

© П.К. Ломазов¹, А.В. Павличенко¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІН СТАНУ ДОВКІЛЛЯ ВНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

© P. Lomazov¹, A. Pavlychenko¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

IMPROVEMENT OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE ASSESSMENT AND FORECASTING OF CHANGES IN THE ENVIRONMENTAL CONDITION AS A CONSEQUENCE OF MILITARY ACTIONS

Мета. Дослідження впливу ракетних вибухів, вибухів БПЛА та потенційних наслідків для здоров'я населення від них та екосистем, а також розробка методичних рекомендацій для зменшення впливу на навколишнє середовище та підвищення ефективності заходів безпеки в умовах можливих техногенних катастроф, що виникають внаслідок воєнних дій.

Методика досліджень. Для вирішення завдань в роботі застосовувались: науковий пошук та узагальнення даних літературних джерел; статистичний аналіз – для оцінки динаміки обсягів надходження забруднюючих речовин, що утворюються під час вибухів у повітрі, вибухів на земній поверхні, вибухів на стратегічних об'єктах, а також їхніх наслідків.

Результати досліджень. Проаналізовано будову ракетного обладнання, конструкцію та вміст хімічних речовин, наслідків на здоров'я. Оцінено потенційну динаміку надходження шкідливих речовин в атмосферу від падіння ракет, їх вибуху за різних умов. Проаналізовано види джерел забруднення, що виникають внаслідок воєнних дій.

Наукова новизна. Встановлено особливості впливу на атмосферне повітря вибухів під час ракетних обстрілів, пожеж, горіння військової техніки, палива тощо. Визначено наслідки та масштаби впливу на стан компонентів навколишнього середовища та здоров'я людини залежно від типу снарядів, ракет, безпілотних літальних апаратів та інших видів зброї масового ураження, а також хімічного складу ракетного палива, продуктів детонації.

Практичне значення. Усвідомлення та мінімізація екологічних ризиків, які пов'язані із використанням боєприпасів через надання детальної інформації про токсичні компоненти та їхній вплив на здоров'я та довкілля. Це також окреслює необхідність дотримання нормативних норм утилізації боєприпасів, а також покращує практику військових навчань з точки зору екологічної безпеки, що загалом веде до вдосконалення нормативних актів і підвищення рівня екологічної безпеки в умовах воєнних дій з використанням сучасних засобів та ракетних комплексів.

Ключові слова: атмосферне повітря, ракетні вибухи, викиди шкідливих речовин, індекс якості повітря, індекс забруднення атмосфери, здоров'я населення.

Вступ. На сьогоднішній день дослідження рівня негативних наслідків для атмосферного повітря від результату воєнних дій із використанням різного типу ракетноносіїв, що випускають по території України ракети із вибуховим зарядом різних видів із різним хімічним складом та фізичними властивостями є дуже

важливим. В даний момент в Україні, відповідно до угоди про асоціацію з Європейським Союзом, впроваджується Директива 2008/50/ЄС, яку прийняли Європейський Парламент і Рада 21 травня 2008 року. Цей документ визначає стандарти та встановлює вимоги і норми для оцінки та контролю якості повітря, що спрямовано на забезпечення чистоти атмосферного повітря [1].

В результаті застосування ракетних систем формується негативний вплив на якість повітря. Ракетні вибухи можуть супроводжуватися викидами різних шкідливих речовин, що потенційно призводить до серйозного забруднення повітря та негативних наслідків для навколишнього середовища [2].

Оскільки покращення якості атмосферного повітря є важливим завданням, варто на постійній основі досліджувати концентрації різних речовин у повітрі, в тому числі, що надходять від вибухів та пожеж під час ракетного обстрілу.

Систему екологічного моніторингу атмосферного повітря на урбанізованих територіях, у містах та на муніципальних об'єктах необхідно регулярно аналізувати та вдосконалювати, оскільки з часом традиційні методи та системи втрачають свою оригінальність та достовірність [3]. У контексті процесів євроінтеграції, актуальними та пріоритетними стають завдання вдосконалення методологічних підходів до прогнозування та аналізу змін стану довкілля [4, 5].

Основна частина. Джерела забруднення довкілля можуть бути стаціонарними та пересувними. Стаціонарні джерела забруднення точковими, лінійними та площинними. Також, джерела забруднення можуть бути організованими і неорганізованими [6].

Війна, що триває в Україні наносить велику шкоду навколишньому середовищу, це не тільки національний вплив, це також транскордонний вплив й на інші країни. Так, за інформацією Всесвітнього фонду охорони природи, вже 20% природоохоронних територій України потерпіли від війни, а у зоні ризику опинилися 2,9 млн га Смарагдової мережі, території якої є значною частиною природоохоронної мережі Європи і яка охороняється у межах законодавства ЄС та Ради Європи. У повітря вже потрапило понад 38 тисяч тон викидів від горіння військової техніки та утворилося понад 352 тисячі тон відходів, які забруднюють не лише повітря, а й землю [7].

Для населення міст та інших урбанізованих територій виникли нові джерела викидів шкідливих речовин в атмосферне повітря з 2022 року у виді вибухів ракет різних видів, безпілотних літальних апаратів (БПЛА), горіння військової техніки, та пожеж, що спричинені вибухами. Ці джерела не є стаціонарними і прогнозування де саме буде вибух є неможливим. Місце вибуху залежить від багатьох факторів – конструкції ракети або БПЛА, географічних даних, роботи протиповітряної оборони, наявних промислових або інших стратегічних об'єктів в зоні вибухів.

Внаслідок вибуху, також може статися пожежа. Це може бути пожежа на будь-якому промисловому комплексі або агломерації. Будь-яка пожежа – на промислових комплексах, об'єктах інфраструктури, в лісах або на урбанізованих об'єктах – має негативний вплив на довкілля. Досить часто виникає пожежа, після чого горить нафта, матеріали, сировина тощо. Місце виникнення пожежі

потребує детального аналізу, оскільки, під час пожеж в докiллiя потрапляє значна кiлькiсть небезпечних речовин. Масштаби цього забруднення будуть пропорційнi розмiрам можливої пожежi. На рис. 1 показанi можливі наслідки в залежності від сценарію подiй.

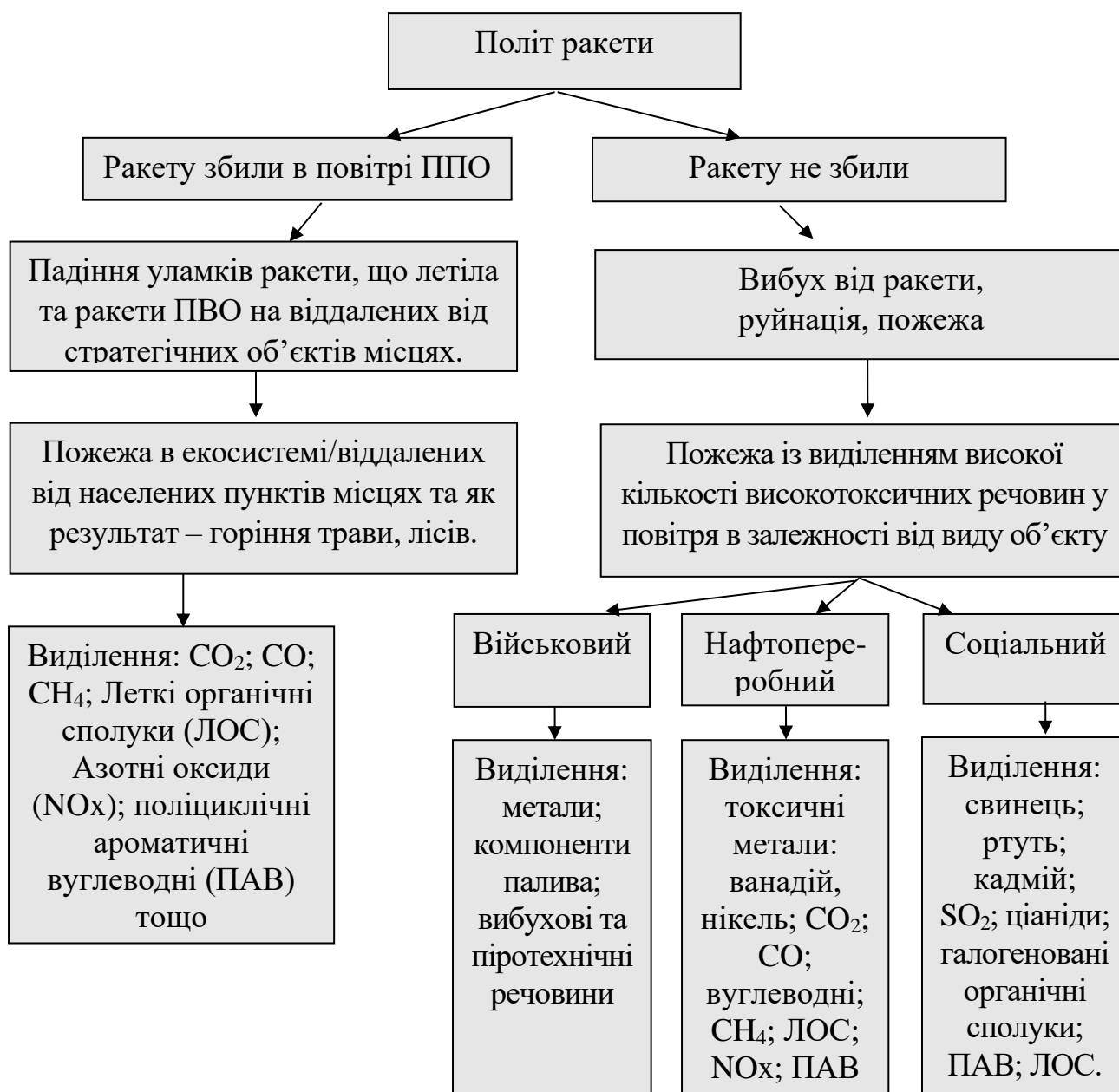


Рис. 1. Види шкідливих речовин, що виділяються в залежності від сценарію подiй

При горінні нафти, в атмосферне повітря виділяється ряд шкідливих речовин, а саме: карбон, водень, сірка, нітроген у паливі, нітроген за рахунок оксигену. Концентрацію кожної речовини важливо розуміти та робити детальні аналізи, щоб вчасно прийняти управлінські рішення і якісно спрогнозувати який вплив буде на навколишнє середовище [8, 9].

За даними табл. 1 приймаємо до уваги, що джерела негативного впливу на докiллiя є рiзними на кожному етапі. Таким чином, кожен етап має нестандартні

характеристики щодо негативного впливу на навколишнє середовище. Таким чином, запуск ракети є точковим фактором, політ ракети є лінійним фактором, вибух ракети або БПЛА у повітрі та на поверхні є точковим фактором, при цьому виникнення пожежі за результатами вибуху є площинним фактором. Всі ці джерела є неорганізованими та нестационарними. Останній етап в процесі описаної дії, а саме – утилізація вибухових або інших хімічних речовин та устаткування – вже є організованим та стаціонарним, оскільки це відбувається згідно з визначеним Порядком утилізації ракет, боєприпасів і вибухових речовин [10].

Таблиця 1

Класифікація джерел забруднення атмосферного повітря від воєнних дій

Джерело забруднення	Характеристики джерел забруднення							
	Точкові	Лінійні	Площинні	Організовані	Неорганізовані	Нестационарні	Стаціонарні	Квасістаціонарні
Запуск ракети	+	-	-	-	+	+	-	-
Політ ракети	-	+	-	-	+	+	-	-
Вибух ракети/БПЛА у повітрі	+	-	-	-	+	+	-	-
Вибух ракети/БПЛА на поверхні	+	-	-	-	+	+	-	-
Виникнення пожежі	-	-	+	-	+	+	-	-
Утилізація речовин/устаткування	+	-	+	+	-	-	+	+

Для детального аналізу, отримання результатів рекомендуємо проводити оцінку та аналіз таких аспектів: характеристика та опис хімічних компонентів, оцінка впливу на якість атмосферного повітря, аналіз шкоди, завданої військовими діями, а також визначення необхідності та методів утилізації. Ці пункти допоможуть якісно зробити висновки та отримати практичні результати та покращити методологію аналізу (рис. 2).

Таким чином, крім безпосередніх наслідків від влучання, ракети також мають потенційно серйозний негативний вплив на довкілля через викид токсичних речовин та спричинення змін у складі атмосфери [9].

Згідно із Законом України [10] боєприпаси потрібно утилізувати, обов'язково згідно із Порядком утилізації ракет, боєприпасів і вибухових речовин.

Взагалі ракети є складними технічними конструкціями, зазвичай виготовленими з різних матеріалів з метою досягнення ефективності та точності. Основними складовими ракет є метали, такі як алюміній, титан, нержавіюча сталь та композитні матеріали, карбонові волокна або склопластик. У деяких випадках можуть використовуватися також рідинні або тверді палива, які містять

окислювачі, паливо та стабілізатори. Запальні заряди та вибухові пристрої також входять до складу ракетних систем.

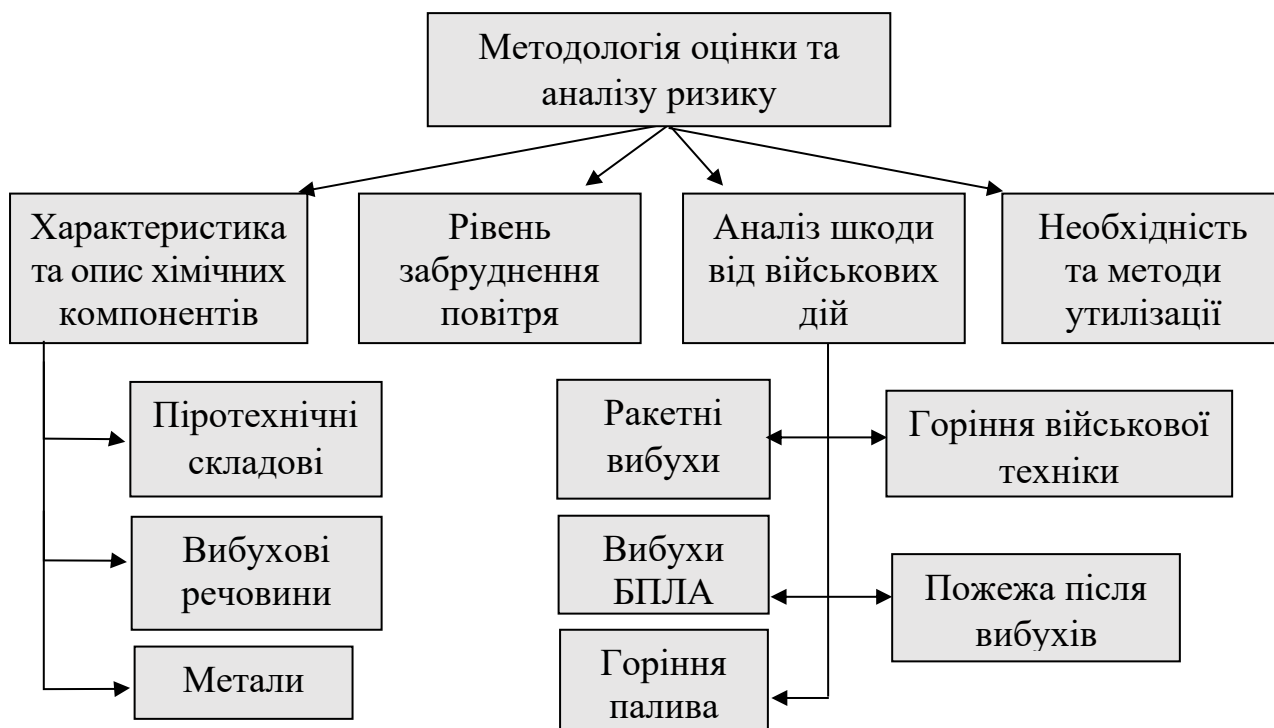


Рис. 2. Методологія оцінки та аналізу шкоди на атмосферне повітря під час військових дій

Наприклад, ракета X-101 має приблизно 500 кілограмів ракетного палива. Варто розуміти, що коли ракета злетить і пролетить сотні кілометрів, значна частина палива залишиться в ній, навіть якщо вона вдарить у ціль. Серед відомих небезпечних компонентів ракетного палива є гептил і нітрозодиметиламін. Гептил належить до I класу токсичних речовин і має канцерогенні, ембріотоксичні, гонадотоксичні та алергенні властивості. Ця речовина може спричинити отруєння будь-яким шляхом проникнення в організм, викликаючи різні порушення, такі як ураження нервової системи, імунотоксичність та проблеми з кровотворенням. Нітрозодиметиламін також є токсичною речовиною I класу, яка утворюється під час окиснення гептилу. Ця речовина може мати широкий спектр токсичних впливів на організм, включаючи негативний вплив на нервову систему, нирки, печінку та кровоутворення. Такі речовини можуть викликати не лише отруєння внаслідок вдихання, але й при потрапленні через слизові оболонки та шкіру.

Під час військових дій та навчаннях із застосуванням зброї, в повітря надходять сполуки різних хімічних елементів різних видів, а саме: залізо, алюміній, мідь, хром, вольфрам, уран, свинець, берилій, цинк, ртуть, нітроцелюлоза, нітрогліцерин, динітротолуол, нітрокванідин, перхлорат амонію, тринітротолуол, гексоген, октоген, тетранітрат пентаеритриту, динітроанізол, нітротриазолон, гексахлоретан, антрацен, білий фосфор, червоний фосфор (табл. 2) [11].

Таблиця 2

Шкідливі речовини, що надходять під час військових дій

Метали									
Залізо (Fe)	Алюміній (Al)	Мідь (Cu)	Хром (Cr)	Вольфрам (W)	Уран (U)	Свинець (Pb)	Берилій (Be)	Цинк (Zn)	Ртуть (Hg)
Компоненти палива									
нітроцелюлоза		нітрогліцерин		динітротолуол		нітрокванідин		перхлорат амонію	
Вибухові речовини									
тринітротолуол		гек-соген	октоген	етранітрат пентаеритриту		динітроанізол		нітротриа-золон	
Інші піротехнічні складові									
гексахлоретан			антрацен		білий фосфор		червоний фосфор		

Під час вибуху ракети в атмосферному повітрі відбувається викид та поширення різних шкідливих речовин, які можуть бути небезпечними для навколишнього середовища та здоров'я людей, в залежності від їхньої концентрації та місці вибуху. Серед них можуть бути окиси азоту, діоксиди сірки, метали, аміак, діоксид вуглецю та інші речовини, які можуть викликати забруднення повітря та негативно впливати на якість атмосфери та здоров'я людей і тварин.

Згідно з методичними рекомендаціями «Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря» можна проаналізувати зазначені у таблиці 2 речовини (табл. 3) [12].

Таблиця 3

Референтні концентрації за хронічного інгаляційного впливу [12]

Речовина	RfC, мг/м ³	Джерело	Критичні органи/системи
Алюміній та сполуки	0,005	NCEA	ЦНС, органи дихання
Берилій та сполуки	0,00002	IRIS	Органи дихання, імунна система
Мідь та сполуки	0,00002	CalEPA	Органи дихання, імунна система
Ртуть та сполуки	0,003	IRIS	ЦНС
Свинець та його неорганічні сполуки	0,00015	CalEPA	ЦНС, розвиток, кров
Фосфор	0,00007	CalEPA	Репродуктивна система, волосся
Хром (III)			Органи дихання
Хром (VI)	0,0001	IRIS	Органи дихання
Цинк та сполуки	0,0009	CalEPA	Органи дихання

Важливо чітко розуміти в яких кількостях забруднюючі речовини викидаються у повітря саме під час дій – вибухів ракет та БПЛА, горінні палива та військової техніки. Стаціонарні пости спостереження, на жаль, несуть низьку ефективність для якісного дослідження стану атмосферного повітря у містах та інших

урбанізованих територій саме для виконання завдання – оперативного дослідження якості повітря та необхідності швидкого відбору проби повітря для цього аналізу.

Кожна із зазначених речовин (див. табл. 2) має свою характеристику та властивості. Найважливішим компонентом в устаткуванні є вибухові речовини, хоча й без інших ці дії неможливі. Порівнюємо вибухові речовини за наступною класифікацією, а саме:

- хімічна формула;
- використання: основні сфери застосування речовини;
- потенціал детонації (клас): класифікація за ступенем небезпеки детонації;
- вибухова потужність (ТНТ еквівалент): відносна потужність вибуху у порівнянні з ТНТ;
- токсичність: вплив речовини на здоров'я людини;
- стабільність при зберіганні: здатність зберігати вибухові властивості при довготривалому зберіганні.

Загальний огляд ключових характеристик кожної з речовин зображено в табл. 4, це допоможе краще зрозуміти їхні особливості та потенційні ризики.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика вибухових речовин

Назва компонента	Формула	Де використовується	Клас детонації	ТНТ еквівалент	Рівень токсичності
Тринітротолуол (ТНТ)	$C_7H_5N_3O_6$	Військові та промислові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1 (базова одиниця)	Висока, канцероген
Гексоген (RDX)	$C_3H_6N_6O_6$	Військові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1,6	Висока, нейротоксин
Октоген (HMX)	$C_4H_8N_8O_8$	Військові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1,7	Висока, токсична
Етранітрат пентаеритриту (ПЕН)	$C_5H_8N_4O_{12}$	Військові та промислові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1,66	Висока, токсична
Динітроанізол (DNAN)	$C_7H_6N_2O_5$	Компонент вибухових сумішей	Клас 1.1D	~0,8	Помірна
Нітротриазолон (НТО)	$C_2H_2N_4O_3$	Військові вибухові речовини	Клас 1.1D	~1,1	Низька

ТНТ еквівалент (TNT еквівалент) – це показник, який використовується для порівняння вибухової потужності різних вибухових речовин з тротилом (TNT), який вважається стандартом. Вибухова потужність вимірюється в мегаджоулях на кілограм вибухової речовини (МДж/кг) або кілокалоріях на кілограм (ккал/кг)

[13]. Тобто, потужність в 1,0 ТНТ еквівалент – це потужність, яка еквівалентна вибуховій потужності 1 кг тротилу.

Інші піротехнічні складові є теж компонентами, що використовуються в ракетному устаткуванні, БПЛА та інших вибухових пристроях при їх створенні. Порівняльна характеристика відображена в табл. 5.

Таблиця 5

Порівняльна характеристика піротехнічних складових

Назва компоненту	Формула	Де використання	ТНТ еквівалент	Рівень токсичності
Гексахлоретан	$C_6H_6Cl_6$	Розчинник, виробництво пестицидів, охолоджуючий агент	–	Висока, канцероген
Антрацен	$C_{14}H_{10}$	Виробництво барвників та фарб, у нафтопереробних процесах	–	Помірна
Білий фосфор	P	Хімічні вибухові речовини, сільське господарство	1,0	Висока, нейротоксин
Червоний фосфор	P	Виробництво піротехнічних виробів, сільське господарство	1,0	Висока, нейротоксин

Враховуючи, що ситуація на полі бою, місця вибуху, кількість та масштабність ракетних обстрілів, наявність постів спостереження та стан довкілля можуть непередбачувано та швидко змінюватися, необхідно забезпечувати постійний моніторинг та оновлення результатів аналізу. Це дозволить оперативно реагувати на зміни та вживати управлінські заходи задля захисту довкілля.

Геопросторовий аналіз є важливим інструментом для обґрунтування місць додаткового встановлення постів спостереження за допомогою картографічних даних. Використання географічних інформаційних систем (ГІС) дозволяє ефективно аналізувати та візуалізувати просторові дані, що значно покращує точність визначення оптимальних місць для постів спостереження. Це забезпечує краще покриття спостереженням та своєчасне виявлення небезпек, що особливо важливо в умовах швидко змінюваної ситуації на полі бою. Завдяки геопросторовому аналізу можливо також враховувати взаємозв'язки між природними умовами, інфраструктурою та потенційними загрозами, що дозволяє оптимізувати розташування постів та підвищити ефективність моніторингу довкілля.

Висновки та рекомендації. Оцінка та аналіз матеріалу, в тому числі характеристика, опис хімічних компонентів, до яких входять піротехнічні складові, вибухові речовини, метали тощо, а також рівня забруднення атмосферного

повітря та аналіз шкоди, що несуть військові дії, а саме ракетні вибухи, вибухи БПЛА, горіння палива та військової техніки, пожежа після вибухів, необхідність та методи утилізації, як отриманий результат – виявили, що є необхідність удосконалення методологічних підходів до оцінки та прогнозування змін стану довкілля внаслідок воєнних дій для забезпечення більш точних та надійних результатів.

Розробка детальних моделей оцінки впливу воєнних дій на довкілля є ґрунтовним кроком у напрямку збільшення точності та комплексності аналізу. Впровадження інтегрованих підходів дозволяє урахувати взаємозв'язки між різними факторами та їх вплив на довкілля, від складу хімічних речовин, що використовуються під час виготовлення ракетного устаткування до вибуху ракети у повітрі або на земній поверхні.

Є необхідність використовувати деталізовані дані про стан довкілля та характер воєнних дій. Використання сучасних технологій збору та аналізу даних, наприклад супутникові знімки, географічні інформаційні системи (ГІС), роза вітрів тощо, це може значно покращити якість аналізу.

Перелік посилань

1. Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 року про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи. (2008). База даних «Законодавство України». https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text
2. Bordeleau, G., Ampleman, G., Thiboutot, S., & Martel, R. (2008). Environmental impacts of training activities at an air weapons range. *Journal of Environmental Quality*, 37(5), 1751–1763. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0197>
3. Департамент екологічної політики Дніпропетровської міської ради. (2018). *Екологічний паспорт м. Дніпро*. https://dniprorada.gov.ua/upload/editor/Екологічний%20паспорт%20м%20Дніпро_2017_.PDF
4. *Методичні рекомендації з підготовки та затвердження Програм державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря (проект)*. (2021). Київ.
5. Хазан, П. В., & Ангурець, О. В. (2017). Впровадження принципів «зеленої економіки» в Дніпропетровській області: Сучасний стан та проблеми розвитку статистики, обліку та аудиту в умовах глобалізації та енергозбереження. *Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції*, 2, 203–205.
6. Бучавий, Ю. В., Павличенко, А. В., & Семеріч, К. В. (2013). Алгоритм багатофакторного моделювання процесів забруднення атмосферного повітря на гірничозбагачувальних комбінатах. *ДВНЗ “НГУ”*.
7. Гуророва, А. Д. (2023). Екологічні наслідки війни в Україні. *Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологічно сталий розвиток урбосистем: виклики та рішення в контексті євроінтеграції України»*, 151. https://eprints.kname.edu.ua/64315/1/Conference_NUUEK_2023_November_rev.pdf
8. Куценко, М. А., & Алексеєв, А. Г. (2020). *Оцінка кількості шкідливих речовин в продуктах згорання при пожежі розлитих горючих рідин та екологічних втрат внаслідок такої пожежі*. Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. <https://fire-journal.ck.ua/index.php/fire/article/view/53/44>
9. Хохолик, З. (2022). Екологічні загрози застосування ракетного озброєння та боєприпасів. *Наука і бізнес: проблеми, перспективи та інновації в умовах воєнного стану*. <http://dspace.wunu.edu.ua/bitstream/316497/47508/1/%D0%A5%D0%BE%D1%85%D0%BE%D0%BB%D0%B8%D0%BA%20%D0%97%D0%BE%D1%80%D1%8F%D0%BD%D0%B0.pdf>

10. Про затвердження Порядку утилізації ракет, боєприпасів і вибухових речовин. (2006). Київ. <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/812-2006-%D0%BF>
11. Колінковський, О. М. (2022). Проблеми оцінки хімічного пресингу та прогнозування наслідків для здоров'я людей від забруднення повітря, пов'язаного з веденням бойових дій в Україні. *Актуальні проблеми профілактичної медицини*, 25. <https://doi.org/10.32782/2786-9067-2023-25-21>
12. Наказ МОЗ Методичні рекомендації «Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря» № 184. (2007).
13. Held, M. (1983). TNT—equivalent. *Propellants, explosives, pyrotechnics*, 8(5), 158–167. <https://doi.org/10.1002/prop.19830080507>

ABSTRACT

Goal. To study the impact of rocket explosions, UAV explosions and potential consequences for public health and ecosystems, as well as to develop methodological recommendations to reduce the impact on the environment and increase the effectiveness of safety measures in the context of possible man-made disasters arising from military operations.

Methodology. The research applied the following methods: scientific search and synthesis of literature data; statistical analysis to assess the dynamics of pollutant emissions generated during explosions in the air, on the ground, and at strategic sites, as well as their consequences—fires.

Research Results. The structure of missile equipment, the design and content of chemicals, and health effects were analyzed. The potential dynamics of harmful substances entering the atmosphere from rocket fall and explosion under different conditions was estimated. The types of pollution sources arising from military operations are analyzed.

Scientific Novelty. The peculiarities of the impact on the atmospheric air of explosions during rocket attacks, fires, burning of military equipment, fuel, etc. are established. The consequences and extent of the impact on the state of environmental components and human health are determined depending on the type of shells, missiles, unmanned aerial vehicles and other types of weapons of mass destruction, as well as the chemical composition of rocket fuel and detonation products.

Practical Significance. Awareness and minimization of environmental risks associated with the use of ammunition by providing detailed information on toxic components and their impact on health and the environment. It also outlines the need to comply with ammunition disposal regulations and improves the practice of military exercises in terms of environmental safety, which generally leads to improved regulations and an increased level of environmental safety in the context of military operations using modern weapons and missile systems.

Keywords: *atmospheric air, rocket explosions, emissions of harmful substances, air quality index, atmospheric pollution index, public health.*