 3,5 кг тротилу (Посібник для України «Вибухові боеприпаси», 2022).

Компоненти, що входять до складу військових вибухових речовин у досить великій кількості (тротил, гексоген, октоген тощо), є шкідливими речовинами і за токсичним впливом згідно з ГОСТ 12.1.005-88 та ГОСТ 12.1.007-76 до I-II класу небезпеки. Їх ГДК у повітрі робочої зони не повинно перевищувати: тротил – 0,1 мг/м³; гексоген – 1,0 мг/м³.

Під час детонації снарядів частина вибухових речовин з периферії заряду розкидається й осаджується на ґрунті. Для детонацій високого порядку не менш ніж 99,9 % маси бризантної вибухівки витрачається на детонацію, і невелика кількість залишку, що осідає, є частинками мікронного розміру (Taylor et al., 2004).

Водночас детонації низького порядку або часткові детонації утворюють достатньо великі за розміром частинки (рис. 2), загальна маса яких за одиночний вибух на 4–5 порядків більше, ніж залишки вибухової речовини за детонації високого порядку (таблиця 2).

Слід підкреслити, що надходження токсичних ВР в навколишнє середовище існує не тільки під час воєнних дій. Так, на підставі узагальнення даних щодо використання ВР на підприємствах вугільної галузі України у 2004 році авторами (Галиакберова, Манжос, 2004) розраховано викид тротилу, який становив 44 000 кг.



Рис. 2. Частинки вибухівки, утворені за неповної детонації (Pennington et al., 2006)

Fig. 2. Explosive particles formed during incomplete detonation (Pennington et al., 2006)

Таблиця 2. Маса осаду бризантної вибухівки за неповної детонації (Pennington et al., 2006)

Table 2. Mass of high explosive residue upon incomplete detonation (Pennington et al., 2006)

	Склад вибухівки	Середнє осадження, %
Міномети		
60 мм	RDX + TNT	35
81 мм	RDX + TNT	42
120 мм	RDX + TNT	49
Гаубиця		
105 мм	RDX + TNT	27
155 мм	TNT	29

Очевидно, що детонації низького порядку є основним джерелом надходження залишків вибухових речовин у навколишнє середовище під час воєнних дій. Слід підкреслити, що детонації низького порядку не є рідкістю для багатьох боеприпасів, але частоту їх появи важко передбачити. Дослідниками США за результатами спостереження на воєнних полігонах визначено, що середній рівень низької детонації для всіх вивчених боеприпасів становить 3,5 % загальної кількості пострілів, коливаючись від 0 до 11,7 % (Dauphin, Doyle 2000).

Слід зазначити, що під час війни в Україні сторони широко використовували старі боеприпаси, які зберігалися 30 і більше років і мають ефективність детонації 70–80 %. Крім того, від 10 до 20 %, а в деяких випадках до 40 % боеприпасів не спрацьовують коректно або зовсім не спрацьовують із подальшою деформацією корпусу боеприпасів. Усе це призводить до надходження токсичних компонентів вибухівки в навколишнє природне середовище, відкладаючись на поверхні ґрунту.

Для екологічно небезпечних залишків бризантних ВР немає чітко визначеної моделі масопереносу й осадження після вибуху. Залишки ВР, утворені за детонації

низького порядку, створюють локальні зони високої концентрації, що нагадує специфіку радіоактивного забруднення в прилеглий до зруйнованого енергоблоку № 4 Чорнобильської АЕС. Оскільки кількість часткових детонацій маловідома, важко оцінити масу ВР, присутньої в зоні випадіння частинок вибухівки.

Концентрації забруднення. З огляду на високу інтенсивність артилерійських обстрілів і згадану специфіку боєприпасів, що використовуються у війні, зробимо усереднену оцінку забруднення нездотонованими ВР на прикладі ділянки сільськогосподарських угідь площею 1 км² в районі м. Ізюм Харківської області. За даними громадської організації «Українська природоохоронна група» (Василук, Колодежна, 2022), на цій ділянці нараховано 480 воронок від мін калібру 82 мм, 547 воронок від мін 120 мм і 1025 – калібру 152 мм. На підставі довідкових даних (Посібник для України «Вибухові боєприпаси», 2022) розраховано, що загальна маса ВР у перелічених боєприпасах (О832, ОФ843, ОФ49, ОФ45) становить близько 9200 кг. Приймаючи, що узагальнена ефективність детонації становить 80 %, маємо, що за реальних інтенсивних обстрілів сумарне поверхневе забруднення ґрунтів сумішшю TNT+RDX може становити 1,8 г/м², або ж приблизно 100 мг/кг поверхневого шару ґрунту. Звичайно, це груба оцінка можливих рівнів забруднення; масу залишків ВР, що осідають у зонах вибухів артилерійських боєприпасів, важко оцінити з будь-яким ступенем точності. Більш-менш адекватну кількісну оцінку рівнів забруднення внаслідок осадження залишків бризантних ВР необхідно визначати шляхом відбору проб. Зазначена ситуація мозаїчності забруднення потребує розробки спеціальної методики, яка передбачитиме як рівномірну сітку точок пробовідбору, так і згущення проб поблизу чітко виражених локальних джерел забруднення.

Вибухові бризантні речовини, насамперед TNT і RDX, є токсичними речовинами, які в природних умовах повільно розкладаються під дією мікроорганізмів, сонячного опромінення і ґрунтової вологи. Так, встановлено, що константи розпаду першого порядку для концентрацій тротилу та гексогену, виміряних у польових умовах, становили 1Е⁻⁵ на день (період напіврозпаду – 190 років) і 8,13Е⁻⁶ на день (період напіврозпаду – 233 роки) для TNT і RDX відповідно (Pennington et al., 2001). За іншими даними, у деяких ґрунтах період напіврозпаду RDX може досягати до 161,5 року, що свідчить про його високу стабільність у певних умовах (EPA. Technical Fact Sheet, TNT, 2017). Водночас величина періоду напівочищення лісових екосистем на непорушеній лісовій ділянці Лос-Аламоської національної лабораторії (США) від цих вибухових речовин становила: HMX – 39 років, RDX – 36 років, TNT – 1 рік (EPA. Technical Fact Sheet (RDX), 2017).

Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA) розроблено Ecological Soil Screening Levels (Eco-SSLs) для тринітротолуолу (TNT) та гексогену, які застосовуються до різних типів земель. Ці

рівні визначають концентрації зазначених сполук у ґрунті, що вважаються безпечними. Агентством з охорони навколишнього середовища розраховано рівень скринінгу ґрунту на урбанізованих територіях (SSL) у 21 міліграм на кілограм (мг/кг) і 96 мг/кг для промислових майданчиків для TNT [16] і 6,1 та 28 мг/кг для RDX відповідно (EPA. Technical Fact Sheet (RDX), 2017).

Ці значення є консервативними рекомендаційними орієнтирами, призначеними для захисту екологічних рецепторів від потенційно шкідливого впливу TNT у ґрунті. У Агенції з охорони довкілля США (EPA USA) прийнято, що рівень концентрації тротилу в ґрунті, за якого потрібно робити оцінку земельних ділянок на хімічне забруднення, становить 1,3Е–2 мг/кг. При цьому особлива небезпека попадання тротилу в ґрунт полягає в широті токсичного ефекту, що реалізована у зміні чисельності всіх видів ґрунтової мікрофлори, а також у можливості накопичення TNT і RDX в рослинній продукції.

Контроль забруднення ВР. Як зазначено, ведення сільськогосподарської діяльності на землях, що зазнали інтенсивний вплив артилерійських обстрілів, може призвести до наявності в продукції помітних слідів токсичних компонентів вибухових речовин (наприклад вищезгаданий 2,4-ДНТ) або ж сполук розкладу TNT і RDX, що унеможливить безпечність споживання і відповідно експорту зернових культур, вирощених на зазначених територіях. На цей час в Україні немає офіційно затверджених екологічних стандартів для вмісту TNT і RDX у ґрунтах сільськогосподарського призначення.

Отже, хоча Eco-SSL для TNT існують у США, в Україні такі стандарти ще не розроблені. З огляду на поточну ситуацію є потреба в адаптації або розробці подібних нормативів для оцінки й управління ризиками, пов'язаними із забрудненням ґрунтів вибуховими речовинами на сільськогосподарських землях.

Таким чином, можна зазначити, що забруднення ґрунту сільськогосподарських угідь вибуховими речовинами є критичною екологічною проблемою з далекосяжними наслідками для екосистем, здоров'я людей і економіки країни. Кількісна оцінка вмісту зазначених вибухових речовин у ґрунті стикається з проблемою відсутності аналітичних методів, які б дали можливість оперативно визначити концентрацію цих компонентів на місці відбору проб. Зазначені вибухові речовини мають низьку летучість, тобто вміст їхніх парів у повітрі надзвичайно низький, що накладає відповідні умови для проведення аналізу. Для якісного виявлення вибухових речовин наразі в системі митного контролю України застосовуються прилади, призначені для виявлення слідів вибухових речовин, у тому числі пластової вибухівки та вибухових речовин, зокрема С4, тринітротолуол, динаміт, парамононітротолуол, семтекс, гексоген, нітрогліцерин (Дейниченко та ін., 2010). Але ці методи призначені лише для детектування наявності вибухових речовин.

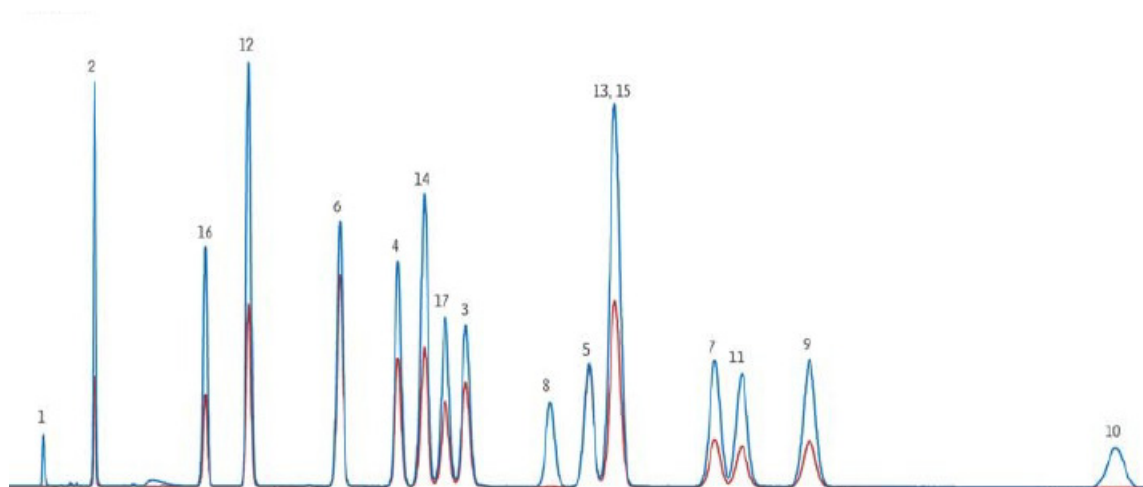


Рис. 3. Хроматограма суміші ВР із застосуванням УФ детекторів з довжиною хвилі 210 і 254 нм (Analysis of Explosives, 2009. https://www.chromtech.net.au/pdf2/HPLC-Explosives_EVAN1176.pdf) (зверху $\lambda = 210$ нм, снизу $\lambda = 254$ нм): 1 – октоген; 2 – гексоген; 3 – нітрогліцерин; 4 – нітробензол; 5 – 4-аміно-2,6-динітротолуол; 6 – 3,5-динітроанілін; 7 – 2-нітротолуол; 8 – 2-аміно-2,6-динітротолуол; 9 – 3-нітротолуол; 10 – тертанітропентаеритрит; 11 – 4-нітротолуол; 12 – 1,3-динітробензол; 13 – 2,6-динітротолуол; 14 – тетрил; 15 – 2,4-динітротолуол; 16 – 1,3,5-тринітробензол; 17 – 2,4,6-тринітротолуол

Fig. 3. Chromatogram of the BP mixture (Analysis of Explosives, 2009. https://www.chromtech.net.au/pdf2/HPLC-Explosives_EVAN1176.pdf) (top $\lambda = 210$ nm, bottom $\lambda = 254$ nm): 1 – octogen; 2 – hexogen; 3 – nitroglycerin; 4 – nitrobenzene; 5 – 4-amino-2,6-dinitrotoluene; 6 – 3,5-dinitroaniline; 7 – 2-nitrotoluene; 8 – 2-amino-2,6-dinitrotoluene; 9 – 3-nitrotoluene; 10 – tertanitropentaerythritol; 11 – 4-nitrotoluene; 12 – 1,3-dinitrobenzene; 13 – 2,6-dinitrotoluene; 14 – tetryl; 15 – 2,4-dinitrotoluene; 16 – 1,3,5-trinitrobenzene; 17 – 2,4,6-trinitrotoluene

Кількісний метод визначення реальних рівнів забруднення ВР і продуктами їх розкладу має базуватися на впровадженні аналітичних процедур, які застосовані в практиці Агентства з охорони навколишнього середовища США (United States Environmental Protection Agency; EPA) – це агентство федерального уряду США, створене з метою захисту навколишнього середовища та здоров'я людей. Метод EPA Method 8330B (SW-846): Nitroaromatics, Nitramines, and Nitrate Esters by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) містить загальну інформацію про аналітичні процедури, які лабораторія може використовувати як відправну точку для створення власної детальної стандартної операційної процедури. Метод 8330 EPA SW-846 є найбільш поширеним аналітичним підходом для виявлення тротилу в ґрунті й передбачає використання високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) з УФ-детектором. Його використовували для виявлення тротилу та деяких продуктів його розпаду на рівнях у низьких частках на мільярд (ppb) у воді, ґрунті та осадах (рис. 3).

Висновки. Широкомасштабні інтенсивні військові дії, що відбуваються на території України, призвели до утворення у східних і південних регіонах нової екологічно небезпечної ситуації, що викликано довгостроковими ландшафтно-геохімічними змінами і насамперед із деградацією та забрудненням ґрунтів.

Інтенсивність і масштаби воєнних дій на території України призвели до потужного комплексного забруднення ґрунтів як залишками нафтопродуктів і важкими металами, так і токсичними компонентами вибухових речовин, передусім тротилом і гексагеном. Зазначене хімічне забруднення разом із механічним впливом (рух важкої військової техніки, фортифікація, утворення вивалів від вибухів) створює реальну загрозу довгострокової втрати продуктивності ґрунтів сільськогосподарського призначення.

З огляду на довготривале існування основних вибухових речовин у ґрунті і можливість їх накопичення у сільськогосподарській продукції, що вирощується на територіях, які зазнали впливу інтенсивних воєнних дій, постає питання визначення орієнтовних рівнів забруднення ґрунтів, безпечних для отримання продукції, придатної для вживання й експорту.

Актуальною проблемою стає створення системи контролю рівня забруднення ґрунтів і вирощеної сільськогосподарської продукції залишками ВР і продуктами їх метаболізму.

Результати визначення рівня забруднення ґрунтів ВР спільно із результатами оцінки рівня забруднення іншими компонентами (важкими металами, нафтопродуктами) мають лягти в основу економічної оцінки вибраної для відповідної локації стратегії повоєнного використання сільськогосподарських угідь.

Література

1. Завдані збитки у розрізі категорій впливу на довкілля. ЕкоЗагроза. Офіційний ресурс Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України. 2025. Режим доступу: <https://ecozagroza.gov.ua/11.03.2025>.
2. Uruskyi O., Stankevich S., Dudar T., Mosov S., Prysiazhnyi V. Integrated assessment of disturbed ecosystems using remote sensing technique. *Science and Innovation*, 2024. Vol. 20, no. 5, pp. 3–15. DOI: 10.15407/scine20.05.003. <https://scinn-eng.org.ua/ojs/index.php/ni/article/view/605>.
3. Ангурець О., Хазан П., Колесникова К., Кушч М., Чернохова М., Гавринек М. Наслідки для довкілля війни росії проти України. *Електронне науково-популярне видання*. 2023. 83 с. <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf>.
4. Зайцев Ю. О., Грищенко О. М., Романова С. А., Зайцева І. О. Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського р-нів Сумської обл. *Агроекологічний журнал*. 2022. № 3. С. 136–149. DOI: 10.33730/2077-4893.3.2022.266419.
5. Важкі метали в ґрунтах України після бойових дій: загрози та методи ремедіації (2025). <https://ukragroconsult.com/news/vazhki-metaly-v-gruntah-ukrayiny-pislya-bojovyh-dij-zagrozy-ta-metody-remediaciyi/>.
6. Walsh M.R., Walsh M.E., Hewitt A.D. Energetic residues from the expedient disposal of artillery propellants. *Journal of Hazardous Materials*. 2009. ERDC/CRREL TR-09-8.
7. Посібник для України «Вибухові боєприпаси». GICHD. 2022. 152 с.
8. Taylor S., Hewitt A., Lever J., Hayes C., Perovich L., Thorne P., Daghliah C. TNT particle size distributions from detonated 155-mm howitzer rounds. *Chemosphere*. 2004. Vol. 55. P. 357–367.
9. Pennington J.C., Jenkins T.F., Ampleman G., et al. Distribution and fate of energetics on DoD test and training ranges: final report. *Engineer Research and Development Center*, 2015. Vicksburg, MS.
10. Галиакберова Ф. Н., Манжос Ю. В. Об экологической чистоте взрывчатых веществ. 2004. Режим доступу: <https://smekni.com/a/10955/ob-ekologicheskoy-chistote-vzryvchatykh-veshchestv/>.
11. Dauphin L., Doyle C. Study of ammunition dud and low-order detonation rates. Aberdeen proving ground, U.S. *Army Environmental Center report SFIM-ACE-ET-CR-200049*, MD. 2000.
12. Василюк О., Колодежна В. UNCG. Якою має бути доля пошкоджених вибухами українських територій? 2022. Режим доступу: <https://uncg.org.ua/iakoju-maie-buty-dolia-poshkodzhenykh-vybukhamy-ukrainskykh-terytorij/>.
13. Pennington Judith C., Brannon James M., Gunnison Douglas. Soil and Sediment Contamination: *An International Journal. Monitored Natural Attenuation of Explosives* January 2001. International Journal of Phytoremediation. 2001. Vol. 10 (1). P. 45–70. DOI: 10.1080/20015891109185.
14. Bernstein A., Adar E., Ronen Z., et al. Quantifying RDX biodegradation in groundwater using $\delta^{15}\text{N}$ isotope analysis. *J Contam Hydrol*. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.10.010>.
15. Becker, N.M. Fate of selected high explosives in the environment: literature review. *Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-95-1018*. 1995.
16. EPA. 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT). *Technical Fact Sheet*. 2017.
17. EPA. Hexahydro-1,3,5-trinitro- 1,3,5-triazine (RDX). *Technical Fact Sheet*. 2017.
18. Дейниченко Г. В., Афукова Н. О., Савченко Н. В. Дослідження ринку сучасних технічних засобів та методів митного контролю для виявлення вибухових речовин та пристроїв. *Прогресивні технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. 2010. Вип. 1. С. 150–156.
19. Analysis of Explosives by Liquid Chromatography (2009), *Environmental Applications*. 2009. Режим доступу: https://www.chromtech.net.au/pdf2/HPLC-Explosives_EVAN1176.pdf.

References

1. Damages caused by environmental impact categories (2025). EcoZagroza. Official resource of the Ministry of Environmental Protection and Natural resources of Ukraine. Accepted at: <https://ecozagroza.gov.ua>.
2. Uruskyi, O., Stankevich, S., Dudar, T., Mosov, S., Prysiazhnyi, V. (2024), Integrated assessment of disturbed ecosystems using remote sensing technique. *Science and Innovation*, 20 (5): 3–15. DOI: 10.15407/scine20.05.003. <https://scinn-eng.org.ua/ojs/index.php/ni/article/view/605>.
3. Angurets, O., Khazan, P., Kolesnikova, K., Kushch, M. et al. (2023), Environmental Consequences of Russia's War Against Ukraine. *Electronic Popular Science Edition*. 83 p. <https://cleanair.org.ua/wp-content/uploads/2023/03/cleanair.org.ua-war-damages-ua-version-04-low-res.pdf> [in Ukrainian].
4. Zaitsev, Yu.O., Grishchenko, O.M., Romanova, S.A., Zaitseva, I.O. (2022), The impact of hostilities on the content of gross forms of heavy metals in soils of Sumy and Okhtyrsky districts of Sumy region. *Agroecological Journal*, 3: 136–149. DOI: 10.33730/2077-4893.3.2022.266419 [in Ukrainian].
5. Heavy metals in Ukrainian soils after hostilities: threats and remediation methods (2025). Accepted at: <https://ukragroconsult.com/news/vazhki-metaly-v-gruntah-ukrayiny-pislya-bojovyh-dij-zagrozy-ta-metody-remediaciyi/> 12.03.2025 [in Ukrainian].
6. Walsh, M.R., Walsh, M.E., Hewitt, A.D. (2009), Energetic residues from the expedient disposal of artillery propellants. *Journal of Hazardous Materials*. ERDC/CRREL TR-09-8.
7. Guide for Ukraine “Explosive Munitions” (2022). GICHD. 152 p. [in Ukrainian].
8. Taylor, S., Hewitt, A., Lever, J., Hayes, C., Perovich, L., Thorne, P., Daghliah, C. (2004), TNT particle size distributions from detonated 155-mm howitzer rounds. *Chemosphere*, 55: 357–367.
9. Pennington, J.C., Jenkins, T.F., Ampleman, G., et al. (2015), Distribution and fate of energetics on DoD test and training ranges: final report. *Engineer Research and Development Center*, Vicksburg, MS.
10. Galiakberova, F.N., Manzhos, Yu.V. On ecological purity of explosive substances. Accepted at: <https://smekni.com/a/10955/ob-ekologicheskoy-chistote-vzryvchatykh-veshchestv/>.
11. Dauphin, L., Doyle, C. (2000), Study of ammunition dud and low-order detonation rates. Aberdeen proving ground, U.S. *Army Environmental Center report SFIM-ACE-ET-CR-200049*, MD.
12. Vasilyuk, O., Kolodezha, V. (2022), UNCG. What should be the fate of the Ukrainian territories damaged by explosions? Accepted at: <https://uncg.org.ua/iakoju-maie-buty-dolia-poshkodzhenykh-vybukhamy-ukrainskykh-terytorij/> [in Ukrainian].
13. Pennington, Judith C., Brannon, James M., Gunnison, Douglas (2001), Soil and Sediment Contamination: *An International Journal. Monitored Natural Attenuation of Explosives* January 2001. International Journal of Phytoremediation, 10 (1): 45–70. DOI: 10.1080/20015891109185.
14. Bernstein, A., Adar, E., Ronen, Z., et al. (2010), Quantifying RDX biodegradation in groundwater using $\delta^{15}\text{N}$ isotope analysis. *J Contam Hydrol*. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2009.10.010>.
15. Becker, N.M. (1995), Fate of selected high explosives in the environment: literature review. *Los Alamos National Laboratory Report LA-UR-95-1018*.
16. EPA (2017), 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT). *Technical Fact Sheet*.
17. EPA. (2017), Hexahydro-1,3,5-trinitro- 1,3,5-triazine (RDX). *Technical Fact Sheet*.
18. Deynychenko, G.V., Afukova, N.O., Savchenko, N.V. (2010), Market research of modern technical means and methods of customs control for detecting explosives and devices. *Progressive equipment and technologies of food production, restaurant industry and trade*, 1: 150–156.
19. Analysis of Explosives by Liquid Chromatography (2009), *Environmental Applications*. Accepted at: https://www.chromtech.net.au/pdf2/HPLC-Explosives_EVAN1176.pdf.

GEOCHEMICAL FEATURES OF SOIL CONTAMINATION DURING THE WAR IN UKRAINE

Olkhovyk Y.O., Dudar T.V.

Olkhovyk Y.O., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Ecology, State University “Kyiv Aviation Institute”, ORCID: 0000-0001-5653-2370, yolkkhovik@gmail.com

Dudar T.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Ecology, State University “Kyiv Aviation Institute”, ORCID: 0000-0003-3114-9732, dtv.nau@gmail.com

During the full-scale russian invasion in Ukraine, soil degradation and man-made landscape and geochemical anomalies are occurred in the area of intensive military operations as a result of rocket and artillery shelling over an area of tens of thousands square kilometers. Landscape changes and geochemical anomalies of enhanced heavy metal content in the soil are traditionally associated with numerous ammunition explosions. The intensity and scale of the war have posed to environmentalists and agricultural producers the problem of soil contamination by explosive residues (TNT, hexane, dinitrotoluene), which are considered to be toxic substances. Low-order detonation or partial detonation of ammunition with a significant shelf life creates quite large particles of toxic explosives that settle on the ground and form local sources of contamination with concentrations of up to several grams per square meter. Agricultural production on lands that have been subjected to intense artillery shelling can result in the presence of noticeable traces of toxic components of explosives in the products, which makes it impossible to safely consume and, accordingly, export grain crops. Quantitative assessment of contamination levels due to deposition of explosives' residues must be determined by soil sampling. The situation of mosaic contamination requires the development of a special methodology that will provide for both a uniform grid of sampling points and concentration of samples near clearly expressed local sources of contamination. The relevance of developing and implementing a set of measures to control the level of agricultural soils contamination as a basis for economic assessment of the post-war agricultural land use strategy selected for the relevant location is noted.

Key words: soil, contamination, detonation, explosives, hexoge, TNT.