

## АЛЮМІНІЙ ЯК ІНДИКАТОРНИЙ МАРКЕР ЗАЛИШКОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВИБУХОВИМИ РЕЧОВИНАМИ

Дудар В.В.

Національний університет «Київський авіаційний інститут»

пр. Любомира Гузара, 1, 03680, м. Київ

mister-vlad@ukr.net

Досліджено фундаментальні проблеми та методологічні обмеження сучасного екологічного моніторингу територій, що зазнали інтенсивного мінно-вибухового впливу. Обґрунтовано екотоксикологічну нестабільність первинних вибухових речовин у ґрунтового середовищі під впливом термічної деструкції, фотолізу та мікробіологічної активності. Доведено, що ці процеси призводять до стрімкої трансформації органічної матриці у вторинні метаболіти, що зумовлює отримання хибно-негативних результатів під час стандартного хроматографічного аналізу навіть за наявності чітких візуальних індикаторів забруднення ("explosive soil"). З метою подолання цієї методологічної проблеми запропоновано та інструментально верифіковано використання дисперсного алюмінію як стабільного неорганічного маркера військово-техногенного забруднення. На основі аналізу компонентного складу масових алюмінізованих боєприпасів встановлено, що металевий додаток становить вагому частку (від 16% до 34%) заряду та формує репрезентативний хімічний слід. За результатами натурних досліджень на деокупованих територіях зафіксовано формування значних техногенних аномалій дисперсного металу. В епіцентрах ураження концентрація алюмінію досягала 168 000 мг/кг (16,8% сухої маси), що більш ніж удвічі перевищує максимально можливий природний фон для лесових чорноземів України (55 000 – 75 000 мг/кг). Доведено, що такий рівень диференціації дозволяє достовірно ідентифікувати зони екологічного ризику. Запропоновано комплексний підхід, який поєднує геохімічний скринінг за алюмінієвим маркером із даними операторів протимінної діяльності. *Ключові слова:* екологічна безпека територій, залишкове забруднення вибухонебезпечних предметів, забруднення вибуховими речовинами, екологічний моніторинг, дисперсний алюміній, продукти трансформації вибухових речовин.

### Aluminum As An Indicator Marker Of Residual Soil Contamination By Explosives. Dudar V.

The fundamental problems and methodological limitations of modern environmental monitoring of territories subjected to intensive mine and explosive impact are investigated. The ecotoxicological instability of primary explosives in the soil environment under the influence of thermal destruction, photolysis, and microbiological activity is substantiated. It is proven that these processes lead to the rapid transformation of the organic matrix into secondary metabolites, which causes false-negative results during standard chromatographic analysis even in the presence of clear visual indicators of contamination ("explosive soil"). In order to overcome this methodological problem, the use of dispersed aluminum as a stable inorganic marker of military and technogenic contamination is proposed and instrumentally verified. Based on the analysis of the component composition of mass aluminized munitions, it was established that the metal additive constitutes a significant share (from 16% to 34%) of the charge and forms a representative chemical trace. According to the results of field studies in de-occupied territories, the formation of significant technogenic anomalies of dispersed metal was recorded. In the epicenters of the impact, the aluminum concentration reached 168,000 mg/kg (16.8% of dry mass), which is more than twice the maximum possible natural background for loess chernozems of Ukraine (55,000 – 75,000 mg/kg). It is proven that such a level of differentiation allows for reliable identification of ecological risk zones. A comprehensive approach is proposed that combines geochemical screening for the aluminum marker with data from mine action operators. *Key words:* environmental safety of territories, residual contamination of explosive remnants of war, contamination by explosives, environmental monitoring, dispersed aluminum, explosive transformation products.

**Постановка проблеми.** Повномасштабна збройна агресія російської федерації спричинила значне забруднення території України вибухонебезпечними предметами (ВНП), що робить її одним найбільш замінованою країною світу [1; 2]. За інформацією Секретаріату Національного органу з питань протимінної діяльності, станом на березень 2026 року потенційно забрудненими в Україні залишаються 133,3 тис. км<sup>2</sup> територій, що співставно із площею Греції.

Проте забруднення довкілля вибухонебезпечними предметами не обмежується лише мінно-вибуховими ризиками та загрозами, а також

полягає у залишковому забрудненню вибуховими речовинами, які у більшості випадків є токсичними та канцерогенними. Вибухові речовини потрапляють у ґрунтовий покрив не лише внаслідок цільового спрацювання боєприпасів (детонації), а й через процеси неповного згоряння (дефлаграції) або руйнування корпусів снарядів [3]. Потрапляючи у довкілля, ці сполуки ініціюють складні фізико-хімічні та біохімічні реакції, що призводять до трансформації мікробіологічного профілю ґрунту та накопичення токсичних речовин [4; 5]. Зокрема зафіксовано, що продукти трансформації вибухових речовин можуть зберігати фітотоксичність протягом



десятиліть, радикально змінюючи умови функціонування агроєкосистем [6].

На поточний час більшість стандартизованих протоколів екологічного моніторингу забруднення ґрунтів вибуховими речовинами, зокрема базовий міжнародний стандарт US EPA Method 8330, орієнтовані на пряму детекцію органічних залишків тротилу, гексогену, октогену тощо методами високоефективної рідинної хроматографії (HPLC) з ультрафіолетовим детектуванням [7]. Однак імплементація цих протоколів для масового обстеження деокупованих територій України стикається з певними труднощами. Наприклад, через 24–36 місяців після детонації, а в деяких випадках і відразу (в залежності від умов бойових дій), пряма індикація за протоколом EPA 8330 може давати хибнонегативні результати. Крім того, якщо ґрунт забруднений продуктами детонації специфічних сумішевих вибухових речовин, які не входять до стандартної бібліотеки аналітів, лабораторний скринінг також може показати хибнонегативний результат.

Крім того, навіть за умови правильного вибору цільового аналіту, виявлення залишків вибухових речовин критично ускладнюється фізикою їхнього розподілу. На відміну від агрохімікатів чи нафтопродуктів, які розповсюджуються дифузно (плямами), продукти детонації осідають у вигляді мікроскопічних твердих частинок. Фундаментальні дослідження Інженерного корпусу армії США (USACE) доводять, що забруднення вибуховими речовинами має гетерогенний точковий характер, який називається ефектом “hotspots” [9; 10]. Концентрація токсиканту в одній точці може перевищувати 10 000 мг/кг, тоді як у зразку ґрунту, відібраному лише за 10 сантиметрів поруч, забруднення може бути майже нульовим [11].

Через відсутність універсального індикатора традиційні аналітичні методи можуть виявлятися нездатними ідентифікувати нетипові токсиканти, якими і являються вибухові речовини [8].

**Актуальність дослідження.** Масштабне забруднення території України вибухонебезпечними предметами, вибуховими речовинами та продуктами їх трансформації формує безпрецедентний виклик для системи забезпечення екологічної безпеки держави. Зі збільшенням часового інтервалу після завершення активних бойових дій традиційні підходи до екологічного моніторингу можуть втрачати свою репрезентативність. Органічні складові вибухових речовин піддаються інтенсивній фізико-хімічній та мікробіологічній трансформації у ґрунтового профілі. Цей процес призводить до часткової зміни первинних токсикантів, що робить їх пряму детекцію стандартизованими хроматографічними методами неефективною, створюючи ризик прихованого пролонгованого впливу на довкілля та населення.

З огляду на зазначене, виникає необхідність установлення надійного, екологічно стабільного

неорганічного маркера, здатного забезпечити ретроспективну ідентифікацію забруднення. Таким універсальним індикатором виступає дрібнодисперсний алюміній, який є базовою високоенергетичною добавкою у переважній більшості сучасних порохових сумішей. Його перехід під час детонації у стійкі оксидні форми створює довготривалий геохімічний слід, що зберігається в ґрунті незалежно від швидкості трансформації органічної матриці боєприпасу. Крім того, перевагою такого підходу є його висока економічна рентабельність, так як масове лабораторне визначення алюмінію методами спектрометрії є базовою, технологічно доступною та на порядки дешевшою процедурою порівняно з високовартісним хроматографічним пошуком специфічних органічних сполук.

Проте, на поточний час стандартні агрохімічні аналізи ґрунтів зазвичай не включають визначення алюмінію, оскільки цей елемент перебуває в інертній формі у складі глинистих мінералів і не впливає на родючість при нейтральній реакції середовища. Крім того, методики масового скринінгу орієнтовані на рухомі форми поживних речовин (азот, фосфор, калій), тоді як для фіксації валового вмісту алюмінію як техногенного маркера потрібні специфічні методи розкладу проб або рентгенофлуоресцентний аналіз.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Представлене дослідження безпосередньо пов'язане з виконанням стратегічних державних завдань щодо подолання екологічних наслідків війни та безпечного повернення земель в агропромисловість. Відповідно до Операційного плану заходів з реалізації у 2024-2026 роках Національної стратегії протиміної діяльності (розпорядження КМУ від 28.06.2024 № 616-р), визначено завдання із реалізації завдання 10 щодо зменшення впливу забруднення вибухонебезпечними предметами (ВНП) на довкілля та управління відповідними ризиками. Крім того, на виконання пункту 7 протоколу засідання Національного органу з питань протиміної діяльності, затвердженого рішенням Прем'єр-міністра України (від 18.07.2024 № 19121/1/1-24), має бути впроваджене інструментально-лабораторний контроль земель сільськогосподарського призначення при проведенні контролю якості розмінування. Авторський доробок пропонує науково-методичний інструментарій, який може застосовуватися для реалізації цих нормативних вимог.

Водночас, поточна практика екологічної оцінки забруднення довкілля внаслідок ведення бойових дій часто демонструє концептуальні помилки та нераціональне використання обмежених ресурсів в умовах активних бойових дій. Багато досліджень витрачають значні кошти на лабораторний пошук важких металів від вибухонебезпечних предметів, ігноруючи той факт, що вони масово присутні лише у специфічних видах боєприпасів (такі як запалювальні,

освітлювальні тощо). Іншою поширеною хобою є пошук залишків вибухових речовин безпосередньо у вирвах від розривів. З огляду на фізику процесу, повнота детонації штатного боєприпасу становить близько 99,999%, тому шукати там високі концентрації вибухових речовин у вирвах є недоцільним.

Усвідомлюючи ці прогалини, автор, спираючись на власний практичний досвід, пропонує простий, науково обґрунтований і значно дешевший варіант для застосування під час проведення первинної оцінки забруднення, а саме обов'язкове визначення вмісту алюмінію. Оскільки алюміній є поширеним компонентом багатьох сучасних порохових сумішей, його фіксація слугує індикатором залишкового забруднення вибухонебезпечних предметів. Такий підхід дає змогу швидко провести первинний скринінговий аналіз значних площ та сфокусувати подальший, більш складний і дорогий інструментальний контроль лише на тих ділянках, де ризик забруднення токсичними вибуховими речовинами є підтвердженим.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Проблема екологічних наслідків військових (бойових) дій традиційно розглядалася наукою переважно через призму забруднення ґрунтів важкими металами (свинець, кадмій, нікель тощо), проте упускаючи із виду алюміній. Проте сучасні глобальні дослідження переконливо доводять, що пріоритетною екотоксикологічною загрозою є залишки вибухових речовин. Фундаментальні праці провідних екотоксикологів розкривають складні механізми біодеградації та фітотоксичності більшості вибухових речовин, особливо тротилу та гексогену [12]. Ці дослідження наголошують на здатності вибухових речовин не лише тривалий час зберігатися у доквіллі, але й активно мігрувати у ґрунтових водах та акумулюватися в кореневих системах сільськогосподарських культур, створюючи пряму загрозу продовольчій безпеці [3].

Попри чітке усвідомлення небезпеки, ідентифікація та кількісне визначення вибухових речовин у ґрунтах супроводжується низкою критичних аналітичних проблем. Як зазначають фахівці Інженерного центру досліджень і розробок армії США (US Army ERDC-CRREL), головною перешкодою під час польових досліджень є екстремальна просторова гетерогенність розподілу часток вибухових речовин. Це явище призводить до того, що концентрація токсикантів може відрізнитися на кілька порядків навіть у межах одного квадратного метра [13]. Відповідно, стандартні методи відбору проб часто дають хибнонегативні результати або критичну статистичну похибку.

Іншою суттєвою проблемою є інструментальна та фінансова складність самого лабораторного аналізу. Класичні міжнародні протоколи, зокрема метод US EPA 8330, вимагають застосування високоефективної рідинної хроматографії або газової хромато-

графії з мас-спектрометрією [7]. Ці методи передбачають багатоетапну пробопідготовку, використання дорогих хімічних реактивів та наявність висококваліфікованого персоналу. Крім того, під дією чинників довкілля первинні вибухові речовини швидко трансформуються у високотоксичні похідні (наприклад тротил у динітротолуоли), що вимагає розширення спектра аналітичних стандартів, що додатково здорожчує процедуру контролю [15]. У практиці застосування таких методів для масового скринінгу сотень тисяч гектарів забруднених ґрунтів є економічно нераціональним.

Аналіз публікацій свідчить про дефіцит досліджень щодо використання непрямих, економічно вигідних маркерів визначення забруднення ґрунтів вибуховими речовинами. Зокрема, поза належною увагою залишається алюміній, який є базовим компонентом більшості сучасних порохових сумішей. Хоча методики визначення вмісту важких металів добре відпрацьовані, стандартизовані та доступні, науково-методичний потенціал обов'язкового визначення алюмінію як індикатора забруднення території вибуховими речовинами з метою оптимізації лабораторного контролю практично не розкритий.

**Новизна.** Наукова новизна одержаних результатів полягає у формуванні нового, експериментально підтвердженого підходу до первинної екотоксикологічної оцінки та інструментального контролю територій, що зазнали забруднення внаслідок ведення військових (бойових) дій, зокрема:

удосконалено алгоритм оцінки забруднення доквілля вибуховими речовинами за рахунок урахування специфіки хімічного складу сучасних засобів ураження. Оцінено та підтверджено, що масове застосування алюмінію (як добавки для підвищення потужності у фугасних, термобаричних та сумішевих вибухових речовинах) формує специфічний хімічний слід у доквіллі. Використання цього факту дозволяє як додатковий інструмент оцінки використовувати економічно недорогий маркер;

на основі власних польових та лабораторних досліджень науково обґрунтовано необхідність визначення масової частки алюмінію як індикатора забруднення ґрунтів залишками вибухових речовин. Експериментально підтверджено, що аномалії просторового розподілу алюмінію в ґрунтовому профілі є достовірним маркером масштабного забруднення ґрунтів вибуховими речовинами, що дозволяє використовувати його для швидкого скринінгу перед проведенням подальших дороговартісних лабораторних досліджень.

**Методологічне та загальнонаукове значення дослідження.** Загальнонаукове значення дослідження полягає у розвитку теорії екологічного моніторингу забруднення ґрунтів вибухонебезпечними предметами. Обґрунтовано нову концепцію непрямой хімічної індикації, а саме використання алюмінію для виявлення забруднення високотоксичними

вибуховими речовинами та продуктами їх трансформації. Доведено, що оскільки алюміній є масовим компонентом сучасних порохових сумішей, його просторовий розподіл у ґрунтовому профілі відображає межі розльоту продуктів детонації та дефлагації вибухових речовин. Це вирішує проблему пошуку залишкового забруднення вибухонебезпечних предметів, яка також трансформується, мігрує та має просторову нерівномірність.

Методологічне значення роботи полягає у розробці економічно доцільного алгоритму інструментального обстеження земель, які зазнали впливу вибухонебезпечних предметів. Науково доведено необхідність визначення масової частки алюмінію як одного із етапів первинного скринінгу забруднення ґрунтів внаслідок ведення військових (бойових) дій. Цей методологічний підхід пропонується як швидке картування територій за допомогою доступних методів вимірювання алюмінію, що дає змогу локалізувати епіцентри забруднення і проводити складні хроматографічні дослідження виключно в межах підтверджених збільшення кількості алюмінію. Проте запропонований алгоритм первинного скринінгу базується на обов'язковому визначенні алюмінію в комплексі з іншими портативними приладами експрес-аналізу. Крім того, ключовою умовою методології є прив'язка результатів скринінгу до офіційних звітних документів операторів протимінної діяльності.

**Викладення основного матеріалу.** На поточний час більшість вибухонебезпечних предметів, які застосовуються у сучасних збройних конфліктах, в тому числі під час вторгнення російської федерації на територію України, використовують як основний заряд вторинні (бризантні) вибухові речовини, які являють собою переважно органічні сполуки, такі як тротил, гексоген, октаген тощо. Значна частина боєприпасів (стандартні артилерійські снаряди, мінометні міни, базові інженерні боєприпаси) споряджається індивідуальними вибуховими речовинами у чистому вигляді, насамперед литим або пресованим тринітролоуолом (тротилом), який завдяки своїй природній стабільності не потребує додаткової флегматизації. Водночас більш потужні, але високочутливі бризантні речовини (гексоген, октоген, ТЕН) у чистому вигляді практично не застосовуються через ризик передчасної детонації. Їх обов'язково переводять у композиції (суміші), додаючи флегматизатори (віск, парафін, церезин) для зниження чутливості та забезпечення безпеки експлуатації [16].

Однак, коли перед конструкторами озброєння стоїть технічне завдання кардинально підвищити руйнівну (фугасну) дію, бронепробивність або створити яскраво виражений ефект (освітлювальний, запалювальний чи термобаричний), до складу базових вибухових речовин обов'язково додають енергетичний підсилювач, а саме мікродисперсний алюміній. Проте важливо підкреслити, що далеко не

всі вибухові речовини мають у своєму складі метали. Проте саме алюмінізовані композиції становлять основу найбільш потужних, руйнівних і масових видів озброєння сучасних війн.

Причина масового використання саме алюмінію полягає в унікальній фізико-хімічній реакції окиснення. Під час детонації алюмінієва пудра не реагує миттєво у вибуховій хвилі, а вступає у реакцію вторинного післядетонаційного згоряння з киснем повітря та газоподібними продуктами детонації вибухової речовини. Ця екзотермічна реакція різко піднімає температуру в епіцентрі вибуху (до 3500–4000 °С) і виділяє колосальну кількість додаткової теплової енергії [17]. Завдяки цьому значно пролонгується фаза позитивного надлишкового тиску ударної хвилі (збільшується імпульс).

Аналіз доктрини конструювання озброєння держав-членів НАТО свідчить, що алюмінізовані порохові суміші використовуються переважно у високопотужних боєприписах, а саме:

*Бінарні суміші:* Тритонал (80% тротилу, 20% алюмінієвої пудри). Застосування: американські авіабомби загального призначення (лінійка Mark: Mk 82, Mk 83, Mk 84).

*Третинні суміші:* Амонал (60–90% нітрату амонію, тротил/гексоген, до 15% алюмінію). Застосування: інженерні підривні заряди. Мінол (40% тротилу, 40% нітрату амонію, 20% алюмінію). Застосування: морські донні міни, глибинні бомби; Торпекс (41,6% гексогену, 39,7% тротилу, 18% алюмінію та віск). Застосування: бойові частини торпед (Mark 46), морські міни; НТА-3 (49% гексогену, 29% тротилу, 22% алюмінію). Застосування: спеціалізовані бетонобійні авіабомби; НВХ (НВХ-1, НВХ-3) (гексоген, тротил, від 17% до 34% алюмінію, віск, лецитин). Застосування: бойові частини сучасних торпед та ракет-торпед.

*Чотирьохкомпонентні суміші:* DBX (40% тротилу, 21% гексогену, 21% нітрату амонію, 18% алюмінію). Застосування: спеціалізовані протичовнові глибинні бомби.

Натомість радянська (та сучасна російська) військова школа впровадила використання алюмінієвої пудри набагато масовіше, охопивши практично весь спектр засобів ураження, а саме:

*Суміші на основі тротилу та гексогену (ТГА):* ТГА-16 (60% тротилу, 24% гексогену, 16% алюмінію). Застосування: масове спорядження 152-мм та 203-мм осколково-фугасних снарядів, фугасних авіабомб (ФАБ-250, ФАБ-500); ТГАГ-5 та ТГАФ-5 (ТГА-16 + 5% флегматизатора). Застосування: бойові частини зенітних керованих ракет (ЗКР комплексів С-75, С-300), морські якірні міни, артилерійські осколково-фугасні боєприпаси тощо.

*Бінарні тротил-алюмінієві суміші (ТА):* ТА-16 (тротил + 16% алюмінію). Застосування: інженерні фугасні протитанкові міни (ТМ-62М зі спецпідривниками), подовжені заряди систем розміну-

вання (УР-77); ТА-80 (тротил + 20% алюмінію). Застосування: інженерні заряди великої потужності.

**Високобризантні на основі гексогену (А-ІХ):** А-ІХ-2 (80% гексогену, 20% алюмінію). Застосування: кумулятивні гранати до РПГ (ПГ-7В), 30-мм запалювально-фугасні снаряди до гармат 2А42 (БМП-2, БМП-3), 125-мм осколково-фугасні снаряди для танків; А-ІХ-10, А-ІХ-20 (80% гексогену, алюміній, озокерит). Застосування: бойові частини протитанкових керованих ракет (ПТРК «Конкурс», «Корнет»); Гекфал (А-ІХ-1 + 20% алюмінію). Застосування: артилерійські бронебійні та кумулятивні снаряди.

**Спеціалізовані суміші:** МС (19% тротилу, 58% гексогену, 17% алюмінію + флегматизатор). Застосування: протитанкові міни, бойові частини важких торпед тощо; ТОКАФ (12% тротилу, 60% октогену, 17% алюмінію + флегматизатор). Застосування: бойові частини крилатих і балістичних ракет («Калібр», «Іскандер»).

Окрім джерелом надходження алюмінію у доквілля є металеві вибухові речовини (пропіленти). Відповідно до профільної військово-технічної літератури з порохової справи, якщо класичні артилерійські та мінометні порохи (які у більшості випадках залишаються у каналі ствола) зазвичай не містять металевих додатків, то сучасні сумішеві тверді ракетні палива, які часто узагальнюються терміном тверде ракетне паливо (яке часто застосову-

ється у реактивних системах залпового вогню і вилітає разом із основним зарядом), можуть містити значну їх кількість [18].

Тверде ракетне паливо складаються з полімерної зв'язки, окисника (перхлорату амонію) та алюмінієвого порошку сферичної форми (марок АСД-1 або АСД-4), який відіграє роль базового висококалорійного пального. У маршових двигунах реактивних систем залпового вогню (РСЗВ типу «Град», «Ураган», «Смерч»), а також зенітних та оперативно-тактичних ракет масова частка алюмінію становить від 12% до 22% від загальної маси паливного заряду. Враховуючи, що двигун ракети РСЗВ містить десятки кілограмів такого палива, під час його роботи утворюється об'ємний газодинамічний шлейф. Продукти згоряння порохової суміші (зокрема, оксиди алюмінію та незгорілі мікрочастинки металу) осідають на ґрунтовий покрив уздовж траєкторії польоту, а у випадку неповного вигорання чи руйнування ракети можуть концентровано потрапляють у ґрунт на місці падіння [18].

Окрім бризантних вибухових речовин та ракетних палив, вагомим джерелом емісії дисперсного алюмінію в доквілля є широка номенклатура піротехнічних складів, що використовуються в засобах ініціювання, освітлення та цілевказання. Піротехнічні суміші являють собою механічні системи, що складаються з окислювача та металевого

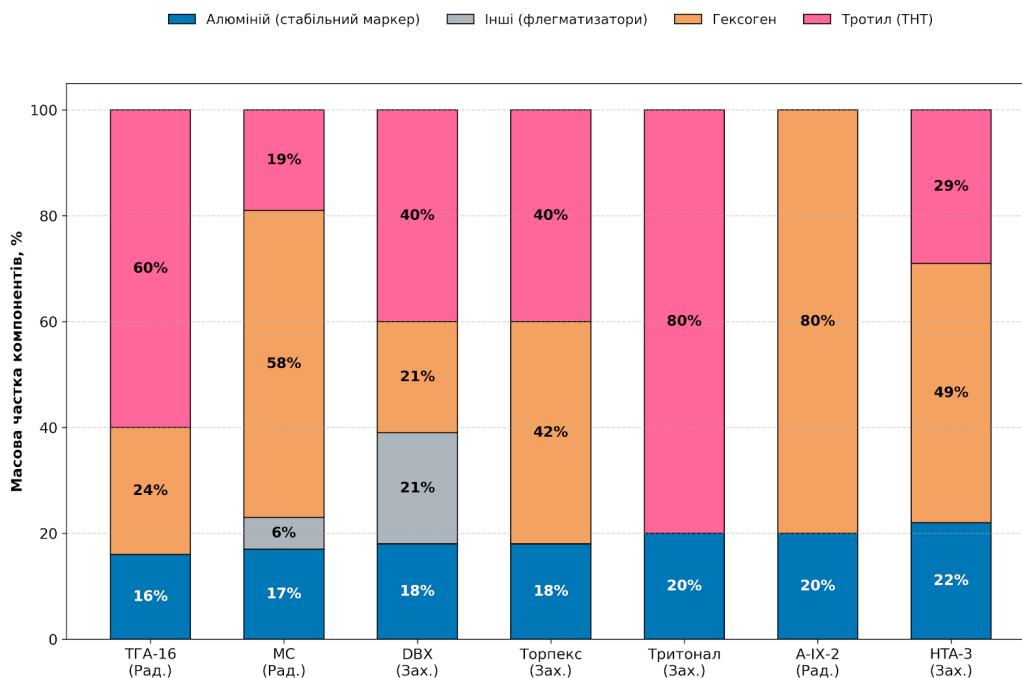


Рис. 1. Компонентний склад деяких порохових сумішей.

**Примітки:** вказані тільки деякі типи порохових сумішей. Рад. – радянські порохові суміші, Зах. – західні (держав-членів НАТО).

**Джерело:** графік розроблений автором.

пального, принципи маркування яких подібні до сумішевих твердих палив.

Аналіз рецептур основних типів піротехнічних засобів підтверджує високу концентрацію алюмінію як ключового горючого компонента:

*Запалювальні та димопідсилювальні склади* (напр. ДУ-5): містять сумарно до 45% алюмінію (15% порошку та 30% пудри) у поєднанні з азотно-кислим барієм та тротилом. Такі суміші при спрацюванні забезпечують інтенсивне розсіювання металевих часток.

*Термітні суміші* (ТР, Ф-45-4): засновані на механічних сумішах оксидів заліза та порошкоподібного алюмінію. У спеціалізованих запалювальних складах вміст алюмінію та магнію досягає 9% на фоні 57% термітної основи, що створює стійкі осередки високотемпературного хімічного забруднення.

*Освітлювальні та трасуючі склади*: використовують порошкоподібний магній, алюміній та їхні суміші як основне пальне. У трасуючих складах (зокрема № 5, 8, 9) алюмінієва пудра застосовується як у допоміжних (запалювальних), так і в основних сумішах, де роль окислювача виконують нітрати барію або стронцію.

Окремим фактором потрапляння алюмінію в довкілля в сучасних умовах ведення бойових дій є масове використання саморобних вибухових пристроїв та спеціалізованих боєприпасів для FPV-дронів і скидів, особливо які виготовляються у польових умовах без регуляторного промислового контролю.

Причиною використання алюмінієвої пудри (ПАП-1, ПАП-2) або його порошку (АСД) у таких виробках є поєднання високої енергоефективності та доступності компонентів. Додавання дисперсного алюмінію до амміачно-селітряних сумішей (амоналі) або пластичних вибухових речовин дозволяє суттєво підвищити фугасну та термобаричну дію вибуху за рахунок високої теплоти окиснення металу.

З метою практичної верифікації забруднення ґрунтів вибуховими речовинами забруднення було проведено екотоксикологічне обстеження території знищеного у 2022 році складу артилерійського озброєння (Харківська область). Ця територія зазнала надзвичайного забруднення вибуховими речовинами, які можливо ідентифікувати візуально. Номенклатура боєприпасів на даному об'єкті була відома і включала вироби, споряджені вторинними бризантними вибуховими речовинами (переважно на основі тринітролоуолу та гексогену), а також алюмінізованими сумішами. Відбір проб ґрунту здійснювався поза межами епіцентрів прямого ураження та вирв у зонах, де відбір проб був безпечний (так як територія не розмінювалася).

Під час візуального обстеження локації було зафіксовано наявність характерного помаранчевого та червоно-помаранчевого забарвлення ґрунтового покриву (у фаховій літературі класифікується як

«explosive or orange soil»). Даний феномен є візуальним індикатором наявності у ґрунті вибухових речовин, особливо тротилу. Під впливом ультрафіолетового випромінювання (фотоліз) та ґрунтової вологи молекули тротилу утворюють забарвлені фотохімічні полімери та комплекси Мейзенгеймера. Одночасно за участю ґрунтової мікробіоти відбуваються процеси відновлення нітрогруп з утворенням амінодинітролоуолів та діамінонітролоуолів (2-ADNT, 4-ADNT, 2,4-DNT, 2,6-DNT), які зв'язуються з гуміновими кислотами ґрунту. Варто уточнити, що продукти трансформації вибухових речовин є набагато стійкішими, небезпечними та токсичними за вихідну сполуку.

Через відсутність на момент проведення обстеження портативних приладів для первинного (скринінгового) аналізу безпосередньо в польових умовах, відібрані зразки були направлені відразу на дороговартісне дослідження до акредитованої лабораторії (Eurofins, Польща). Результати аналізу, проведеного методом рідинної хроматографії, показали, що концентрації тротилу, гексогену та інших базових вибухових речовин у всіх пробах знаходяться нижче межі кількісного визначення приладу (<0,1 мг/кг).

Отриманий хибнонегативний результат щодо вмісту вибухових речовин пояснюється їхньою фізико-хімічною нестабільністю у довкіллі. В умовах детонації та дефлагаційного горіння значна частина органічних сполук зазнала термічної деструкції, а ексудат вибухових речовин, що потрапив у ґрунт, трансформувався у вторинні метаболіти. Стандартні лабораторні протоколи, налаштовані на ідентифікацію виключно незмінених молекул первинних вибухових речовин, не фіксують наявність продуктів їхньої деградації. Проведення повторного спеціалізованого аналізу цих же зразків на наявність вторинних метаболітів не здійснювалося через високу вартість послуг європейської лабораторії та відсутність додаткового фінансування. Проте забруднення було наявне, так як виявлено наявне пригнічення росту рослинності та характерний колір ґрунту.

З огляду на наявність алюмінію у порохових сумішах у більшості боєприпасів, у цих же пробах було проведено визначення масової частки загального алюмінію. Відповідно до даних ґрунтознавства, для чорноземів України, сформованих на лесових породах, природний валовий вміст алюмосилікатів (у перерахунку на  $Al_2O_3$ ) становить 11–14%, що відповідає фоновій концентрації загального алюмінію в межах 5,5–7,5% (55 000 – 75 000 мг/кг). При цьому природний алюміній інтегрований у кристалічні решітки мінералів і є екотоксикологічно інертним.

За результатами аналізу досліджуваних проб, концентрація алюмінію на окремих ділянках сягала 168 000 мг/кг (16,8% сухої маси). Таке перевищення максимальних фонових значень більш ніж удвічі свідчить про інтенсивне надходження антропогенного дисперсного металу внаслідок розсіювання

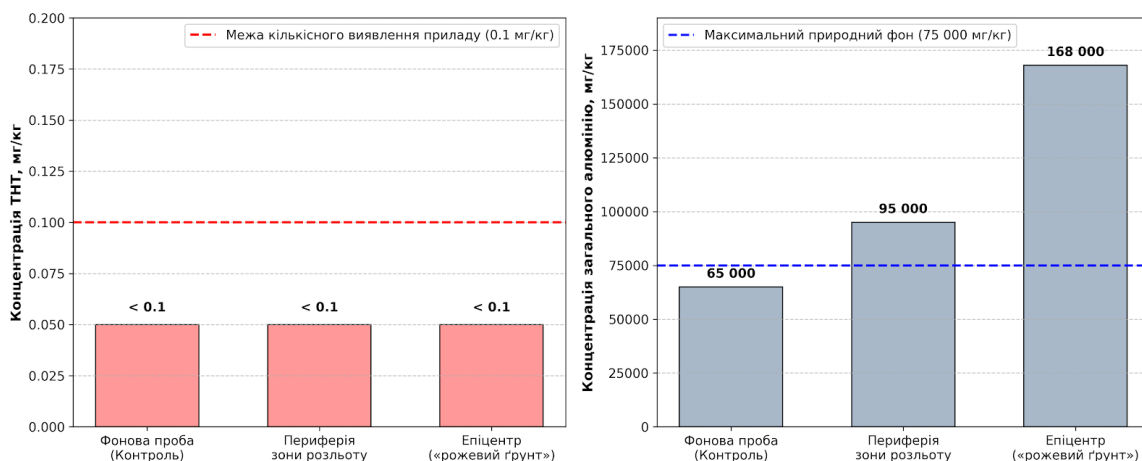


Рис. 2. Вміст тротилу (зліва) та алюмінію (справа) у досліджуваних пробах.

**Примітки:** коротка візуалізація проведених аналізів.

**Джерело:** результати аналізу, здійснені автором.



Рис. 3. Відібраний зразок ґрунту і візуальне його порівняння із фоновим зразком, який відібраний приблизно за 2 км.

**Примітки:** Відповідно до протоколу USAEC, ґрунти, що містять 5% вторинних вибухових речовин і більше мають утилізуватися на рівні вибухонебезпечного предмету. Візуальна зміна кольору ґрунту зазвичай фіксується там, де первинна концентрація тротилу становила від 1000 мг/кг і вище (0,1%). Це дуже значні концентрації, так як норми в США на тротил становлять 21 мг/кг, а при 100 мг/кг відбувається явне пригнічення росту рослинності.

**Джерело:** фотографія зроблена автором у грудні 2022 року в Харківській області.

алюмінізованих вибухових речовин. Хоча забруднення було як візуально, так і логічно підтверджено (знищений склад боєприпасів), але саме цей аналіз дозволив остаточно підтвердити про наявність значного забруднення ґрунтів вибуховими речовинами та продуктами їх трансформації, а також підтвердити гіпотезу про доцільність використання алюмінію як економічно вигідного індикатора цього забруднення.

Аналогічна проблема була виявлена під час проведення екологічного моніторингу на територіях Миколаївської області. Відбір проб ґрунту на ділянках, де здійснювалися заходи з гуманітарного розмінування, часто проводився без просторового узгодження з документацією операторів протимінної діяльності. За відсутності прив'язки до підтверджених місць вилучення. Знешкодження та знищення

вибухонебезпечних предметів, прямий пошук вибухових речовин давав негативні результати. Однак на локаціях, де попередньо фіксувалися аномальні концентрації алюмінію, подальший аналіз із застосуванням наявних скринінгових приладів дозволив ідентифікувати продукти трансформації енергетичних матеріалів та стабілізаторів (зокрема, Tris(2,4-di-tert-butylphenyl) phosphite, CAS 24964-94-8, який використовується як добавка до полімерних зв'язуючих, пластичних вибухових речовин (ПВР), а також у складі композитних ракетних палив).

**Головні висновки.** На основі теоретичного аналізу складів порохових сумішей сучасних засобів ураження, які застосовуються у російсько-українській війні, та практичних результатів екоотоксикологічних досліджень на деокупованих територіях Харківської та Миколаївської областей, встановлено:

значна масова частка алюмінію, що міститься як у бризантних зарядах масових боєприпасів (16–20%), так і в металевих порохових сумішах ракетних систем (12–22%), формує стійкий і репрезентативний хімічний слід у довкіллі. На відміну від бризантних вибухових речовин, які в більшості є органічними сполуками та піддаються швидкій термічній та біологічній деградації, дисперсний алюміній є компонентом, що доводить доцільність його використання як маркера для первинного інструментального скринінгу зон військово-техногенного забруднення;

дослідженням встановлено, що природна фонова концентрація загального алюмінію у чорноземах України, сформованих на лесових породах, є стабільною і коливається в межах 5,5–7,5% (55 000–75 000 мг/кг), перебуваючи в інертній формі у складі алюмосилікатів. Натомість інструментальний аналіз зразків з епіцентрів забруднення виявив значну їх кількість до 168 000 мг/кг (16,8% сухої маси), що більш ніж дворазове перевищує фон і є беззаперечним доказом антропогенного походження металу. Це дозволило достовірно зафіксувати хімічний слід від ВВП у випадках, де аналіз на органічні сполуки показав хибнонегативний результат;

об'єктивна оцінка екологічного стану територій вимагає комплексного підходу, де ідентифікація за алюмінієвим маркером має обов'язково інтегрується з ретельним аналізом офіційних документів операторів протимінної діяльності. Опрацювання звітів з нетехнічного/технічного обстеження та актів передачі очищених земель забезпечує верифіковану просторову базу щодо типів і локалізації боєприпасів, що є критично важливим для валідації результатів геохімічного моніторингу.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Наукове обґрунтування застосування алюмінію як маркера забруднення ґрунтів вибу-

хонебезпечними предметами створює підґрунтя для модернізації алгоритмів екологічного контролю та відновлення територій, які зазнали забруднення внаслідок ведення військових (бойових) дій. Практичне впровадження результатів дослідження відкриває наступні перспективи:

1. Розробка та оновлення національних стандартів якості ґрунтів. Результати дослідження дозволяють ініціювати зміни до чинної нормативно-правової бази у сфері охорони земель. Традиційні агрохімічні протоколи, які ігнорують алюміній через його природну інертність у ґрунтах, мають бути доповнені методиками визначення валового вмісту металу як техногенного індикатора. Це дозволить законодавчо закріпити критерії розмежування природного фону (5,5–7,5%) та забруднення в наслідок ведення військових (бойових) дій (понад 10%), що є важливим для юридичної верифікації екологічних збитків.

2. Оптимізація витрат на масовий скринінг територій. Використання алюмінію як маркера дозволяє кардинально змінити економіку моніторингу. Замість дороговартісного хроматографічного пошуку органічних вибухових речовин, які часто трансформуються, пропонується впровадження оперативного польового скринінгу за допомогою портативних рентгенофлуоресцентних аналізаторів (XRF). Такий підхід забезпечує швидку локалізацію "гарячих точок" (hotspots) забруднення без вивезення проб за кордон. Також це дозволить знизити витрати на лабораторні дослідження на 60–80%, фокусуючи ресурси лише на підтвердженні складних продуктів трансформації у задалегідь виявлених аномаліях.

3. Підвищення точності картування зон фітотоксичності. Оскільки стабільний алюміній корелює з місцями залягання мобільних і токсичних метаболітів (амінодинітротолуолів), його використання як трасера дозволяє створювати високоточні цифрові карти забруднення. Це мінімізує ризики вирощування агропродукції на ділянках із прихованою токсичністю, де візуальні ознаки забруднення вибуховими речовинами не виявляються, а хімічна небезпека в ґрунтового розчині зберігається.

4. Валідація результатів гуманітарного розмінування. Запропонована методологія формує інструментальну базу для підтвердження якості розмінування. Інтеграція даних про вміст алюмінію зі звітами операторів протимінної діяльності (IMSMA) дозволяє підтверджувати відповідність фактичного забруднення ґрунту типам боєприпасів, зазначеним у актах виконаних робіт. Крім того, в рамках контролю якості розмінування це дозволить надавати власникам земель додаткові гарантії екологічної безпеки територій.

#### Література

1. Ukraine: 2023 Humanitarian Needs Overview / OCHA. 2023. 118 p. URL: <https://reliefweb.int/report/ukraine/ukraine-2023-humanitarian-needs-overview-january-2023-enuk> (дата звернення: 30.03.2026).

2. Clearing the Mines 2023 : report / Mine Action Review, GICHD. Geneva, 2023. 320 p.
3. Pichtel J. Distribution and Fate of Military Explosives and Propellants in Soil: A Review. *Applied and Environmental Soil Science*. 2012. Vol. 2012. P. 1–33.
4. Pennington J. C., Brannon J. M. Environmental fate of explosives. *Thermochimica Acta*. 2002. Vol. 384. P. 163–172.
5. Singh S., Ray K., Shrivastav P. Environmental fate of explosive residues: transformation and degradation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2012. Vol. 11. P. 113–132.
6. Bausinger T., Preuß J. Environmental assessment of former military sites: A review on the fate of energetic compounds. *Science of The Total Environment*. 2012. Vol. 416. P. 1–17.
7. Method 8330A. Nitroaromatics and Nitramines by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) / U.S. Environmental Protection Agency. Washington, DC, 2007. 33 p.
8. Compositional and morphological changes in spark-ignited aluminum propellants / S. Taylor et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2010. Vol. 177, Iss. 1-3. P. 605–611.
9. Identity and distribution of residues of energetic compounds at army live-fire training ranges / T. F. Jenkins et al. *Chemosphere*. 2006. Vol. 63, Iss. 8. P. 1280–1290. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.09.066.
10. Collection and Processing of Representative Samples for Energetic Residues / A. D. Hewitt et al. *Environmental Forensics*. 2007. Vol. 8, Iss. 1-2. P. 97–102. DOI: 10.1080/15275920601180585.
11. Geochemical and morphological characterization of post-detonation residues from aluminized explosives / M. C. Baddock et al. *Science of The Total Environment*. 2015. Vol. 506. P. 394–402.
12. *Ecotoxicology of Explosives* / G. I. Sunahara, G. Lotufo, R. G. Kuperman, J. Hawari. Boca Raton : CRC Press, 2009. 352 p.
13. Jenkins T. F., Hewitt A. D., Grant C. L. Spatial heterogeneity of energetics and propellants on training ranges. Hanover : US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 2006. 32 p. (ERDC/CRREL TR-06-11).
14. A case study of contaminants on military ranges: Camp Edwards, Massachusetts, USA / J. Clausen, J. Robb, D. Curry, N. Korte. *Environmental Pollution*. 2004. Vol. 129, № 1. P. 13–21.
15. Akhavan J. *The Chemistry of Explosives*. 3rd ed. Cambridge : Royal Society of Chemistry, 2011. 200 p.
16. Cooper P. W. *Explosives Engineering*. New York : Wiley-VCH, 1996. 480 p.
17. Kubota N. *Propellants and Explosives: Thermochemical Aspects of Combustion*. 3rd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2015. 556 p.
18. Sutton G. P., Biblarz O. *Rocket Propulsion Elements*. 9th ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2016. 792 p.
19. Technical guidance for military Munitions response actions / U.S. Army Corps of Engineers. 2013. URL: [https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM\\_200-1-15.pdf](https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_200-1-15.pdf) (дата звернення: 08.04.2026).
20. TM 9-1300-214 *Military Explosives* / Department of the Army Technical Manual. 1984. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-03/documents/9546041.pdf> (дата звернення: 08.04.2026).
21. Вибухова справа: навч. посіб. / Навчальний центр оперативно-рятувальної служби цивільного захисту ДСНС України. Київ, 2013. 156 с.

Дата першого надходження статті до видання: 09.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 21.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026