
Scientific and technical journal
«Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

УДК 614.8

УПРАВЛІННЯ ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ ЗАБРУДНЕНИХ ТЕРИТОРІЙ У РАЗІ РУЙНУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ**Н. В. Рашкевич**

PhD, доцент

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5124-6068>Національний університет цивільного захисту України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, Україна**О. Г. Панченко**ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7727-3035>Національна академія Національної гвардії України
майдан Захисників України, 3, м. Харків, 61001, Україна**О. С. Рашкевич**

кандидат технічних наук

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4374-4602>3-й ДІПРЗ Головного управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Харківській області
вул. Кандаурова, 47, м. Харків, 61093, Україна**Л. І. Андрєєва**ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9992-0070>Національний університет цивільного захисту України
вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, 18034, УкраїнаDOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.2>

Отримано: 27 січня 2026

Прийнято: 29 травня 2026

Опубліковано: 30 травня 2026

Цитувати як: Рашкевич Н. В., Панченко О. Г., Рашкевич О. С., Андрєєва Л. І. Управління техногенно-екологічною безпекою забруднених територій у разі руйнування об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану. *Техногенно-екологічна безпека*. 2026. Вип. 19(1/2026). С. 11–20. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.2>

Ліцензія відкритого доступу: Creative Commons Attribution 4.0 International License

Анотація. У роботі запропоновано підхід до управління техногенно-екологічною безпекою територій, що опинилися під впливом бойових дій і зазнали руйнування критичної інфраструктури. Дослідження базується на аналізі динаміки розвитку аварійних процесів, які зумовлюють швидкі зміни умов пошкодження, вторинні руйнування та обмежені можливості реагування. Встановлено, що часові параметри виявлення аварії, прийняття рішень і початку активних дій безпосередньо впливають на ефективність стабілізації ситуації, а скорочення часового резерву потребує використання автономних і адаптивних систем моніторингу та реагування.

У роботі розглядається розроблена модель із дворівневою структурою. Перший рівень описує розвиток небезпечних процесів у довкіллі, що передбачає таку послідовність: формування джерела викиду, перенесення речовин у повітряному, ґрунтовому та водному середовищах, прояв екологічного ризику та визначення його ступеня. Другий рівень структури моделі реалізує задачу оптимального управління відповідно до сформованої інформаційної основи, отриманої за даними безпілотних літальних апаратів та технічних вимірювань. Такий підхід забезпечує локалізацію небезпек і своєчасну мінімізацію наслідків аварії шляхом вибору оптимальних керуючих дій.

Для оцінки ризику неконтрольованого поширення забруднення у межах моделі введено критичні моменти часу, які визначають ефективність управлінських рішень, та залишковий час реагування. Враховано вплив воєнних дій на часові параметри процесів, які призводять до розвитку небезпечних ситуацій, обмеження доступу персоналу та деградації ресурсів. Відповідно до отриманої інформаційної основи формуються автономні цифрові платформи підтримки прийняття рішень.

Запропонований підхід дозволяє прогнозувати розвиток аварій, координувати дії з реагування та оцінювати наслідки як інтегральний ефект впливу на довкілля, що дає змогу зменшити ризик реалізації критичних небезпек в умовах воєнного стану.

Ключові слова: джерела безпеки, аварійна ситуація, заходи зниження ризиків, система управління, забруднення, небезпечні речовини, ризик.

Постановка проблеми

В умовах воєнного стану руйнування об'єктів критичної інфраструктури призводить до викиду небезпечних речовин в атмосферу, ґрунт і водні об'єкти, формуючи складну просторово-часову динаміку забруднення та високий рівень техногенно-екологічної небезпеки.

Аварії на об'єктах супроводжуються швидкими змінами умов пошкодження, обмеженими ресурсами для реагування та ризиком вторинних руйнувань. У таких умовах традиційні методи моніторингу та управління безпекою не забезпечують своєчасного реагування через часові обмеження, обмежений

доступ до об'єктів та змінність умов навколишнього середовища.

Таким чином, виникає необхідність у розробці підходу, що дозволяє прогнозувати розвиток аварій, відстежувати поширення забруднення та координувати управлінські рішення з урахуванням ресурсних, часових і технічних обмежень в умовах воєнного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові дослідження у сфері техногенно-екологічної безпеки охоплюють підходи до аналізу небезпек, оцінювання ризиків і розроблення управлінських рішень для складних аварійних ситуацій. У роботах цього напрямку значну увагу приділено ідентифікації загроз на об'єктах критичної інфраструктури, їх систематизації та встановленню механізмів впливу на безпеку територій. Запропоновані класифікації загроз і підходи до їх оцінювання формують основу для побудови моделей управління ризиками та підтримки прийняття управлінських рішень [1].

Окремий напрям досліджень пов'язаний з оцінюванням екологічної ситуації у разі аварій на інфраструктурних об'єктах, зокрема транспортних. У таких роботах застосовуються моделі просторово-часового поширення забруднень, аналізуються рівні впливу на компоненти довкілля та обґрунтовуються підходи до мінімізації негативних наслідків аварій. Це підтверджує доцільність поєднання польових даних і математичного моделювання для оперативного управління екологічними ризиками [2].

У роботі [3] визначаються фактори уразливості енергетичних систем, моделюються сценарії відмов та аварій, а також оцінюються потенційні наслідки для населення і навколишнього середовища. Отримані результати підтверджують необхідність системного підходу до управління ризиками на рівні критичних об'єктів.

Важливим напрямом є дослідження, орієнтовані на аналіз управління техногенно-екологічною безпекою з позицій нормативного та методичного забезпечення. У цих роботах розглянуто чинні стандарти, методики оцінювання ризиків і особливості їх практичного застосування, що дає змогу узгодити фізичні процеси розвитку аварійних ситуацій з управлінськими рішеннями [4].

Окремий масив наукових праць присвячено аналізу надзвичайних ситуацій, спричинених воєнними впливами, зокрема ракетно-артилерійськими ураженнями. У таких дослідженнях розглянуто види надзвичайних ситуацій, що виникають унаслідок руйнувань під час воєнних дій, часові характеристики їх розвитку, зміни стану об'єктів критичної інфраструктури та ефективність заходів попередження [5,6].

У роботах [7–9] оцінювання ризиків поширено на компоненти природного середовища, зокрема ґрунти, ґрунтові води та медико-біологічні фактори. Запропоновані методичні підходи ґрунтуються на формуванні функціональних та інформаційних полів моніторингу із залученням лазерних і сенсорних систем, що забезпечує своєчасне виявлення

небезпечних змін і підвищує ефективність попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Застосування таких інформаційно-технічних методів у зоні бойових дій підтверджує доцільність інтегрованого спостереження за станом довкілля та об'єктів критичної інфраструктури в реальному часі.

Питання радіаційної безпеки розглянуто в дослідженнях, присвячених моделюванню поширення радіаційного забруднення та оцінюванню дозового навантаження на населення і персонал. Запропоновані підходи дають змогу кількісно оцінювати потенційні наслідки аварій та обґрунтовувати необхідні захисні заходи [10].

Подальший розвиток підходів до дослідження наслідків забруднення ґрунтів і ґрунтових вод у районах, уражених ракетно-артилерійськими ударами, а також процедур геопросторового профілювання територій потенційного радіаційного забруднення подано у вигляді моделей оцінювання небезпек і ризиків [11,12]. Використання таких моделей забезпечує формування деталізованих карт небезпечних зон і створює основу для прогнозування просторово-часового поширення забруднювальних речовин.

У роботах окремих дослідників запропоновано поєднання польових спостережень, картографування забруднень та інтеграції показників впливу на довкілля [13]. Інтегральне врахування наслідків руйнувань може забезпечуватися, зокрема, використанням байесівських мереж для аналізу надзвичайних ситуацій. Це дає змогу поєднувати експертні оцінки з даними моніторингу, оцінювати ймовірності розвитку аварійних сценаріїв та адаптивно оновлювати результати у міру надходження нової інформації [14].

У дослідженнях, присвячених математичному опису загроз для об'єктів критичної інфраструктури у зоні бойових дій, запропоновано підходи до кількісного оцінювання рівня безпеки з урахуванням зовнішніх впливів і технічного стану захисних систем [15]. Такий підхід забезпечує прогнозування еволюції аварійних процесів і дозволяє обґрунтовувати пріоритети заходів щодо зниження ризиків та підвищення стійкості критичної інфраструктури.

Дослідження щодо оцінювання наслідків бойових уражень проводилися з урахуванням особливостей окремих регіонів, аналізу факторів безпеки та ризиків виникнення надзвичайних ситуацій. Окрім фізичних процесів, увага приділялася організації реагування, функціонуванню систем моніторингу та координації дій відповідних служб, що дозволяє оцінювати готовність територій до надзвичайних подій [18].

Оцінювання техногенних ризиків, пов'язаних із викидами небезпечних речовин, проводилося на основі методичних підходів до прогнозування концентрацій забруднювальних речовин, визначення зон впливу та розрахунку інтегрального ризику для населення і довкілля [19]. Такі методи забезпечують кількісну основу для прийняття рішень щодо захисту населення та мінімізації екологічних наслідків.

Методики оцінки загроз і ризиків для критичної інфраструктури, що базуються на експертних оцінках і сценарному аналізі, дозволяють моделювати різні сценарії розвитку аварійних ситуацій, оцінювати їх імовірність і наслідки, а також визначати оптимальні управлінські рішення, спрямовані на зниження техногенно-екологічного ризику та підвищення стійкості критичних об'єктів [20, 21].

У наукових працях набувають розвитку цифрові та інтегровані підходи до аналізу техногенно-екологічних ризиків. У таких дослідженнях пріоритетна увага спрямована на визначення та оцінювання масштабів поширення забруднювальних речовин у межах цифрового двійника об'єкта критичної інфраструктури [23]. Запропонований підхід забезпечує моделювання динаміки забруднення в реальному часі, прогнозування концентрацій небезпечних факторів у просторі та часі, а також оцінювання ефективності захисних заходів.

У систематичному огляді методів інтегрованої оцінки безпеки та кіберзахисту об'єктів критичної інформаційної інфраструктури обґрунтовано доцільність поєднання технічних, соціальних та організаційних складових безпеки в єдину аналітичну схему [24].

У дослідженнях щодо оцінювання ризиків кіберфізичних систем на прикладі хімічних підприємств увага приділяється взаємодії цифрових і фізичних компонентів виробничих процесів. Запропоновані підходи дають змогу прогнозувати наслідки порушень технологічних режимів і потенційних кібервпливів з урахуванням їхнього комплексного впливу на екологічну безпеку та стійкість об'єктів [25].

Результати оцінювання глобальних природних і техногенних катастроф із погляду їхніх соціально-економічних наслідків використовуються для стратегічного планування, визначення пріоритетів розподілу ресурсів і прогнозування масштабів впливу аварійних ситуацій на різні рівні соціально-економічних систем [26].

У роботі [27] виконано ідентифікацію критичних секторів інфраструктури та аналіз їхніх взаємозалежностей на національному рівні. Такий підхід створює основу для прогнозування каскадних ефектів, формування систем стійкого реагування та визначення пріоритетних об'єктів, які потребують першочергового захисту в умовах надзвичайних ситуацій.

Методи оцінювання аварійного ризику та обґрунтування заходів ліквідації забруднення підземних вод із використанням сучасних телекомунікаційних технологій розглянуто у дослідженні [28]. Застосування мереж 5G забезпечує оперативний збір даних про стан ґрунтових вод, аналіз динаміки забруднення в реальному часі та оцінювання ефективності заходів реагування, що суттєво підвищує швидкість і обґрунтованість управлінських рішень.

За результатами аналізу визначено, що сучасні підходи до оцінювання техногенно-екологічної безпеки базуються на математичному моделюванні, системному аналізі фізичних процесів і управлінських

рішень, використанні цифрових платформ та сенсорних мереж для моніторингу, а також застосуванні експертних оцінок і сценарного прогнозування.

Постановка завдання та його вирішення

Мета дослідження – розробити підхід до управління техногенно-екологічною безпекою забруднених територій у разі руйнування об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану, що забезпечить прогнозування розвитку аварій та оптимізацію заходів реагування для мінімізації наслідків небезпеки.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

– проаналізувати хронологію та динаміку розвитку техногенно-екологічної небезпеки на забруднених територіях у разі руйнування об'єктів критичної інфраструктури;

– розробити математичну модель управління техногенно-екологічною безпекою забруднених територій у разі руйнування об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану.

У дослідженні застосовано аналітичні та математичні моделі для опису просторово-часової динаміки небезпечних факторів, імовірнісні та статистичні підходи для оцінки ризиків і невизначеностей, системні та сценарні методи для інтеграції фізичних процесів і управлінських рішень, оптимізаційні та інформаційно-технічні засоби для оцінки ефективності реагування та моніторингу.

Аналіз хронології та динаміки розвитку техногенно-екологічної небезпеки на забруднених територіях у разі руйнування об'єктів критичної інфраструктури.

Пошкодження об'єктів критичної інфраструктури внаслідок вибухів, артилерійських обстрілів, пожеж або тривалих енергетичних відключень може призводити до втрати контролю над небезпечними фізичними, хімічними та радіаційними процесами. У результаті може виникнути надзвичайна ситуація техногенного характеру з потенційним міжрегіональним або транскордонним впливом. Хронологія розвитку таких ситуацій визначається масштабом руйнувань, функціональним станом систем безпеки, гідрометеорологічними умовами, а також оперативністю та узгодженістю реагування. Аналіз часової динаміки дозволяє виділити етапи, на яких швидкість поширення небезпечних факторів і втрата керованості процесами починають визначати подальший сценарій розвитку аварії.

Воєнні дії формують комплекс механізмів ініціювання аварійних процесів на об'єктах критичної інфраструктури, зокрема:

– механічне руйнування будівельних конструкцій і технологічного обладнання під дією ударних навантажень, вибухових хвиль та осколкових уражень, що призводить до порушення цілісності захисних бар'єрів і резервуарів;

– відмови систем електропостачання, охолодження та вентиляції, які забезпечують підтримання безпечних режимів функціонування технологічних процесів;

– пожежі та вторинні вибухи на суміжних об'єктах, здатні викликати локальне або масштабне підвищення температури та прискорену деградацію матеріалів і елементів конструкцій;

– пошкодження інженерних мереж і каналів зв'язку, що унеможливує повноцінну роботу систем моніторингу, диспетчеризації та управління аварійним реагуванням;

– вторинне забруднення територій унаслідок потрапляння небезпечних речовин у ґрунт, поверхневі та ґрунтові води або атмосферу після руйнування ізоляційних бар'єрів.

Просторово-часовий розвиток техногенно-екологічної безпеки визначається поєднанням процесів атмосферного перенесення, інфільтрації у ґрунтовий масив і міграції забруднювальних речовин у водоносних горизонтах, що формує складну тривимірну структуру забруднення з локальними зонами підвищеної концентрації та підвищеного ризику для населення й довкілля.

Сукупність зазначених процесів формує багатостадійну структуру розвитку техногенно-екологічної безпеки на об'єктах критичної інфраструктури, яку пропонується розглядати як логічну послідовність часових фаз:

- t_0 – момент виникнення аварійної події;
- t_{det} – час виявлення аварії;
- t_{com} – час ухвалення управлінського рішення;
- t_{mob} – час мобілізації ресурсів;
- t_{act} – час фактичного початку активних дій;
- t_{thr} – час досягнення критичного рівня небезпечного впливу;

– t_{stb} – час стабілізації ситуації.

Фаза I – виникнення події.

Початок аварійного процесу зумовлений прямим воєнним впливом на об'єкт критичної інфраструктури: вибухом, ударним навантаженням, осколковим ураженням або пожежою. У цей момент (t_0) формується первинне пошкодження будівельних конструкцій, технологічного обладнання чи інженерних систем, що створює умови для виникнення джерела небезпечного впливу (радіаційного, хімічного, теплового або комбінованого).

Фаза II – втрати функцій безпеки.

У часовому інтервалі $[t_0, t_{det}]$ відбувається руйнування або повна відмова систем безпеки: порушення герметичності технологічних контурів, відключення електропостачання, зупинка систем охолодження, вентиляції чи очищення, а також втрата працездатності каналів моніторингу. Тривалість цієї фази визначає швидкість переходу аварійного процесу у некерований стан.

Фаза III – виявлення та первинна оцінка події.

На інтервалі $[t_{det}, t_{com}]$ аварійна подія фіксується системами автоматичного контролю або персоналом за рахунок перевищення гранично допустимих параметрів (температури, тиску, концентрацій небезпечних речовин, радіаційного фону тощо). Наявність резервних сенсорних мереж, автономних джерел живлення та альтернативних каналів передачі даних визначає мінімально можливий час виявлення

t_{det} , який є критичним для подальшого управління ситуацією.

Фаза IV – прийняття управлінських рішень та реагування.

У проміжку $[t_{com}, t_{act}]$ здійснюється аналіз ситуації, узгодження управлінських рішень, мобілізація технічних і людських ресурсів, а також запуск захисних та компенсаторних заходів (перемикання на резервні системи, локалізація пошкоджених ділянок, обмеження доступу, евакуація персоналу). Порушення логістики, дефіцит ресурсів або втрата зв'язку збільшують t_{mob} , що знижує ефективність реагування.

В умовах воєнного стану вплив людського фактора зростає: обмежений доступ персоналу до об'єкта, безпека переміщення, підвищене психофізичне навантаження та дефіцит ресурсів призводять до збільшення t_{mob} , – підвищують імовірність організаційних відмов.

Фаза V – поширення небезпечних факторів.

Якщо до моменту t_{act} не відновлено стабілізаційних функцій, розпочинається фаза активного поширення небезпечних факторів у довкіллі. Просторово-часова динаміка концентрацій або інтенсивності впливу $C(t; L)$ описується дифузійно-адвекційними моделями, у яких момент t_{thr} відповідає досягненню порогового рівня C_{crit} для заданої контрольної зони або об'єкта впливу.

Фаза VI – стабілізація або ескалація.

За умови своєчасного та адекватного втручання система переходить у стабілізований стан t_{stb} , що характеризується локалізацією джерела безпеки та відновленням контрольованого режиму функціонування. У протилежному випадку відбувається ескалація аварії, що проявляється у виникненні вторинних джерел безпеки, каскадних відмов суміжних об'єктів критичної інфраструктури та розширенні зони ураження.

Критичні моменти часу визначають часові межі, у яких управлінські дії здатні змінити сценарій розвитку аварійної події на об'єкті критичної інфраструктури. Узагальнена часо-ієрархічна послідовність має вигляд:

$$t_0 < t_{det} < t_{com} < t_{mob} < t_{act} < t_{thr} < t_{stb}. \quad (1)$$

Для збереження керованості аварійного процесу необхідно забезпечити виконання умови:

$$t_{act} < t_{thr}. \quad (2)$$

Порушення цього співвідношення означає втрату можливості ефективного втручання, оскільки небезпечні фактори досягають критичних значень до початку активних захисних дій.

Розрахункові моделі визначення критичного моменту t_{thr} базуються на функції концентрації або інтенсивності впливу небезпечного фактора в просторі та часі:

$$C(t; L) = \frac{Q(t)}{\sqrt{2\pi}\sigma_y(t)\sigma_z(t)u(t)} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2(t)}\right), \quad (3)$$

де $Q(t)$ – інтенсивність викиду або вивільнення небезпечної речовини (енергії); $u(t)$ – швидкість перенесення (швидкість вітру або еквівалентна швидкість поширення); σ_y, σ_z – коефіцієнти просторової дисперсії; H – висота джерела викиду.

Пороговий момент t_{thr} визначається з умови:

$$C(t_{thr}; L) = C_{crit}, \quad (4)$$

де C_{crit} – критичний рівень впливу для заданої контрольної зони або об'єкта.

Для кількісної оцінки запасу часу вводиться поняття залишкового часу реагування:

$$T_{rem} = t_{thr} - t_{act}. \quad (5)$$

За умови T_{rem} прямує до нуля, будь-яке зволікання призводить до неконтрольованого розвитку аварії і поширення небезпечних факторів.

Воєнні дії змінюють часові параметри безпеки на об'єктах критичної інфраструктури:

- пошкодження систем енергопостачання або охолодження призводить до зростання $Q(t)$ внаслідок перегріву або некерованих технологічних процесів;

- порушення каналів зв'язку затримує момент ухвалення управлінських рішень t_{com} ;

- обмежений доступ персоналу та техніки подовжує час мобілізації t_{mob} ;

- невизначеність гідрометеорологічних умов унаслідок пожеж, вибухів або руйнування забудови ускладнює оцінювання параметрів σ_y, σ_z , що знижує достовірність прогнозування t_{thr} .

Загальним наслідком є скорочення доступного часу для дій: $\Delta t = t_{thr} - t_{act}$, що обґрунтовує необхідність переходу до автономних і автоматизованих систем раннього виявлення та реагування.

Для кожної часової фази аварійного процесу існує власне «вікно прийняття рішень» – інтервал, у межах якого відповідний контрзахід є найбільш ефективним. Звуження цього вікна під впливом бойових дій зменшує ймовірність успішної стабілізації процесу.

Висока невизначеність параметрів аварії зумовлює доцільність застосування імовірнісних моделей оцінювання t_{thr} і Δt , що дозволяє формувати верхні межі ризику для більш несприятливих сценаріїв розвитку подій.

Підвищення стійкості управління техногенно-екологічною безпекою об'єктів критичної інфраструктури потребує впровадження автономних інтелектуальних рішень, зокрема автоматизованих модулів раннього виявлення, незалежних і резервованих каналів передачі даних, автономних технологічних контурів безпеки, а також цифрових платформ підтримки прийняття рішень, здатних працювати в умовах часткової або повної втрати зовнішнього управління.

Таким чином, управлінські рішення під час розвитку аварійної події на об'єктах критичної інфраструктури мають чітко виражену часову природу, а їх результативність визначається співвідношенням моменту реалізації керуючої дії з

критичними моментами часу еволюції небезпечного процесу.

Розробка математичної моделі управління техногенно-екологічною безпекою забруднених територій у разі руйнування об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану.

Формування математичної моделі управління техногенно-екологічною безпекою у разі аварій на об'єктах критичної інфраструктури внаслідок воєнних дій базується на узгодженні:

- фізико-технічних процесів виникнення та поширення небезпечних факторів (радіаційних, хімічних, теплових);

- екологічної та санітарно-гігієнічної оцінки наслідків їх впливу на довкілля і населення;

- інформаційно-пошукових та керуючих процедур, реалізованих із використанням безпілотних літальних апаратів, автономних сенсорних мереж й інженерних систем об'єкта.

Модель формується як дворівнева. На першому рівні описується еволюція техногенно-екологічної безпеки в просторі та часі, а на другому рівні формується задача оптимального управління, що використовує результати моніторингу та пошукових операцій для мінімізації наслідків аварійних подій.

Першим кроком формування моделі є опис джерела небезпечного викиду, що утворюється внаслідок воєнного ураження об'єкта критичної інфраструктури. Інтенсивність вивільнення небезпечних речовин (або енергії) задається як часово-змінна функція:

$$Q(t) = Q_0 f_{dam}(t) f_{con}(t), \quad (6)$$

де Q_0 – початковий запас небезпечних речовин або потенціал аварійного вивільнення на об'єкті; $f_{dam}(t)$ – функція ступеня руйнування конструкцій, технологічного обладнання (0 – відсутність пошкоджень, 1 – повне руйнування); $f_{con}(t) \in [0; 1]$ – ефективність залишкової герметизації бар'єрів захисту.

Таким чином, воєнні ураження та вторинні пошкодження відображаються у зміні функцій $f_{dam}(t)$ та $f_{con}(t)$, а отже, і в часовій еволюції джерела $Q(t)$.

Подальший етап полягає у формуванні рівнянь перенесення небезпечних речовин у загальному вигляді:

$$\frac{dC(t)}{dt} = F(C(t), M(t), t) + W(t), \quad (7)$$

де $C(t)$ – вектор узагальнених полів концентрацій небезпечних компонентів у середовищі (атмосфера C_a , підземні води C_{gw} , ґрунт C_s); $F(C, M, t)$ – функція внутрішньої динаміки, що описує процеси перенесення, розсіювання, осадження, дифузії, хімічних або радіоактивних перетворень, а також взаємодію з інженерними системами об'єкта; $W(t)$ – вектор зовнішніх руйнівних впливів, що відображає додаткові порції викидів унаслідок повторних воєнних ударів, пожеж, вторинних руйнувань тощо.

Рівняння (7) описує зміну концентрацій у часі як результат поєднання природної динаміки та екстремальних впливів воєнного характеру.

Стан інженерних і захисних систем об'єкта описується рівнянням:

$$\frac{dM(t)}{dt} = G(M(t), t) - H(u(t), t), \quad (8)$$

де $G(M, t)$ – автономна динаміка систем без зовнішнього управління: природне старіння, руйнування обладнання, коливання технічних параметрів; $H(u, t)$ – ефект реалізації контрольних заходів, обумовлений керуючими діями $u(t)$ (локалізація пошкоджень, відновлення енергопостачання, стабілізація технологічних процесів, активація аварійних систем).

Поточний рівень техногенно-екологічної небезпеки визначається співвідношенням:

$$R(t) = \Phi(C(t), M(t)), \quad (9)$$

де $\Phi(C, M)$ – інтегральна функція ризику, що поєднує концентрації небезпечних речовин та поточний стан інженерних систем, які обмежують або підсилюють негативний вплив.

На основі полів концентрацій C_a, C_s, C_{gw} здійснюється оцінювання рівнів впливу на персонал, населення та елементи довкілля.

Для випадку радіаційного або аналогічного за механізмом впливу навантаження зовнішня доза в точці (x, y) може бути записана у вигляді:

$$D_{ext}(x, y, t) = \int_0^t k_\gamma C_a(x, y, z_0, \tau) d\tau + k_s C_s(x, y, 0, t), \quad (10)$$

де k_γ – перехідний коефіцієнт між концентрацією у повітрі та потужністю дози; z_0 – ефективна висота дихальної зони; k_s – коефіцієнт внеску забрудненого ґрунту у зовнішнє опромінення; τ – змінна інтегрування, що позначає поточний момент часу під час накопичення зовнішньої дози в інтервалі від 0 до t .

Внутрішня доза опромінення:

$$D_{int}(t) = \int_0^t [k_{inh} \bar{C}_a(\tau) + k_{ing} \bar{C}_s(\tau)] d\tau, \quad (11)$$

де k_{inh}, k_{ing} – коефіцієнти переходу для інгаляційного та перорального шляхів; \bar{C}_a, \bar{C}_s – усереднені концентрації у зоні проживання.

Повна доза:

$$D(x, y, t) = D_{ext}(x, y, t) + D_{int}(t). \quad (12)$$

Для переходу від рівня впливу до оцінки ризику вводяться функції небезпеки $H(D)$ та ймовірність перебування об'єктів (людини, біоти) у небезпечній зоні $P_{exp}(x, y, t)$:

$$R(x, y, t) = P_{exp}(x, y, t)H(D(x, y, t)), \quad (13)$$

Інтегральний техногенно-екологічний ризик по території Ω визначається як:

$$R(t) = \int_{\Omega} R(x, y, t) dx dy. \quad (14)$$

Рівняння (13), (14) формують кількісну залежність між аварійним вивільненням небезпечних факторів, їх міграцією у компонентах довкілля, рівнями впливу та ризиком для населення й навколишнього середовища на об'єктах критичної інфраструктури.

Умови воєнних дій обмежують можливості стаціонарного моніторингу, тому інформаційно-пошуковий контур моделі описується на основі угруповання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та мобільних сенсорних систем.

Кожен БПЛА характеризується траєкторією $(x_i(t), y_i(t), h_i(t))$ швидкістю $v_i(t)$ та енергетичним ресурсом. Інтенсивність інформаційного оновлення про радіаційну обстановку визначається як:

$$I(t) = \sum_{i=1}^N w_i \Phi_i(x_i(t), y_i(t), h_i(t)), \quad (15)$$

де N – кількість БПЛА; w_i – вагові коефіцієнти пріоритету ділянок спостереження; Φ_i – функція чутливості та інформативності датчика i -го БПЛА, що враховує висоту, відстань до об'єкта, фон, технічний стан обладнання.

Ймовірність виявлення аномалії протягом інтервалу спостереження $[0, T]$ задається:

$$P_{det} = 1 - \exp(-\beta \int_0^T I(t) dt), \quad (16)$$

де β – параметр чутливості алгоритмів обробки інформації.

Щільність виявлення аномалій $p(x, t)$ та функція покриття $\sigma(x, t)$ дозволяють визначити інтегральну ефективність пошуку:

$$S(t) = \int_{\Omega} p(x, t) \sigma(x, t) dx. \quad (17)$$

З урахуванням часових та енергетичних обмежень ефективність покриття зменшується за експоненціальним законом:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\lambda_\sigma t}, \quad (18)$$

де λ_σ – параметр деградації ефективності при зростанні тривалості безперервного польоту.

Інформаційно-пошуковий блок моделі пов'язує траєкторні та ресурсні характеристики БПЛА з показниками якості моніторингу – ймовірністю виявлення та ефективністю покриття небезпечних зон.

Наступним кроком формування моделі є перехід від опису процесів до задачі оптимального управління. Вектор керування:

$$u(t) = \{x_i(t), y_i(t), h_i(t), v_i(t), N, u_{eng}(t)\}, \quad (19)$$

де $u_{eng}(t)$ – узагальнений вектор керуючих дій з боку інженерних систем об'єкта (режими

охолодження, фільтрації, локальної герметизації, захисні та евакуаційні заходи).

Кінематичні та енергетичні обмеження БПЛА:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos \theta_i, & \dot{y}_i &= v_i \sin \theta_i, & h_{min} &\leq h_i(t) \leq h_{max}, \\ E_i &= \int_0^T P_i(v_i(t), h_i(t)) dt \leq E_{max}. \end{aligned} \quad (20)$$

Функціонал управління формується як інтегральний техногенно-екологічний збиток з урахуванням вартості управління та ресурсних витрат:

$$J(u) = \int_{t_0}^t [w_R R(t) + w_S S^{-1}(t) + w_u \|u(t)\|] dt + w_E \sum_{i=1}^N E_i \rightarrow \min, \quad (21)$$

де w_R, w_S, w_u, w_E – вагові коефіцієнти, що відображають пріоритет зменшення екологічного ризику, забезпечення ефективності пошуку, економії ресурсів управління та енергоспоживання відповідно.

Оптимальний закон керування визначається як розв’язок задачі:

$$u^*(t) = \arg \min_{u(t) \in U} J(u), \quad (22)$$

за умови динаміки поля небезпеки, роботи БПЛА та інженерних систем, а також обмежень безпеки:

$$P_{det} \geq P_{reg}, \quad R(t) \leq R_{crit}, \quad (23)$$

де P_{reg} – мінімально допустима ймовірність виявлення аномалій; R_{crit} – гранично допустимий рівень екологічного ризику.

Для практичної реалізації запропонованої моделі необхідно задати початкові та граничні умови, які пов’язують математичний опис із конкретним об’єктом критичної інфраструктури та його оточенням.

Початкові умови:

– початкові поля концентрацій забруднюючих речовин: $C_a(x, y, z, t_0) = C_{a0}(x, y, z)$, $C_s(x, y, z, t_0) = C_{s0}(x, y, z)$, $C_{gw}(x, y, z, t_0) = C_{gw0}(x, y, z)$;

– початковий стан інженерних систем об’єкта: $M(t_0) = M_0$;

– початковий рівень техногенно-екологічного ризику: $R(t_0) = R_0$;

– початкове розташування та ресурсний стан БПЛА: $x_i(t_0) = x_{i0}$, $y_i(t_0) = y_{i0}$, $h_i(t_0) = h_{i0}$, $E_i(t_0) = E_{i0}$.

Граничні умови:

– часові межі моделювання: $t_0 = t_{\text{інц}}$, $t_f = t_{\text{стаб}}$;

– просторові межі розрахункової області: $x \in \Omega$, $\Omega = \Omega_{\text{сховище}} \cup \Omega_{\text{буфер}}$ з фізично обґрунтованими граничними умовами для рівнянь перенесення на $\partial\Omega$ (непроникні межі, фонові концентрації, умови виносу за межі області тощо);

– технічні обмеження на параметри польоту та керування: $h_{min} \leq h_i(t) \leq h_{max}$, $E_i \leq E_{max}$, $u(t) \in U$, $\|u(t)\| \leq u_{max}$.

Початкові та граничні умови забезпечують зв’язок загальної математичної постановки з конкретним сценарієм аварії, що є необхідною передумовою для чисельної реалізації та калібрування моделі управління техногенно-екологічною безпекою об’єкта.

Висновки

1. За результатами аналізу хронології та динаміки розвитку техногенно-екологічної небезпеки на забруднених територіях у разі руйнування об’єктів критичної інфраструктури встановлено послідовність фаз аварійного процесу та визначено основні фактори ризику, зокрема механічні руйнування, відмови систем енергозабезпечення, моніторингу й зв’язку, пожежі та вторинне забруднення. Показано, що ефективність реагування визначається часом виявлення аварії, ухвалення управлінських рішень, передавання інформації та початку активних захисних дій. Скорочення доступного часу для реагування в умовах воєнного стану зумовлює необхідність упровадження адаптивних автономних систем моніторингу й управління. Управлінські рішення мають чітко виражену часову природу, а їх результативність залежить від співвідношення моменту реалізації керуючої дії з критичними моментами розвитку небезпечного процесу.

2. Розроблена математична модель управління техногенно-екологічною безпекою забруднених територій у разі руйнування об’єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану забезпечує комплексний підхід до оцінювання та контролю аварійних процесів. Модель має дворівневу структуру. Перший рівень описує просторово-часову еволюцію небезпеки, включно з формуванням джерела аварійного впливу, перенесенням небезпечних речовин в атмосфері, ґрунті та водному середовищі, а також оцінюванням рівнів впливу, екологічного ризику та потенційної шкоди. Другий рівень забезпечує оптимальне управління аварійним процесом із використанням інформаційно-пошукових засобів, зокрема БПЛА та систем моніторингу, з урахуванням технічних, часових і ресурсних обмежень для мінімізації техногенно-екологічних наслідків аварії.

ЛІТЕРАТУРА

- Хаустова В. С., Трушкіна Н. В. Загрози розвитку критичної інфраструктури: сутність і класифікація. *Проблеми економіки*. 2025. № 3(65). С. 89–104. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-3-89-104>.
- Rusakova T. I. Evaluation of ecological situation in case of accidents on township roads. *Science and Transport Progress*. 2015. Vol. 2(56). P. 65–76. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/42171>.
- Кічата Н. М., Третяков О. В. Оцінка ризиків виникнення надзвичайних ситуацій в енергетичному секторі критичної інфраструктури. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 5(023). С. 92–100. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.92.1097>.
- Chomik M., Vavilova N., Karaieva N., Yefymenko H. Problematic issues of ecological (technogenic) safety management (regulatory aspect). *Social Development and Security*. 2019. Vol. 9. № 5. P. 190–204. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2019.9.5.13>.

5. Рашкевич Н. В., Рушак І. І., Рашкевич О. С. Аналіз динаміки надзвичайних ситуацій, спричинених ракетно-артилерійськими обстрілами. *Комунальне господарство міст*. 2025. Т. 4. Вип. 192. С. 400–408. DOI: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-400-408>.
6. Рашкевич Н. В. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій на територіях України, які зазнали ракетно-артилерійських уражень. *Комунальне господарство міст*. 2023. Т. 4. Вип. 178. С. 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>.
7. Рашкевич Н. В., Мирошник О. М., Шевченко Р. І. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій пов'язаних з небезпечкою ґрунтових вод. *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>.
8. Rashkevich O., Rashkevich N., Shevchenko R., Khmyrova A. The formation of methodology laser monitoring of an emergency of technogenic character in the territory affected by rocketly and artillery damage. *Social Development and Security*. 2024. Vol. 14. № 4. P. 171–180. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.4.14>.
9. Рашкевич Н. В., Рашкевич О. С., Дівізніюк М. М., Шевченко Р. І., Шевченко О. С. Формування функціонального поля інформаційно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій медико-біологічного характеру зумовлених забрудненням ґрунтів в зоні бойових дій. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2025. № 2 (20). С. 82–91. DOI: <https://doi.org/10.33269/nvcs.2025.2.82-91>.
10. Краснов В. А., Рашкевич Н. В. Оцінка радіаційного впливу під час аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива. *Комунальне господарство міст. Серія: Інформаційні технології та інженерія*. 2025. Т. 6. Вип. 194. С. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-74-81>.
11. Рашкевич Н. В., Краснов В. А., Рашкевич О. С. Теорія і практика розробки інтегрованої моделі оцінювання забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на уражених територіях. *Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека»*. 2025. Т. 18. № 2. С. 23–33. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2025.2.3>.
12. Рашкевич Н. В., Краснов В. А., Гузь А. С. Процедури геопросторового профілювання території можливого радіаційного забруднення внаслідок ракетно-артилерійських уражень. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2025. № 111. С. 158–165. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.158>.
13. Колосков В. Ю. Метод оцінювання екологічного стану територій, що постраждали внаслідок бойових дій. *Екологічна безпека в умовах війни* : збірник тез доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції. Львів : ЛДУБЖД, 2024. С. 36–37. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/23555>.
14. Sineglazov V., Kot Y. Risk Assessment in Emergency Situations Using a Bayesian Network. *Electronics and Control Systems*. 2025. Vol. 1. № 83. P. 28–34. DOI: <https://doi.org/10.18372/1990-5548.83.19871>.
15. Murasov R. K., Kurtseitov T. L., Chumachenko S. M., Lunova O. V., Pyrykov O. V., Lunov A. O. Threat assessment mathematical model for potentially dangerous objects of critical infrastructure in the combat zone. *Problems in Programming*. 2022. Vol. (3–4). P. 446–454. DOI: <https://doi.org/10.15407/pp2022.03-04.446>.
16. Капля І., Тертишний Б. Методика оцінювання загроз об'єктам критичної інфраструктури під час вогневого впливу противника. *Social Development and Security*. 2024. Vol. 14. № 5. P. 215–221. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.21>.
17. Іванюта С. П., Панов С. М., Іваненко О. І., Гапон С. В. Оцінка ризиків критичній інфраструктурі України в умовах російської військової агресії. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2024. № 2. С. 47–61. DOI: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2024.307360>.
18. Іванець Г. В., Горелишев С. А., Іванець М. Г., Баулін Д. С. Аналіз факторів безпеки та ризиків виникнення надзвичайних ситуацій на території Харківської області. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України*. 2020. № 1(82). С. 87–105. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14892>.
19. Забеліна В. А. Оцінка техногенних ризиків викиду небезпечних речовин при надзвичайних ситуаціях. *Молодь: наука та інновації — 2024* : матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Дніпро : НТУ «ДП», 2024. С. 25–26. URL: <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/ebbb56e9-447d-4148-9655-ae3571bbd4cc/content>.
20. Мурасов Р., Мельник Я. Результати оцінювання загроз критичній інфраструктурі методом експертного оцінювання. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. № 48(3). С. 83–88. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-48-3-83-88>.
21. Мурасов Р., Нікітін А., Мещеряков І., Підгородецький М., Поплавець С. Методика оцінювання загроз і ризиків для об'єктів критичної інфраструктури за сценаріями розвитку надзвичайних ситуацій. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. № 48(3). С. 35–43. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-48-3-35-43>.
22. Савченко І. О., Мацько П. І. Системний підхід до підтримки прийняття рішень щодо загроз критичній інфраструктурі з використанням методів експертного оцінювання. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 36 (75). № 2. С. 199–205. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/27>.
23. von Danwitz M., Bonari J., Franz P., Kühn L., Mattuschka M., Popp A. Contaminant Dispersion Simulation in a Digital Twin Framework for Critical Infrastructure Protection. *arXiv preprint*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.01253>.
24. Chockalingam S., Hadžiosmanović D., Pieters W., Teixeira A., van Gelder P. Integrated safety and security risk assessment methods: a survey of key characteristics and applications. *Critical Information Infrastructures Security* : proceedings of the International Conference on Critical Information Infrastructures Security. Cham : Springer International Publishing, 2016. P. 50–62. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71368-7_5.
25. Yuan S., Yang M., Reniers G. Integrated process safety and process security risk assessment of industrial cyber-physical systems in chemical plants. *Computers in Industry*. 2024. Vol. 155. Article 104056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.104056>.
26. Shen G., Zhou L., Xue X., Zhou Y. The risk impacts of global natural and technological disasters. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol. 88. Article 101653. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101653>.
27. Kumar A., Pal I., Santoso D. S., Ninsawat S., Islam S. T. Identification of critical infrastructure sectors and their interdependencies in Bangladesh: a step towards resilience planning. *International Journal of Disaster Risk Science*. 2025. Vol. 16, № 4. P. 682–698. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-025-00655-0>.
28. Zhang J. Emergency risk assessment and rescue of groundwater pollution caused by mining based on 5G network. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*. 2025. Vol. 33, № 3. P. 346–355. DOI: <https://doi.org/10.3846/jeeim.2025.24549>.

UDC 614.8

MANAGEMENT OF TECHNO-ECOLOGICAL SAFETY OF CONTAMINATED AREAS IN CASE OF CRITICAL INFRASTRUCTURE DESTRUCTION UNDER MARTIAL LAW CONDITIONS

N. Rashkevich

PhD, Associate Professor

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

National University of Civil Protection of Ukraine

8 Onopriienka St., Cherkasy, 18034, Ukraine

O. Panchenko

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-7727-3035>

National Academy of the National Guard of Ukraine

3 Zakhysnykiv Ukrainy Square, Kharkiv, 61001, Ukraine

O. Rashkevich

Candidate of Technical Sciences

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-4374-4602>3rd State Fire and Rescue Unit of the Main Department of the State Emergency Service of Ukraine in Kharkiv Oblast
47 Kandaurova St., Kharkiv, 61093, Ukraine**L. Andriieva**ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9992-0070>National University of Civil Protection of Ukraine
8 Onopriienka St., Cherkasy, 18034, UkraineDOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.2>

Received: January 27, 2026

Accepted: May 29, 2026

Published: May 30, 2026

Cite as: Rashkevich, N., Panchenko, O., Rashkevich, O. Andriieva, L. (2026). Management of techno-ecological safety of contaminated areas in case of critical infrastructure destruction under martial law conditions. *Technogenic and Ecological Safety*, 19(1/2026), 11–20. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.2>

Open Access License: Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. The paper proposes an approach to managing technogenic and environmental safety in territories affected by hostilities and damaged critical infrastructure. The study is based on an analysis of the dynamics of emergency processes that cause rapid changes in damage conditions, secondary destruction, and limited response capabilities. It is established that the time parameters of accident detection, decision-making, and the initiation of active response actions directly affect the effectiveness of situation stabilization. A reduction in the available time reserve requires the use of autonomous and adaptive monitoring and response systems.

The paper considers a developed model with a two-level structure. The first level describes the development of hazardous processes in the environment and includes the following sequence: formation of an emission source, transport of substances in the air, soil, and water environments, manifestation of environmental risk, and determination of its degree. The second level of the model structure implements the task of optimal management in accordance with the formed information basis obtained from unmanned aerial vehicle data and technical measurements. This approach ensures the localization of hazards and the timely minimization of accident consequences through the selection of optimal control actions.

To assess the risk of uncontrolled pollution spread within the model, critical time moments that determine the effectiveness of management decisions and the remaining response time are introduced. The influence of military actions on the time parameters of processes leading to the development of hazardous situations, restricted personnel access, and resource degradation is taken into account. In accordance with the obtained information basis, autonomous digital decision-support platforms are formed.

The proposed approach makes it possible to forecast the development of accidents, coordinate response actions, and assess consequences as an integral effect of environmental impact, thereby reducing the risk of critical hazards under martial law conditions.

Key words: hazard sources, emergency situation, risk reduction measures, management system, pollution, hazardous substances, risk.

REFERENCES

1. Khaustova, V. Ye., & Trushkina, N. V. (2025). Zahrozy rozvytku krytychnoi infrastruktury: sutnist i klasyfikatsiia [Threats to the development of critical infrastructure: Essence and classification]. *Problemy Ekonomiky*, 3, 89–104. <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2025-3-89-104> [in Ukrainian].
2. Rusakova, T. I. (2015). Evaluation of ecological situation in case of accidents on township roads. *Science and Transport Progress*, 2(56), 65–76. <https://doi.org/10.15802/stp2015/42171>.
3. Kichata, N. M., & Tretiakov, O. V. (2024). Otsinka ryzykiv vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii v enerhetychnomu sektori krytychnoi infrastruktury [Risk assessment of emergency situations in the energy sector of critical infrastructure]. *Ukrainian Journal of Construction and Architecture*, 5(023), 92–100. <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.301024.92.1097> [in Ukrainian].
4. Chomik, M., Vavilova, N., Karaieva, N., & Yefymenko, H. (2019). Problematic issues of ecological (technogenic) safety management (regulatory aspect). *Social Development and Security*, 9(5), 190–204. <https://doi.org/10.33445/sds.2019.9.5.13>.
5. Rashkevich, N. V., Rushchak, I. I., & Rashkevich, O. S. (2025). Analiz dynamiky nadzvychainykh sytuatsii, sprychynenykh raketno-artyleryiskymy obstrilamy [Analysis of the dynamics of emergency situations caused by missile and artillery shelling]. *Municipal Economy of Cities*, 4(192), 400–408. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-4-192-400-408> [in Ukrainian].
6. Rashkevich, N. V. (2023). Analiz suchasnoho stanu poperedzhennia nadzvychainykh sytuatsii na terytoriiakh Ukrainy, yaki zaznaly raketno-artyleryiskykh urazhen [Analysis of the current state of emergency prevention in the territories of Ukraine affected by missile and artillery strikes]. *Municipal Economy of Cities*, 4(178), 232–251. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251> [in Ukrainian].
7. Rashkevich, N. V., Myroshnyk, O. M., & Shevchenko, R. I. (2023). Analiz suchasnoho stanu poperedzhennia nadzvychainykh sytuatsii, poviazanykh z nebezpekoiu gruntovykh vod [Analysis of the current state of prevention of emergency situations related to groundwater hazards]. *Emergency Situations: Prevention and Response*, 7(2), 193–216. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.193.216> [in Ukrainian].
8. Rashkevich, O., Rashkevich, N., Shevchenko, R., & Khmyrova, A. (2024). The formation of methodology laser monitoring of an emergency of technogenic character in the territory affected by rocket and artillery damage. *Social Development and Security*, 14(4), 171–180. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.4.14>.
9. Rashkevich, N. V., Rashkevich, O. S., Diviziniuk, M. M., Shevchenko, R. I., & Shevchenko, O. S. (2025). Formuvannia funktsionalnoho polia informatsiino-tehnychnykh metodiv poperedzhennia nadzvychainykh sytuatsii medyko-biologichnoho kharakteru, zumovlenykh zabrudnenniam gruntiv u zoni boiovykh dii [Formation of the functional field of information and technical methods for preventing medical and biological emergencies caused by soil contamination in combat zones]. *Scientific Bulletin: Civil Protection and Fire Safety*, 2(20), 82–91. <https://doi.org/10.33269/nvcs.2025.2.82-91> [in Ukrainian].
10. Krasnov, V. A., & Rashkevich, N. V. (2025). Otsinka radiatsiinoho vplyvu pid chas avarii na skhovyshchi vidpratsiovanoho yadernoho palyva [Assessment of radiation impact during an accident at a spent nuclear fuel storage facility]. *Municipal Economy of Cities. Series: Information Technologies and Engineering*, 6(194), 74–81. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-74-81> [in Ukrainian].
11. Rashkevich, N. V., Krasnov, V. A., & Rashkevich, O. S. (2025). Teoria i praktyka rozrobky integrovanoi modeli otsiniuvannia zabrudnennia gruntiv ta gruntovykh vod na urazhenykh terytoriiakh [Theory and practice of developing an integrated model for assessing soil and groundwater contamination in affected areas]. *Technogenic and Environmental Safety*, 18(2), 23–33. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2025.2.3> [in Ukrainian].
12. Rashkevich, N. V., Krasnov, V. A., & Huz, A. S. (2025). Protседury heoprostorovoho profiluvannia terytorii mozlyvoho radiatsiinoho zabrudnennia vnaslidok raketno-artyleryiskykh urazhen [Procedures for geospatial profiling of territories of potential radiation contamination caused by missile and artillery strikes]. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*, 111, 158–165. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.158> [in Ukrainian].

13. Koloskov, V. Yu. (2024). Metod otsiniuvannya ekolohichnoho stanu terytorii, shcho postrazhdaly vnaslidok boiovykh dii [Method for assessing the environmental condition of territories affected by hostilities]. In *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Environmental Safety in Conditions of War"* (pp. 36–37). Lviv: Lviv State University of Life Safety. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/23555>.
14. Sineglazov, V., & Kot, Y. (2025). Risk assessment in emergency situations using a Bayesian network. *Electronics and Control Systems*, 1(83), 28–34. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.83.19871>.
15. Murasov, R. K., Kurtseitov, T. L., Chumachenko, S. M., Lunova, O. V., Pyrykov, O. V., & Lunov, A. O. (2022). Threat assessment mathematical model for potentially dangerous objects of critical infrastructure in the combat zone. *Problems in Programming*, 3–4, 446–454. <https://doi.org/10.15407/pp2022.03-04.446>.
16. Kaplia, I., & Tertyshnyy, B. (2024). Metodyka otsiniuvannya zahroz ob'ektam krytychnoi infrastruktury pid chas vohnevoho vplyvu protyvnyka [Methodology for assessing threats to critical infrastructure facilities during enemy fire impact]. *Social Development and Security*, 14(5), 215–221. <https://doi.org/10.33445/sds.2024.14.5.21> [in Ukrainian].
17. Ivaniuta, S. P., Panov, Ye. M., Ivanenko, O. I., & Hapon, S. V. (2024). Otsinka ryzykiv krytychnii infrastrukturi Ukrainy v umovakh rosiiskoi viiskovoi ahresii [Risk assessment for Ukraine's critical infrastructure under Russian military aggression]. *Bulletin of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving*, 2, 47–61. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2024.307360> [in Ukrainian].
18. Ivanets, H. V., Horyelyshev, S. A., Ivanets, M. H., & Baulin, D. S. (2020). Analiz faktoriv nebezpeky ta ryzykiv vynykennia nadzvychainykh sytuatsii na terytorii Kharkivskoi oblasti [Analysis of hazard factors and risks of emergency situations in the Kharkiv region]. *Collection of Scientific Works of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine*, 1(82), 87–105. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/14892> [in Ukrainian].
19. Zabelina, V. A. (2024). Otsinka tekhnohennykh ryzykiv vykydu nebezpechnykh rehovyn pry nadzvychainykh sytuatsiiakh [Assessment of technogenic risks of hazardous substance releases during emergencies]. In *Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists "Youth: Science and Innovations"* (pp. 25–26). Dnipro: NTU "Dnipro Polytechnic". <https://ir.nmu.org.ua/server/api/core/bitstreams/ebbb56e9-447d-4148-9655-ae3571bbd4cc/content> [in Ukrainian].
20. Murasov, R., & Melnyk, Ya. (2023). Rezultaty otsiniuvannya zahroz krytychnii infrastrukturi metodom ekspertnoho otsiniuvannya [Results of assessing threats to critical infrastructure using the expert assessment method]. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 48(3), 83–88. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-48-3-83-88> [in Ukrainian].
21. Murasov, R., Nikitin, A., Meshcheriakov, I., Pidhrodetskyi, M., & Poplavets, S. (2023). Metodyka otsiniuvannya zahroz i ryzykiv dlia ob'ektiv krytychnoi infrastruktury za stenariiami rozvytku nadzvychainykh sytuatsii [Methodology for assessing threats and risks to critical infrastructure facilities based on emergency development scenarios]. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 48(3), 35–43. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-48-3-35-43> [in Ukrainian].
22. Savchenko, I. O., & Matsko, P. I. (2025). Systemnyi pidkhid do pidtrymky pryiniattia rishen shchodo zahroz krytychnii infrastrukturi z vykorystanniam metodiv ekspertnoho otsiniuvannya [A systems approach to decision support for critical infrastructure threats using expert assessment methods]. *Scientific Notes of V. I. Vernadsky Taurida National University. Series: Technical Sciences*, 36(75)(2), 199–205. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/27> [in Ukrainian].
23. von Danwitz, M., Bonari, J., Franz, P., Kühn, L., Mattuschka, M., & Popp, A. (2024). Contaminant dispersion simulation in a digital twin framework for critical infrastructure protection. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.01253>.
24. Chockalingam, S., Hadžiosmanović, D., Pieters, W., Teixeira, A., & van Gelder, P. (2016). Integrated safety and security risk assessment methods: A survey of key characteristics and applications. In *International Conference on Critical Information Infrastructures Security* (pp. 50–62). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71368-7_5.
25. Yuan, S., Yang, M., & Reniers, G. (2024). Integrated process safety and process security risk assessment of industrial cyber-physical systems in chemical plants. *Computers in Industry*, 155, 104056. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.104056>.
26. Shen, G., Zhou, L., Xue, X., & Zhou, Y. (2023). The risk impacts of global natural and technological disasters. *Socio-Economic Planning Sciences*, 88, 101653. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101653>.
27. Kumar, A., Pal, I., Santoso, D. S., Ninsawat, S., & Islam, S. T. (2025). Identification of critical infrastructure sectors and their interdependencies in Bangladesh: A step towards resilience planning. *International Journal of Disaster Risk Science*, 16(4), 682–698. <https://doi.org/10.1007/s13753-025-00655-0>.
28. Zhang, J. (2025). Emergency risk assessment and rescue of groundwater pollution caused by mining based on 5G network. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 33(3), 346–355. <https://doi.org/10.3846/jeel.2025.24549>.