

*Ніна РАШКЕВИЧ PhD (ORCID: 0000-0001-5124-6068)*

*Іван РУЩАК (ORCID: 0009-0005-6654-7863)*

*Національний університет цивільного захисту України*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ ПРОЯВУ ФІЗІОЛОГІЧНОЇ ДІЇ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ТА ВОДНОГО СЕРЕДОВИЩА НА ЛЮДИНУ В ЗОНІ БОЙОВОГО УРАЖЕННЯ**

*У роботі досліджено фізіологічну дію небезпеки, спричиненої забрудненням ґрунтів та ґрунтових вод на територіях, що зазнали ураження ракетно-артилерійськими системами (РАС). Актуальність проблеми зумовлена складністю складу токсичних речовин, що потрапляють у довкілля внаслідок бойових дій, а також непередбачуваністю сценаріїв розвитку надзвичайних ситуацій (НС) у таких умовах. З метою уніфікації підходів до оцінювання ризику для здоров'я населення запропоновано класифікацію типів фізіологічної дії на основі характеру надходження небезпечних речовин в організм людини та темпу прояву клінічних ефектів.*

*Запропоновано розмежування двох основних типів: субгострий ( $T_{1-2}$ ), що реалізується переважно через вживання забрудненої питної води, та пролонгований ( $T_{2-3}$ ), пов'язаний із тривалим контактом із забрудненими ґрунтами та харчовою експозицією. Це дозволяє ефективніше інтегрувати фізіологічні ефекти в методологію управління НС. Також враховано форми взаємодії токсикантів: поєднану, синергетичну та антагоністичну, що є типовими для бойового забруднення.*

*Увагу приділено аналізу впливу факторів оточуючого середовища, зокрема воєнного навантаження, геологічних, гідрогеологічних, метеорологічних умов, типу земель та наявності критичної інфраструктури на траєкторію поширення забруднювачів та характер прояву фізіологічної небезпеки. Зазначено, що висока проникність ґрунтів, неглибоке залягання водоносних горизонтів та інтенсивні опади створюють сприятливі умови для швидкого перенесення токсичних речовин у зони життєдіяльності людини. Вразливість населення (вік, стан здоров'я, доступ до медичних послуг) додатково модифікує ступінь небезпеки.*

*Результати дослідження формують наукове підґрунтя для розробки системи заходів з управління НС, спрямованої на запобігання впливу небезпечних речовин на здоров'я населення та мінімізацію довготривалих наслідків бойових уражень довкілля.*

**Ключові слова:** *небезпека, ракетно-артилерійські ураження, фізіологічна дія, забруднення ґрунту, забруднення ґрунтових вод.*

**Постановка проблеми.** *Сучасні воєнні конфлікти супроводжуються масштабним руйнуванням територій, що створює передумови їх забруднення [1–3]. Серед вразливих компонентів довкілля є ґрунти та ґрунтові води, які здатні акумулювати токсичні речовини – важкі метали, органічні сполуки (ПАР, нафтопродукти), залишки вибухових речовин, неорганічні токсини, в окремих випадках радіонукліди. Це формує загрозу для здоров'я населення, яка може проявлятися як миттєво, так і через тривалий час після ураження.*

*Складність становить диференціація наслідків за часом їх прояву – від гострих (із миттєвим впливом на людину) до відстрочених (що виникають через дні або тижні) та пролонгованих (що формуються місяцями або роками, призводячи до хронічних захворювань).*

*Наразі відсутня цілісна методологія для управління надзвичайними ситуаціями (НС) – попередження та запобігання: НС унаслідок наявності в ґрунті шкідливих (забруднювальних) речовин понад гранично-допустимої концентрації (ГДК) (код 10410), НС*

унаслідок наявності у воді шкідливих (забруднювальних) речовин понад ГДК (код 10430), НС, пов'язані з отруєнням людей (код 20720) (у результаті споживання неякісних продуктів харчування – код 20721, неякісної питної води – код 20722, з отруєнням людей токсичними або іншими речовинами (окремі випадки) – код 20723, групові випадки – код 20724, масові випадки – код 20725). Існуючі підходи здебільшого фрагментарні, не враховують специфіку бойових уражень та взаємодію ряду факторів.

У зв'язку з цим актуальним є завдання ідентифікації факторів, що впливають на швидкість прояву наслідків небезпеки забруднення ґрунтів та ґрунтових вод після ракетно-артилерійських уражень.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** У світовій науковій практиці накопичено значний досвід дослідження механізмів міграції забруднювачів, оцінки їх небезпеки.

У роботі [4] окреслено основні механізми міграції забруднювачів у підземних водах, зокрема процеси адсорбції, які визначають час, за який токсичні речовини досягають водоносних горизонтів або поверхневих джерел споживання. Уточнення цих процесів дає змогу більш точно прогнозувати часові рамки прояву негативних наслідків.

Сучасні підходи до моделювання часу досягнення безпечних рівнів забруднення були запропоновані авторами [5], які впровадили алгоритми машинного навчання (BiLSTM і Random Forest) для прогнозування тривалості забруднення. У дослідженні підкреслено роль як гідрогеологічних характеристик, так і типу забруднювачів у затримці або прискоренні процесів очищення середовища.

Дослідниками [6] у системному огляді виокремили пріоритетні фактори, що впливають на якість ґрунтових вод, зокрема наявність арсену, кадмію та джерел антропогенного походження. Їх дослідження акцентує увагу на різниці між хронічним та гострим впливом цих токсикантів на здоров'я людини.

У роботі [7] детально проаналізовано сучасні методи оцінки вразливості ґрунтових вод до забруднення, які можуть бути використані в рамках управління надзвичайними ситуаціями. Висвітлено підходи, що дозволяють визначити території з підвищеним ризиком ураження, що є критично важливим у контексті військових дій або техногенних аварій.

Увагу приділяють процесам передачі забруднювачів від ґрунту до води і далі до рослин [8]. Такий ланцюг спричиняє пролонговані наслідки для здоров'я населення в регіонах із сільськогосподарським використанням землі.

Практичний інструмент для ідентифікації та картографування ризикових зон забруднення запропоновано в роботі [9]. Методика базується на поєднанні даних про фактичний рівень забруднення та його можливі екологічні й медичні наслідки, що дозволяє підвищити ефективність запобігання надзвичайним ситуаціям.

Автори [10] проаналізували механізми дії забруднювачів на організм людини – у разі гострої дії та за умов хронічного впливу. Небезпеку становлять органічні сполуки та метали, які порушують функції серцево-судинної, нервової та імунної систем, що є актуальним для оцінки реальних ризиків на територіях із тривалим забрудненням.

Дослідники [11] акцентують увагу на специфіці екологічної небезпеки, що виникає внаслідок вогневого ураження територій боєприпасами. Запропоновано практичні підходи до мінімізації таких наслідків шляхом своєчасної ідентифікації осередків забруднення. У роботі [12] розглянуто заходи для попередження забруднення водних об'єктів у населених пунктах, де відбувалися бойові дії.

Проблема поширення важких металів у ґрунтовому середовищі розкрита у роботі [13], в якій наведено перелік факторів, що визначають характер їх вертикального і горизонтального розподілу. Ці результати є основою для подальшого прогнозування шляхів міграції забруднювачів. Актуальним є дослідження процедур оптимізації відбору проб ґрунту [14], в якому обґрунтовано використання адаптивних стратегій пробовідбору для виявлення ділянок потенційної небезпеки у разі техногенних впливів.

У роботі [15] закладено основи математичного моделювання процесів впливу ракетно-артилерійських уражень на стан ґрунтових вод. Досліджено граничні умови

існування математичної моделі та окреслено шляхи її застосування для оцінки ступеня ризику на конкретних територіях.

Огляд наукових джерел свідчить про формування міждисциплінарного підходу до вивчення наслідків забруднення ґрунтів та ґрунтових вод. Процеси міграції, накопичення токсичних речовин тісно пов'язані з гідрогеологічними умовами, хімічною стабільністю забруднювачів й глибиною залягання водоносних горизонтів.

**Постановка задачі та її розв'язання.** Мета дослідження – виділити та класифікувати фактори, що впливають на характер прояву фізіологічної дії небезпеки забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на здоров'я населення на територіях, що зазнали ураження ракетно-артилерійськими системами.

Об'єктом дослідження є процеси забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на територіях, уражених ракетно-артилерійськими системами.

Предметом дослідження є фактори, що визначають характер прояву фізіологічної дії небезпеки забруднення на здоров'я населення, з урахуванням специфіки ураження територій та умов навколишнього середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- деталізувати характер прояву фізіологічної дії небезпеки забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на здоров'я людини з метою розробки методології управління НС;
- проаналізувати вплив оточуючого середовища на поширення небезпеки ураження ракетно-артилерійськими системами.

У дослідженні для деталізації характеру прояву фізіологічної дії небезпеки застосовуються аналітичний метод, встановлення причинно-наслідкові зв'язки між факторами оточуючого середовища та характером впливу небезпеки – системний аналіз, а для зіставлення результатів в різних умовах – порівняльний метод.

**Виклад основного матеріалу дослідження. Деталізація характеру прояву фізіологічної дії небезпеки забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на здоров'я людини з метою розробки методології управління НС.**

Традиційний прояв фізіологічної дії, який поділяється на гострий ( $T_1$ ), відстрочений ( $T_2$ ) та пролонгований ( $T_3$ ), має обґрунтовану токсикологічну базу, проте в умовах воєнного ураження, коли джерела забруднення є змішаними, а сценарії розвитку НС – непередбачуваними, постає необхідність в уніфікації типу прояву небезпеки забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на здоров'я людини з метою розробки методології управління НС.

Ураження РАС супроводжується викидом комплексного набору небезпечних речовин, у реальних умовах дія яких не є ізольованою, а проявляється у різних формах взаємодії (одинарній, поєднаній, синергетичній, антагоністичній).

У фазі активних бойових дій переважають гострі та відстрочені ефекти, які реалізуються у межах хвилин, днів або тижнів після контакту з небезпечними речовинами. У фазі післявоєнного відновлення основну загрозу становлять пролонговані наслідки, пов'язані з накопиченням токсичних речовин у довкіллі та організмі людини через місяці або роки.

Шлях надходження небезпечних речовин до організму людини також визначає характер прояву фізіологічної дії небезпеки. Забруднення питної води може призводити до швидкого розвитку гострих симптомів, що потребують оперативного виявлення та реагування. Забруднення через ґрунт спричиняє відстрочені або пролонговані наслідки для здоров'я людини, пов'язані з кумулятивним ефектом та тривалим впливом на організм.

Це підкреслює необхідність диференційованого підходу до розробки методології управління НС залежно від домінуючого шляху надходження небезпечних речовин у конкретних умовах ураженої території.

Отже, управлінська логіка протидії небезпеці вимагає чіткого поділу прояву фізіологічної дії на два типи: субгострий ( $T_{1-2}$ ) – через вживання забрудненої питної води та пролонгований ( $T_{2-3}$ ) – через контакт з забрудненим ґрунтом/харчову експозицію (надходження небезпечних речовин в організм людини через їжу).

Субгострий тип відображає ті випадки, коли наслідки впливу небезпечних речовин не є миттєвими, але й не віддаленими, що є типовим для ситуацій забруднення питної води з послідовною появою клінічних симптомів у межах короткого періоду.

**Аналіз впливу оточуючого середовища на поширення небезпеки ураження ракетно-артилерійськими системами.**

В умовах воєнного ураження формування та поширення небезпеки забруднення навколишнього середовища зумовлюється фізичними характеристиками самого ураження, комплексом природних та техногенних факторів. Для об'єктивної оцінки реальних масштабів загроз здоров'ю населення важливо виділити та проаналізувати, яким чином воєнне навантаження, геологічне, гідрогеологічне, метеорологічне середовища, а також антропогенні чинники модифікують траєкторії міграції забруднювачів, їхню концентрацію, тривалість дії.

Воєнне навантаження визначає не лише масштаби фізичного руйнування, а й характер хімічного профілю забруднення, його глибину проникнення в екосистему, тривалість збереження токсикантів у середовищі та інтенсивність їхнього впливу на організм людини (табл. 1). Відповідно, при оцінюванні небезпеки для здоров'я населення необхідно враховувати характеристики застосованого озброєння, що безпосередньо впливають на темп і тяжкість прояву фізіологічної дії небезпечних речовин.

Таблиця 1 – Вплив воєнного навантаження на поширення небезпеки.

| №  | Фактор воєнного навантаження | Характеристика                                   | Характер впливу                                                          | Тип прояву фізіологічної дії |
|----|------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1  | Тип та калібр боєприпасів    | Калібр <100 мм (мінометні, легкі снаряди)        | Локальне поверхнєве забруднення вибуховими речовинами, важкими металами  | $T_{2-3}$                    |
| 2  |                              | Калібр 100–155 мм (артилерія середнього калібру) | Глибше проникнення ВР та важких металів, збільшення площі забруднення    | $T_{2-3}$                    |
| 3  |                              | Калібр >155 мм (важка артилерія, гаубиці)        | Масивна контамінація, значне проникнення токсикантів у ґрунт і воду      | $T_{1-2}$                    |
| 4  |                              | РСЗВ (Град, Ураган, Смерч)                       | Широкомасштабне забруднення великих площ, глибоке ураження середовищ     | $T_{1-2}, T_{2-3}$           |
| 5  |                              | Касетні боєприпаси                               | Дифузне, фрагментарне забруднення токсичними залишками на великих площах | $T_{1-2}$                    |
| 6  |                              | Кумулятивні снаряди                              | Місцева деградація ґрунтів, металеві залишки, термічна дія               | $T_{2-3}$                    |
| 7  |                              | Фугасні/осколково-фугасні снаряди                | Проникнення ВР та важких металів у тріщини, водоносні горизонти          | $T_{1-2}$                    |
| 8  |                              | Термобаричні (об'ємно-детонуючі)                 | Аерозольне забруднення, зміни структури ґрунтів, залишки токсичних газів | $T_{1-2}$                    |
| 9  |                              | Боєприпаси з фосфором                            | Хімічне забруднення фосфатами, кислотами, ураження водних джерел         | $T_{1-2}$                    |
| 10 |                              | Радіоактивні БП (збіднений уран, Cs-137)         | Радіоактивне зараження, тривалий період напіврозпаду, біоаккумуляція     | $T_{2-3}$                    |

| №  | Фактор<br>воєнного<br>навантаження | Характеристика         | Характер впливу                                                  | Тип прояву<br>фізіологічної<br>дії |
|----|------------------------------------|------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 11 | Інтенсивність<br>обстрілів         | Кількість снарядів     | Пропорційне збільшення обсягу і<br>площі забруднення             | $T_{1-2}, T_{2-3}$                 |
|    |                                    | Тривалість<br>ураження |                                                                  |                                    |
|    |                                    | Щільність<br>ураження  |                                                                  |                                    |
| 12 | Тип детонації                      | Наземна                | Визначає глибину проникнення<br>токсикантів та шлях їх поширення | $T_{1-2}, T_{2-3}$                 |
|    |                                    | Повітряна              |                                                                  |                                    |
|    |                                    | Підземна               |                                                                  |                                    |

Максимальну загрозу становлять системи залпового вогню (Град, Ураган, Смерч), термобаричні, фосфорні, касетні та радіоактивні боеприпаси, а також фугасні снаряди великого калібру з підземною або наземною детонацією. Вони забезпечують високу щільність ураження, утворення токсичних залишків, забруднення великих площ.

Геологічні умови визначають траєкторії, швидкість та масштаби міграції забруднювачів (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив геологічних умов на поширення небезпеки.

| № | Геологічні фактори                               | Характеристика                               | Характер впливу                                                                            |
|---|--------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Тип<br>грунтоутворюючої<br>породи                | Пісок, супісок,<br>суглинок, глина           | Піски сприяють швидкій міграції<br>токсикантів у глибину; глини –<br>уповільнюють          |
| 2 | Гранулометричний<br>склад                        | Крупнозернисті або<br>дрібнозернисті фракції | Великі пори – швидка фільтрація; дрібні<br>пори – затримка та накопичення                  |
| 3 | Наявність<br>тріщинуватості,<br>карстових пустот | Розломи, порожнини,<br>щілини                | Забезпечують стрімке просочування<br>токсикантів до водоносних горизонтів                  |
| 4 | Наявність<br>водотривких шарів                   | Глини, мергелі,<br>суглинки                  | Перешкоджають просочуванню<br>забруднень до нижчих горизонтів                              |
| 5 | Тип рельєфу                                      | Схили, рівнини,<br>улоговини                 | На схилах – стік поверхневий, менше<br>проникнення; в улоговинах – застій і<br>накопичення |

Небезпечними є ділянки з піщаними, тріщинуватими або карстовими породами, де ґрунти мають високу проникність. У таких умовах забруднювачі швидко проникають у водоносні горизонти, сприяють забрудненню підземних вод, створюючи умови для субгострого ( $T_{1-2}$ ) прояву фізіологічної дії. Низини, знижені рельєфні форми, балкові системи та заплави є природними накопичувачами забруднювачів. Такі території небезпечні через потенційну концентрацію токсикантів і повільне самоочищення.

Гідрогеологічні умови визначають поведінку забруднювачів у водному середовищі: швидкість, напрямок і глибину їхнього поширення в ґрунтових та підземних водах (табл. 3).

Таблиця 3 – Вплив гідрогеологічних умов на поширення небезпеки.

| № | Гідрогеологічний фактор                        | Характеристика                                                 | Характер впливу                                                                                               |
|---|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Глибина залягання водоносного горизонту        | Неглибокий (1–5 м), середній,глибокий (>10 м)                  | Неглибокі горизонти швидко забруднюються – ризик гострої дії через питну воду                                 |
| 2 | Тип водоносного горизонту                      | Безнапірний / напірний / тріщинуватий / міжпластовий           | Напірні води – захищені частково; безнапірні – високий ризик; тріщини – швидка міграція                       |
| 3 | Напрямок і швидкість підземного стоку          | Залежить від рельєфу і тиску вод                               | Визначає напрям міграції забруднювачів; при високій швидкості – ризик швидкого забруднення джерел водозабору  |
| 4 | Рівень вологості ґрунту / насичення            | Тимчасове перезволоження, підтоплення, постійно вологі ділянки | У вологому ґрунті забруднювачі розчиняються та активніше потрапляють у воду або рослини                       |
| 5 | Режим ґрунтових вод                            | Сезонні коливання, паводкові явища, зниження/підняття рівня    | Під час підйому рівня відбувається переміщення забруднювачів у водоносний шар або їх винос на поверхню        |
| 6 | Наявність поблизу відкритих водойм             | Річки, озера, ставки, водосховища, канали                      | При попаданні боєприпасів у воду – миттєве поширення забруднювачів, зростання ризику отруєнь через питну воду |
| 7 | Густота водної мережі                          | Щільність розгалуження річок, струмків, каналів                | Збільшує площу рознесення токсичних речовин, забруднення великих територій                                    |
| 8 | Використання водойм для питного водопостачання | Водозабори, колодязі, свердловини поблизу водойм               | Прямий шлях надходження забруднювачів у організм – ризик отруєнь                                              |

Небезпеку становлять території з неглибоким заляганням водоносного горизонту (до 5–10 м), високим рівнем ґрунтових вод, відсутністю природного захисту (глини, суглинків). У таких умовах забруднювачі швидко потрапляють у питні джерела, спричиняючи субгостру дію через воду ( $T_{1-2}$ ). Загрозу становлять наявність відкритих водойм, паводкових потоків, затоплюваних територій, які прискорюють горизонтальне перенесення забруднювачів. Це підвищує ризик потрапляння забруднених речовин до поверхневих і підземних вод – формує умови ( $T_{1-2}$ ).

Вплив метеорологічних умов на швидкість, масштаб і напрямок поширення забруднення, а також на прояв фізіологічної дії для населення внаслідок забруднення ґрунтів та ґрунтових вод важливий у перші години–дні після обстрілів або вибухів (табл. 4).

Таблиця 4 – Вплив метеорологічних умов на характер небезпеки.

| № | Метеорологічні фактори | Характер впливу                                                                                                                                                            |
|---|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Інтенсивність опадів   | Опади сприяють розчиненню і міграції токсикантів у ґрунт і водоносні горизонти; зростає ризик для водозабору                                                               |
| 2 | Температура повітря    | Висока активізує леткі та газоподібні токсиканти (фосфор, продукти горіння), зростає інгаляційне ураження; низька – сповільнення біологічних і хімічних процесів, часткова |

| № | Метеорологічні фактори           | Характер впливу                                                                                                        |
|---|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                  | консервація забруднення у ґрунті                                                                                       |
| 3 | Напрямок і швидкість вітру       | Поширення аерозолів, газів, пилу з забруднювачами на значні відстані                                                   |
| 4 | Вологість повітря                | Висока – підвищує швидкість хімічного розкладу речовин, але погіршує дисперсію в повітрі                               |
| 5 | Сонячна інсоляція (ультрафіолет) | Може активувати розклад деяких забруднювачів, але пришвидшує фотоактивацію деяких агресивних сполук                    |
| 6 | Тривалість посушливого періоду   | Зменшує промивання токсикантів – накопичення в поверхневому шарі ґрунту – небезпека при контакті чи вживанні           |
| 7 | Атмосферний тиск                 | Впливає на утримання токсичних газів у приземному шарі повітря                                                         |
| 8 | Сезон року                       | Весна – танення снігу, масове просочування; літо – висока температура і пил; зима – акумуляція речовин у мерзлому шарі |

Небезпеку становлять періоди сильних опадів, високих температур. Зливи сприяють інфільтрації токсикантів у ґрунт і воду, а спека і вітер – випаровуванню та поширенню токсичних парів або пилу. Це створює передумови для субгострої дії ( $T_{1-2}$ ).

Цільове призначення земель визначає інтенсивність контакту населення з потенційно забрудненими об'єктами (вода, ґрунт, продукти харчування), режим використання території (постійне перебування чи тимчасове відвідування), чутливість середовища до перенесення токсикантів. Нижче наведено таблицю, що узагальнює вплив кожної категорії цільового призначення земель (табл. 5, 5.1).

Таблиця 5 – Вплив цільового призначення земель на поширення небезпеки.

| №  | Цільове призначення земель                                   | Характер впливу                                                                              |
|----|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Сільськогосподарського призначення                           | Потрапляння токсикантів у продукти харчування – біоаккумуляція                               |
| 2  | Житлова та громадська забудова                               | Контакт із забрудненим ґрунтом, питною водою, повітрям; ймовірність масового ураження        |
| 3  | Природно-заповідного та іншого природоохоронного призначення | Обмежений доступ – менша пряма дія, але забруднення біоценозів, водних тіл – вторинний ризик |
| 4  | Оздоровчого призначення (санаторії, курорти)                 | Висока чутливість груп населення, потенційно забруднені вода/ґрунт для оздоровчих процедур   |
| 5  | Рекреаційного призначення (парки, пляжі, туризм)             | Короткочасний контакт, але можливий інгаляційний, контактний чи водний шлях                  |
| 6  | Історико-культурного призначення (пам'ятки, заповідники)     | Обмежений контакт, але ризик для персоналу чи туристів у разі невиявленого забруднення       |
| 7  | Лісгосподарського призначення                                | Надходження забруднювачів у харчовий ланцюг, ризик біоаккумуляції                            |
| 8  | Водного фонду                                                | Високий ризик забруднення питної води                                                        |
| 9  | Промисловості, транспорту, зв'язку, енергетики, оборони      | Низький прямий контакт із населенням, але ризик технологічного ланцюга                       |
| 10 | Землі запасу, резервного фонду, загального користування      | Сценарій залежить від подальшого використання (наприклад, забудова або землеробство)         |

Таблиця 5.1 – Узагальнення за групами впливу цільового призначення земель на поширення небезпеки.

| № | Тип земель                            | Характер впливу                                        | Тип прояву фізіологічної дії |
|---|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1 | Продуктивні (с/г, лісові)             | Біоаккумуляція в продуктах / природній біомасі         | $T_{2-3}$                    |
| 2 | Житлові території                     | Контакт з водою, повітрям, ґрунтом                     | $T_{1-2}, T_{2-3}$           |
| 3 | Водні об'єкти                         | Найшвидший шлях отруєння через питну воду              | $T_{1-2}$                    |
| 4 | Оздоровчі та рекреаційні зони         | Вразливість груп та ризик забруднення середовищ        | $T_{1-2}, T_{2-3}$           |
| 5 | Інфраструктурні та обмеженого доступу | Можливість вторинного ураження через виробничі ланцюги | $T_{2-3}$                    |

Високу небезпеку становлять сільськогосподарські землі, де токсиканти потрапляють у продукти харчування ( $T_{2-3}$ ), та водні об'єкти – джерела питної води ( $T_{1-2}$ ). Також небезпечними є населені території. В таких умовах можливі всі типи прояву фізіологічної дії.

Критична інфраструктура (КІ) не лише вразлива до ураження, але й може перетворитись на джерело вторинного забруднення, що впливає на великі групи населення одночасно. Найнебезпечніші об'єкти – ті, що мають безпосередній контакт із питною водою, харчовими продуктами.

Наявність КІ значно підсилює швидкість та масштаб прояву фізіологічної небезпеки забруднення ґрунтів та ґрунтових вод після ракетно-артилерійських уражень (табл. 6). Це зумовлено високою концентрацією людей, високим ризиком технологічного ускладнення (вторинного забруднення), життєвою залежністю від води.

Таблиця 6 – Вплив типу об'єктів критичної інфраструктури на поширення небезпеки.

| № | Тип об'єкта КІ                                | Характер впливу                                                                                                                |
|---|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Об'єкти водопостачання та водовідведення      | Потрапляння забруднювачів у питну воду або стоки – пряма загроза здоров'ю населення                                            |
| 2 | Об'єкти енергетики та паливної інфраструктури | Розливи, вибухи, проникнення ПММ у водоносні горизонти або ґрунти – забруднення з відстроченими або хронічними наслідками      |
| 3 | Медичні та соціальні установи                 | Високочутливі групи – підвищена загроза навіть при мінімальних концентраціях токсикантів, можливе поширення вторинних інфекцій |
| 4 | Об'єкти зберігання небезпечних речовин        | Вибухи, витоки – масштабне первинне та вторинне забруднення повітря, ґрунтів і вод                                             |
| 5 | Об'єкти харчового забезпечення                | Контамінація продуктів харчування – відстрочені або пролонговані ефекти при споживанні                                         |
| 6 | Логістичні та транспортні вузли               | Поширення забруднених матеріалів, витоки токсичних речовин під час транспортування                                             |
| 7 | Об'єкти управління, зв'язку та ППО            | Опосередкований вплив: зниження здатності до реагування, що призводить до посилення наслідків НС                               |

Ураження водозаборів, складів ПММ чи хімікатів спричиняє масове, іноді миттєве потрапляння токсикантів у тіло людини. Це формує переважно субгостру дію ( $T_{1-2}$ ).

Вразливість населення підвищує швидкість прояву наслідків ураження, оскільки знижує бар'єри захисту організму та соціальні можливості уникнення впливу. Тому навіть при однаковому хімічному навантаженні різні групи населення мають різну швидкість фізіологічної реакції (табл. 7).

Таблиця 7 – Вплив вразливості населення на поширення небезпеки.

| № | Компонент вразливості населення | Характеристика                                                             | Характер впливу                                                           |
|---|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Вік                             | Діти, літні люди                                                           | Знижена здатність до детоксикації, швидке накопичення токсинів            |
| 2 | Стан здоров'я                   | Ослаблений імунітет                                                        | Висока сприйнятливості до хімічних та мікробіологічних агентів            |
| 3 | Доступ до медичних послуг       | Віддаленість, відсутність закладів, нестача персоналу                      | Ускладнення вчасної діагностики та лікування, підвищення тяжкості отруєнь |
| 4 | Рівень поінформованості         | Незнання про небезпеку, споживання забрудненої води / продуктів харчування | Відсутність уникнення контакту, відсутній самозахист                      |

У групах із високою вразливістю (діти, хворі, соціально незахищені) навіть невелике забруднення може призвести до субгострих фізіологічних ефектів ( $T_{1-2}$ ) – отруєння, алергії, загострення хвороб.

У більш стійких групах (здорові дорослі з доступом до чистої води та інформації) той самий рівень забруднення може мати лише пролонговану дію ( $T_{2-3}$ ).

#### **Висновки.**

1. З огляду на комплексність складу забруднювачів, їх комбіновану та синергетичну взаємодію, а також непередбачувані сценарії розвитку надзвичайних ситуацій, доцільно інтегрувати класифікацію проявів в уніфіковану дворівневу модель.

Запропоновано виділяти два типи прояву фізіологічної дії: субгострий ( $T_{1-2}$ ) – характерний для забруднення питної води з коротким латентним періодом симптоматики, та пролонгований ( $T_{2-3}$ ) – типово пов'язаний із ґрунтовим шляхом надходження та харчовою експозицією, що зумовлює накопичувальну дію на організм. Такий підхід дозволяє узгодити прояв фізіологічних наслідків небезпеки забруднення на здоров'я населення з управлінськими потребами, формуючи підґрунтя для адаптивної методології управління надзвичайними ситуаціями на уражених територіях.

2. Оточуюче середовище впливає на поширення небезпеки ураження ракетно-артилерійськими системами. Основними факторами впливу є воєнне навантаження, геологічні, гідрогеологічні, метеорологічні умови, тип земель, об'єктів критичної інфраструктури та компоненти вразливості населення.

Воєнне навантаження значною мірою впливає на хімічний профіль забруднення, його масштаб, глибину проникнення токсикантів у екосистему та інтенсивність їхнього впливу на здоров'я населення.

Геологічні, гідрогеологічні та метеорологічні умови модифікують траєкторії міграції забруднювачів, їх концентрацію і тривалість дії, визначаючи тип фізіологічної реакції уражених осіб. Особливо небезпечними є території з високою проникністю ґрунтів, неглибоким заляганням водоносних горизонтів, а також періоди інтенсивних опадів і високих температур.

Цільове призначення земель, сільськогосподарські угіддя та водні об'єкти, а також наявність критичної інфраструктури, підсилюють ризики швидкого та масштабного прояву фізіологічної небезпеки. Вразливість населення, що залежить від віку, стану здоров'я, доступу до медичних послуг та рівня поінформованості, впливає на швидкість і тяжкість прояву наслідків забруднення.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Рашкевич Н. В. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій пов'язаних з небезпекою ґрунтових вод / Рашкевич Н. В., Мирошник О. М., Шевченко Р. І. // Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація, 2023. – Т. 7. – № 2. – С. 193–216. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.193.216>
2. Рашкевич Н. В. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій на територіях України, які зазнали ракетно-артилерійських уражень / Рашкевич Н. В. // Комунальне господарство міст, 2023. – Т. 4. – Вип. 178. – С. 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>
3. Рашкевич Н. В. Визначення основних джерел забруднення ґрунтів та водних ресурсів під час військових конфліктів: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations». Черкаси: НУЦЗ України, 2025. – С. 119–120.
4. Al-Hashimi, O. et al. (2021). A comprehensive review for groundwater contamination and remediation: occurrence, migration and adsorption modelling. *Molecules*, 26(19), 5913.
5. Le, V. A. et al. (2024). Machine Learning Algorithms to Assess Site Closure Time Frames for Soil and Groundwater Contamination. *arXiv preprint arXiv:2411.10214*.
6. Kayastha, V. et al. (2022). New Insights in factors affecting ground water quality with focus on health risk assessment and remediation techniques. *Environmental Research*, 212, 113171.
7. Jain, H. (2023). Groundwater vulnerability and risk mitigation: a comprehensive review of the techniques and applications. *Groundwater for Sustainable Development*, 22, 100968.
8. Economou-Eliopoulos, M., & Megremi, I. (2021). Contamination of the soil–groundwater–crop system: Environmental risk and opportunities. *Minerals*, 11(7), 775.
9. Fajčíková, K. et al. (2014). Health risk estimates for groundwater and soil contamination in the Slovak Republic: a convenient tool for identification and mapping of risk areas. *Environmental Geochemistry and Health*, 36, 973–986.
10. Münzel, T. et al. (2023). Soil and water pollution and human health: what should cardiologists worry about? *Cardiovascular Research*, 119(2), 440–449.
11. Рашкевич Н. В., Лобойченко В. М., Шевченко Р. І. Мінімізація наслідків екологічної небезпеки території, внаслідок їх вогневого ураження боєприпасами: матеріали І Міжнародна науково-практична конференція «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022». – Полтава, 26 – 27 травня 2022 р. – С. 113–116.
12. Бондаренко А. Ю., Рашкевич Н.В., Лобойченко В. М., Шевченко Р.І. Інноваційні підходи в попередженні надзвичайних ситуацій, пов'язаних із забрудненням водних об'єктів населених пунктів, де відбувались бойові дії: матеріали І Міжнародна науково-практична конференція «Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій - 2022». – Полтава, 26 – 27 травня 2022 р. – С. 500–502.
13. Рашкевич Н. В. Фактори впливу на розподіл важких металів у ґрунтовому середовищі: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations». – Харків: НУЦЗ України, 2022 р. – С. 217–218.
14. Рашкевич Н. В., Шевченко Р. І., Ребров О. В. Обґрунтування процедур з оптимізації відбору проб ґрунту з метою попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations». – Харків: НУЦЗ України, 2024 р. – С. 93–94.
15. Рашкевич Н. В., Бондаренко А. Ю. Розгляд умов існування математичної моделі аналізу небезпечного впливу ракетно-артилерійських уражень на стан ґрунтових вод: матеріали XVIII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Екологічна безпека держави», 2023. – С. 33–35.
16. Наказ від 23.07.2010 № 548 «Про затвердження Класифікації видів цільового призначення земель». Розробник. Державний комітет України по земельних ресурсах.
17. Горбатенко В. Метод Делфі та специфіка його застосування у прогностичних розробках / Горбатенко В., Петренко І. // Політичний менеджмент, 2008. – Вип. 6. – С. 174–182.

18. Hasson, F., Keeney, S., McKenna, H. (2025). Revisiting the Delphi technique-Research thinking and practice: A discussion paper. *International Journal of Nursing Studies*, 105119.
19. Vogel, C., Zwolinsky, S., Griffiths, C., Hobbs, M., Henderson, E., Wilkins, E. (2019). A Delphi study to build consensus on the definition and use of big data in obesity research. *International journal of obesity*, 43(12), 2573–2586.

## REFERENCES

1. Rashkevich N. V., Myroshnyk O. M., Shevchenko R. I. Analiz suchasnoho stanu poperedzhennya nadzvychaynykh sytuatsiy, pov"yazanykh z nebezpekoyu gruntovykh vod. Nadzvychayni sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya. 2023. T. 7. № 2. 193–216. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.193.216>
2. Rashkevich N. V. Analiz suchasnoho stanu poperedzhennya nadzvychaynykh sytuatsiy na terytoriyi Ukrainy, yaki zaznaly raketno-artyleryys'kykh urazhen'. Komunal'ne hospodarstvo mist. 2023. 4. 178. 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>
3. Rashkevych N. V. Vyznachennya osnovnykh dzherel zabrudnennya obgruntuvan' ta vodnykh resursiv pid chas viys'kovykh konfliktiv: materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy». Cherkasy: NUTSZ Ukrainy. 2025. 119–120.
4. Al-Hashimi, O. et al. (2021). A comprehensive review for groundwater contamination and remediation: occurrence, migration and adsorption modelling. *Molecules*, 26(19), 5913.
5. Le, V. A. et al. (2024). Machine Learning Algorithms to Assess Site Closure Time Frames for Soil and Groundwater Contamination. *arXiv preprint arXiv:2411.10214*.
6. Kayastha, V. et al. (2022). New Insights in factors affecting ground water quality with focus on health risk assessment and remediation techniques. *Environmental Research*, 212, 113171.
7. Jain, H. (2023). Groundwater vulnerability and risk mitigation: a comprehensive review of the techniques and applications. *Groundwater for Sustainable Development*, 22, 100968.
8. Economou-Eliopoulos, M., & Megremi, I. (2021). Contamination of the soil–groundwater–crop system: Environmental risk and opportunities. *Minerals*, 11(7), 775.
9. Fajčíková, K. et al. (2014). Health risk estimates for groundwater and soil contamination in the Slovak Republic: a convenient tool for identification and mapping of risk areas. *Environmental Geochemistry and Health*, 36, 973–986.
10. Münzel, T. et al. (2023). Soil and water pollution and human health: what should cardiologists worry about? *Cardiovascular Research*, 119(2), 440–449.
11. Rashkevich N. V., Loboichenko V. M., Shevchenko R. I. Minimizatsiya naslidkiv ekolohichnoyi nebezpeky terytoriyi, vnaslidok yikh vohnevoho utvorenniya boyeprypamy: materialy I Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Podolannya ekolohichnykh ryzykiv ta zahroz dlya dovkillya v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy – 2022. Poltava, 26 – 27 travnya 2022 r. 113–116.
12. Bondarenko A. Yu., Rashkevich N. V., Loboichenko V. M., Shevchenko R. I. Innovatsiyini pidkhody v poperedzhenni nadzvychaynykh sytuatsiy, pov"yazanykh iz zabrudnenniam vodnykh ob"yektiv naselenykh punktiv, de vidbuvalysya boyovi diyi: materialy I Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Podolannya ekolohichnykh ryzykiv ta zahrozy dlya dovkillya v umovakh nadzvychaynykh sytuatsiy - 2022». Poltava, 26 – 27 travnya 2022. 500–502.
13. Rashkevich N. V. Faktory vplyvu na rozpodil vazhkykh metaliv u obgruntovanomu seredovyschi: materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy». Kharkiv: NUTSZ Ukrainy, 2022. 217–218.
14. Rashkevich N. V., Shevchenko R. I., Rebrov O. V. Obgruntuvannya protsedury optymizatsiyi vidboru prob obgruntuvannya pryznachennya pereduvannya nadzvychaynykh sytuatsiy tekhnohennoho kharakteru: materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy». Kharkiv: NUTSZ Ukrainy, 2024. S. 93–94.
15. Rashkevich N. V., Bondarenko A. Yu. Rozhlyad umov vstanovlennya matematychnoyi modeli analizu nebezpechnoho vplyvu raketno-artyleryys'kykh urazhen' na stan obgruntovanykh vod:

materialy KHVIII Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh ta studentiv «Ekolohichna bezpeka derzhavy», 2023. 33–35.

16. Nakaz vid 23.07.2010 № 548 «Pro zatverdzhennya Kласyfikatsiyi vydiv tsil'ovoho pryznachennya zemel'». Rozrobnyk. Derzhavnyy komitet Ukrayiny po zemel'nykh resursakh.

17. Horbatenko V. Petrenko I. Metod Delfi ta spetsyfika yoho zastosuvannya u prohnosnykh rozrobkakh. Politychnyy menedzhment. 2008. 6. 174–182.

18. Hasson, F., Keeney, S., McKenna, H. (2025). Revisiting the Delphi technique-Research thinking and practice: A discussion paper. International Journal of Nursing Studies, 105119.

19. Vogel, C., Zwolinsky, S., Griffiths, C., Hobbs, M., Henderson, E., Wilkins, E. (2019). A Delphi study to build consensus on the definition and use of big data in obesity research. International journal of obesity, 43(12), 2573–2586.

**Nina RASHKEVICH** PhD (ORCID: 0000-0001-5124-6068)

**Ivan RUSHCHAK** (ORCID: 0009-0005-6654-7863)

*National University of Civil Defence of Ukraine*

## **STUDY OF FACTORS OF PHYSIOLOGICAL EFFECTS OF SOIL AND WATER POLLUTION ON HUMANS IN COMBAT-AFFECTED AREAS**

*This study investigates the physiological impact of hazards caused by soil and groundwater contamination in areas affected by rocket and artillery system (RAS) strikes. The relevance of the problem lies in the complex composition of toxic substances released into the environment during military operations and the unpredictability of emergency development scenarios under such conditions. To unify approaches to health risk assessment, a classification of physiological response types is proposed based on the exposure pathway of hazardous substances and the onset time of clinical effects.*

*Two main types of physiological impact are identified: subacute ( $T_{1-2}$ ), primarily resulting from the consumption of contaminated drinking water, and prolonged ( $T_{2-3}$ ), associated with long-term contact with polluted soil and food exposure. This distinction enhances the integration of physiological effects into emergency management methodologies. The analysis also accounts for typical toxicant interactions in combat-related contamination: combined, synergistic, and antagonistic effects.*

*Particular attention is given to the role of environmental factors – such as military load, geological, hydrogeological, meteorological conditions, land use type, and the presence of critical infrastructure – in shaping the pathways of contaminant migration and the manifestation of physiological hazards. High soil permeability, shallow aquifers, and intense precipitation periods are highlighted as key contributors to the rapid transport of toxicants into human living environments. Additionally, population vulnerability – determined by age, health status, access to medical services, and awareness – further modifies the level of risk.*

*The findings of this research provide a scientific foundation for developing a differentiated emergency management system aimed at preventing toxicant exposure, protecting public health, and mitigating the long-term consequences of environmental contamination caused by military strikes.*

**Keywords:** hazard, rocket and artillery impacts, physiological effect, soil contamination, groundwater contamination