

Розробка технології управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива

Development of Environmental Safety Management Technology in the Event of an Accident at a Spent Nuclear Fuel Storage Facility Caused

Вячеслав Краснов

Corresponding author: ад'юнкт, е-mail: krasnov.viacheslav_2022phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8445-6843>

Ніна Рашкевич

PhD, доцент кафедри, е-mail: rashkevych_nina@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

Ольга Шевченко

кандидат технічних наук, докторант, е-mail: shevchenkool@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2106-5009>

Юлія Погрибна

ад'юнкт, е-mail: pohribna.yuliia_2025phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-2746-6459>

Володимир Тригуб

кандидат технічних наук, доцент кафедри, е-mail: tryhub_volodymyr@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5370-1340>

Viacheslav Krasnov

Corresponding author: PhD student, е-mail: krasnov.viacheslav_2022phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8445-6843>

Nina Rashkevich

PhD, Associate Professor, е-mail: rashkevych_nina@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5124-6068>

Olha Shevchenko

PhD in Technical Sciences, Doctoral Candidate, е-mail: shevchenkool@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2106-5009>

Yulia Pogribna

PhD student, е-mail: pohribna.yuliia_2025phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-2746-6459>

Volodymyr Tryhub

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, е-mail: tryhub_volodymyr@nuczu.edu.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5370-1340>

Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

Received: March 28, 2026 | Revised: April 20, 2026 | Accepted: April 30, 2026

УДК: 504.064.3

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.15>

Мета роботи. Розробити технологію управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, що забезпечує оцінювання, прогнозування та мінімізацію радіаційного впливу на довкілля і населення в умовах інфраструктурної нестабільності, неповноти даних і обмеженості ресурсів реагування.

Метод дослідження. Дослідження ґрунтується на комплексному застосуванні аналізу стану довкілля, математичного моделювання, радіаційного моніторингу, геоінформаційного аналізу та теорії управління надзвичайними ситуаціями. Використано аналітичний метод, системний аналіз, структурно-логічне і математичне моделювання, а також підхід до інтеграції моніторингових даних у межах системи підтримки прийняття рішень.

Результати дослідження. Обґрунтовано методичну основу запропонованої технології на принципах системності, ієрархічності управління, ризик-орієнтованості, адаптивності, інформаційної інтегрованості, оперативності та превентивності. Розроблено алгоритм збору, оброблення та інтеграції моніторингових даних, а також алгоритм виявлення і локалізації радіаційного забруднення з урахуванням дифузії, адвекції, турбулентного розсіювання та осадження аерозолів. Сформовано структурно-логічну схему, що поєднує моніторинг, оброблення даних, оцінювання ризику та підтримку прийняття рішень.

Практична цінність дослідження. Запропонована технологія може бути використана для підвищення обґрунтованості управлінських

Purpose. To develop an environmental safety management technology for accidents at a spent nuclear fuel storage facility caused by military actions, aimed at assessing, forecasting, and minimizing radiation impacts on the environment and population under conditions of infrastructure instability, incomplete data, and limited response resources.

Method. The study is based on the integrated use of environmental analysis, mathematical modeling, radiation monitoring, geoinformation analysis, and emergency management theory. Analytical methods, systems analysis, structural-logical and mathematical modeling, and monitoring data integration within a decision-support framework were applied.

Findings. The methodological basis of the proposed technology was substantiated using the principles of systemacity, hierarchical management, risk orientation, adaptability, information integration, efficiency, and prevention. An algorithm for collecting, processing, and integrating monitoring data was developed, along with an algorithm for detecting and localizing radiation contamination considering diffusion, advection, turbulent dispersion, and aerosol deposition. A structural-logical scheme integrating monitoring, data processing, risk assessment, and decision support was formed.

Practical Implications. Proposed technology can improve management decisions, support localization of radiation contamination zones, and enhance operational response under damaged

рішень, локалізації зон радіаційного забруднення та підвищення ефективності реагування в умовах пошкодженої інфраструктури.

Цінність дослідження: Цінність роботи полягає у розробленні технології управління екологічною безпекою у разі аварій на сховищах ВЯП, спричинених воєнними діями.

Обмеження дослідження/Майбутні дослідження: Дослідження має переважно теоретичний характер і потребує подальшої перевірки на основі сценарних розрахунків та реальних моніторингових даних. Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісне оцінювання ризику та апробацію технології для конкретних об'єктів.

Тип статті: Теоретична.

infrastructure conditions.

Originality/Value: the study proposes an integrated environmental safety management technology for accidents at spent nuclear fuel storage facilities caused by military actions.

Research limitations/Future research: the study is mainly theoretical and requires further verification through scenario calculations and real monitoring data. Future research should focus on quantitative risk assessment and testing for specific facilities.

Paper type: Theoretical.

Ключові слова: сховище відпрацьованого ядерного палива; екологічна безпека; радіаційний вплив; воєнні дії; моніторингові дані; структурно-логічна схема; управлінські рішення.

Key words: Spent Nuclear Fuel Storage Facility; Environmental Safety; Radiation Exposure; Military Operations; Monitoring Data; Structural-Logical Framework; Managerial Decision-Making.

Вступ

У разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива (ВЯП), спричиненої воєнними діями, управління наслідками ускладнюється через пошкодження інженерної та транспортної інфраструктури, порушення енергозабезпечення та комунікацій, неповноту або несвоєчасність моніторингових даних, а також обмеженість сил та засобів реагування. За таких умов знижується ефективність процедур контролю та локалізації наслідків, а прийняття управлінських рішень відбувається в умовах дефіциту часу та підвищеної невизначеності. У зв'язку з цим недостатньо лише технічного контролю стану об'єкта, оскільки необхідно враховувати можливі шляхи поширення радіаційного забруднення в компонентах довкілля, просторові масштаби ураження та потенційний вплив на населення.

Мета дослідження полягає у розробленні технології управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, яка забезпечує оцінювання, прогнозування та мінімізацію радіаційного впливу на довкілля і населення в умовах інфраструктурної нестабільності, неповноти даних і обмеженості ресурсів реагування.

Об'єктом дослідження є процес управління екологічною безпекою в зоні можливого радіаційного впливу сховища відпрацьованого ядерного палива в умовах аварійної ситуації, спричиненої воєнними діями.

Предметом дослідження є методи, моделі, алгоритми та організаційно-функціональні процедури оцінювання, прогнозування, локалізації радіаційного забруднення і підтримки прийняття управлінських рішень щодо мінімізації його впливу на довкілля та населення.

Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно розв'язати такі завдання: обґрунтувати методичну основу технології управління екологічною безпекою в зоні розміщення сховища ВЯП; розробити алгоритм збору, оброблення та інтеграції моніторингових даних для забезпечення функціонування технології управління екологічною безпекою; сформулювати структурно-логічну схему технології управління екологічною безпекою.

Теоретичні основи дослідження

У наукових дослідженнях безпека сховищ ВЯП розглядається переважно крізь призму багато бар'єрного захисту, збереження цілісності паливних збірок і контейнерів, підтримання теплового режиму, а також довгострокового моніторингу технічного стану систем зберігання [1–3]. У міжнародних підходах наголос робиться на тому, що для об'єктів зберігання ВЯП головним є контроль критичних параметрів, поєднання активних та пасивних засобів безпеки, а також пропорційність захисних заходів до рівня потенційної небезпеки [1, 4].

Окремий напрям досліджень присвячений теплогідравлічним процесам у басейнах витримки та сухих системах зберігання. У роботах [5, 6] узагальнено сучасні підходи до аналізу

тепловідведення, природної конвекції, пасивного охолодження та підвищення надійності систем відведення залишкового тепла. Ці дослідження підтверджують, що навіть за високої конструктивної надійності сховищ довготривала безпека залежить від моніторингу параметрів середовища, герметичності, температурного стану [5, 6]. Моніторинг під час тривалого зберігання має бути безперервним та чутливим до ранніх ознак погіршення стану систем, оскільки перевищення допустимих меж може призводити до втрати герметичності й підвищення ризику викиду радіоактивних речовин [6].

Війна в Україні розширила перелік можливих загроз: за даними МАГАТЕ, військова активність поблизу українських ядерних об'єктів, пошкодження електричної інфраструктури, перебої з зовнішнім живленням та обмеження доступу персоналу продовжують впливати на ядерну та радіаційну безпеку [7]. В умовах збройного конфлікту руйнуються не лише технічні бар'єри, а й аварійна готовність, ланцюги постачання, комунікації [8]. Це зміщує акцент із класичної технічної безпеки до проблеми стійкості систем управління в умовах воєнного порушення інфраструктури.

У роботі [9] показано, що ефективне реагування на ядерні та радіаційні аварії потребує інтеграції прогнозування викиду, моделей атмосферного перенесення, оцінювання доз, зонування територій та цифрових засобів підтримки рішень. МАГАТЕ у 2024 році окремо проводило спеціалізовані заходи з моніторингу під час ядерної чи радіологічної аварії та з оцінювання і прогнозування в умовах надзвичайних ситуацій, що свідчить про зростання ролі саме аналітико-прогностичного контуру безпеки [7, 9]. Паралельно розвиваються дослідження безпілотних технологій для радіаційного контролю: у роботі [10] показано, що UAV-платформи можуть підвищити оперативність виявлення забруднення та знизити дозове навантаження на персонал.

Праці [11–14] формують методологічну основу дослідження. У роботі [11] визначено умови існування математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях, забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження, та обґрунтовано параметри просторового екологічного моніторингу. У праці [12] розглянуто оцінку радіаційного впливу під час аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива, що є найбільш наближеним до тематики даної статті напрямом. У дослідженні [13] запропоновано модель оцінювання забруднення ґрунтів і ґрунтових вод на уражених територіях, яка враховує сукупність природних та техногенних чинників. Робота [14] присвячена геопросторовому профілюванню територій можливого радіаційного забруднення із застосуванням дистанційного зондування, польових вимірювань і картографування небезпеки.

Таким чином, наявні публікації переважно висвітлюють окремі складові проблеми: конструктивну безпеку сховищ ВЯП, теплогідравлічні режими, фізичний захист, аварійну готовність або окремі технології моніторингу. Недостатньо опрацьовано питання управління екологічною безпекою саме у випадку аварії на сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями.

Постановка проблеми

Безпека сховищ ВЯП забезпечується технічним, радіаційним і фізичним захистом об'єкта, що передбачає контроль стану інженерних систем, підтримання працездатності бар'єрів локалізації та готовність до аварійного реагування. Проте в умовах воєнних дій виникають додаткові ризики, пов'язані з пошкодженням інфраструктури, порушенням енергозабезпечення і комунікацій, обмеженням доступу до об'єкта та неповнотою моніторингових даних.

У разі аварії на сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями, радіаційна небезпека поширюється за межі технологічного контуру об'єкта і охоплює компоненти довкілля та населення. За таких умов недостатньо лише технічного контролю стану сховища, оскільки

необхідно враховувати просторово-часову динаміку забруднення, можливі шляхи міграції радіонуклідів та масштаби їх впливу.

Таким чином, проблема полягає у відсутності цілісної технології управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі ВЯП внаслідок воєнних дій, яка б забезпечувала узгоджене поєднання моніторингу, оброблення та інтеграції даних, оцінювання стану довкілля і формування управлінських рішень.

Методологія дослідження

Методологія проведення досліджень базується на поетапному підході, що передбачає послідовне виконання взаємопов'язаних аналітичних і прикладних процедур для оцінювання екологічної безпеки в зоні розміщення сховища ВЯП в умовах аварій, спричинених воєнними діями. На першому етапі здійснюється аналіз наукових джерел і нормативної бази з метою визначення факторів небезпеки та сучасних підходів до управління ризиками. На другому етапі формується алгоритм пошуку і локалізації радіаційних аномалій, який ґрунтується на дискретизації простору і часу та оцінюванні ймовірності їх виявлення з урахуванням обмежених ресурсів. На третьому етапі організовується збір моніторингових даних із використанням стаціонарних, мобільних і дистанційних засобів спостереження, після чого здійснюється їх оброблення, перевірка та інтеграція в єдину інформаційну систему. На завершальному етапі виконується оцінювання екологічних ризиків і формування управлінських рішень із урахуванням зворотного зв'язку для уточнення результатів і підвищення ефективності реагування.

Результати

Формування технології управління екологічною безпекою в зоні розміщення сховищ ВЯП ґрунтується на уявленні про цю зону як складну багатокомпонентну систему, у межах якої поєднуються технічні елементи сховища, природні компоненти довкілля та органи управління, що здійснюють реагування в умовах аварійної ситуації, зумовленої воєнними діями. Такий підхід вимагає використання сукупності принципів, які забезпечують логічну узгодженість математичного моделювання, процедур моніторингу та управлінських рішень, а саме:

1. Принцип системності, який передбачає розгляд процесів формування та поширення радіаційної небезпеки разом із процесами управлінського впливу. У межах цього принципу джерело радіаційного викиду, середовища перенесення радіонуклідів (атмосфера, ґрунт, ґрунтові води) та об'єкти впливу розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиної системи, стан якої змінюється в часі під дією як природних факторів, так і керуючих дій.

2. Принцип ієрархічності, що реалізується через дворівневу структуру математичної моделі. На першому рівні формується опис еволюції техногенно-радіаційної небезпеки, що дозволяє кількісно оцінювати просторово-часовий розподіл концентрацій радіонуклідів, доз опромінення та екологічного ризику. На другому рівні визначаються керуючі дії, спрямовані на мінімізацію інтегрального екологічного збитку з урахуванням обмежень інженерних систем, можливостей моніторингу та ресурсів реагування. Такий поділ забезпечує узгодження фізичних процесів і процедур прийняття рішень у межах єдиного методичного підходу.

3. Принцип ризик-орієнтованості, відповідно до якого основним критерієм ефективності управління виступає рівень екологічного ризику, а не окремі концентраційні чи дозові показники. Це дозволяє інтегрувати результати моделювання перенесення радіонуклідів у показники, безпосередньо пов'язані з потенційними наслідками для довкілля та населення, і використовувати їх як основу для вибору пріоритетних управлінських рішень.

4. Принцип адаптивності, який полягає у здатності технології коригувати параметри математичної моделі та управлінські сценарії в процесі надходження нових моніторингових даних. Актуальність цього принципу зумовлена динамічністю аварійних ситуацій воєнного

характеру, коли вихідні дані можуть бути неповними або швидко змінюватися. Адаптивність забезпечується використанням мобільних та дистанційних засобів спостереження, зокрема безпілотних літальних апаратів, а також процедур регулярного оновлення прогнозних розрахунків.

5. Принцип превентивності, який орієнтує технологію на випереджальне управління, що базується на сценарному прогнозуванні розвитку небезпечних процесів. Застосування цього принципу дозволяє формувати керуючі дії не лише у відповідь на вже зафіксовані порушення безпеки, а й на основі прогнозу можливих змін обстановки, зменшуючи ймовірність реалізації найбільш небезпечних сценаріїв.

6. Принцип інформаційної узгодженості, який передбачає уніфікацію форматів, часових масштабів та просторової прив'язки моніторингових даних. Це забезпечує їх безпосереднє використання в математичних моделях першого рівня та в задачах оптимального управління другого рівня, формуючи єдиний інформаційно-аналітичний простір управління екологічною безпекою.

7. Принцип обмеженості ресурсів, відповідно до якого технологія враховує реальні технічні, енергетичні, часові та кадрові обмеження, характерні для умов воєнного часу. Це забезпечує практичну реалізованість запропонованих управлінських рішень та їх відповідність умовам функціонування систем цивільного захисту.

Таким чином, сукупність принципів, а саме системності, ієрархічності управління, ризик-орієнтованості, адаптивності, інформаційної інтегрованості, оперативності, превентивності, урахування ресурсних обмежень та узгодженості управлінських рішень, формує методичну основу технології управління екологічною безпекою в зоні розміщення сховища відпрацьованого ядерного палива та забезпечує узгоджене поєднання математичного моделювання, екологічного моніторингу й процедур підтримки прийняття рішень у межах єдиної системи управління.

Розробка алгоритму передбачає формалізацію процесів виявлення та контролю радіаційних аномалій, що дозволяє інтегрувати чисельні методи моделювання у практичну реалізацію стратегії моніторингу.

Для практичної реалізації оптимальної стратегії пошуку нерухомої радіаційної аномалії в обмеженій площі Ω використовуються чисельні методи на основі дискретизації простору та часу.

Нижче наведений алгоритм забезпечує адаптивний розподіл ресурсів пошуку з урахуванням просторово-часової динаміки аномалії, варіативності зовнішніх умов та технічних обмежень сенсорів.

Алгоритм включає наступні кроки:

1. Дискретизація простору та часу.

Область пошуку Ω розбивається на $N \times M$ елементів (клітин), що формують двовимірну сітку $\{x_{ij}\}$; інтервал часу T розбивається на K кроків $\Delta t = T/K$; для кожної клітини визначається початкова щільність ймовірності наявності аномалії $p_{ij}^0 = p(x_{ij}, 0)$, що відображає очікувану локалізацію критичних зон та дозволяє враховувати апостеріорні дані про попередні пошукові операції.

2. Ініціалізація пошукових ресурсів.

Загальна кількість пошукових ресурсів S_{total} розподіляється між клітинами, виходячи з початкового розподілу ймовірності. Встановлюються параметри пошукових засобів: ефективність сенсорів, радіус дії, типи детекторів (радіаційні, термальні, оптоелектронні), а також обмеження щодо енергоспоживання та часу автономної роботи безпілотних платформ.

3. Визначення ймовірності виявлення.

Для кожної клітини ij на кроці часу k обчислюється ймовірність виявлення аномалії:

$$P_d^k(x_{ij}) = 1 - \exp(-as_{ij}^k), \quad (1)$$

де s_{ij}^k – пошукове зусилля, витрачане в клітині ij на кроці часу k ;
 a – ефективність пошукового засобу (експериментально визначений коефіцієнт, що враховує чутливість сенсора та зовнішні умови).

4. Оновлення щільності ймовірності

Апостеріорна щільність розподілу аномалії на наступному кроці часу визначається за формулою:

$$p_{ij}^{k+1} = p_{ij}^k (1 - P_d^k(x_{ij})). \quad (2)$$

Це враховує, що якщо аномалія не була виявлена, її ймовірність зменшується через витрачені ресурси, а при виявленні зменшується значно швидше, забезпечуючи адаптивне коригування пошукової стратегії.

5. Оптимізація пошукових зусиль

На кожному кроці часу пошукові зусилля s_{ij}^k розподіляються між клітинами таким чином, щоб максимізувати ймовірність виявлення аномалії в інтервалі часу $[0, T]$, за умов обмеженого ресурсу:

$$\max_{s_{ij}^k} \sum_{ij} p_{ij}^k (1 - e^{-as_{ij}^k}) \text{ при } \sum_{ij} s_{ij}^k \leq S_{total}. \quad (3)$$

Ця задача вирішується чисельно за допомогою методів градієнтного підйому, методу Лагранжа або динамічного програмування.

6. Адаптивне перерозподілення ресурсів

Після кожного кроку часу оновлюється щільність ймовірності p_{ij}^{k+1} . Пошукові ресурси на наступний крок перерозподіляються пропорційно до значення p_{ij}^{k+1} , що дозволяє концентрувати зусилля на клітинах з найбільшою ймовірністю знаходження аномалії та зменшувати витрати на низькоперспективні ділянки.

7. Критерій завершення пошуку.

Пошук вважається завершеним, коли:

Досягнута максимальна ймовірність виявлення $P_{виявлено}(T) \rightarrow 1$, або

Витрачено весь ресурс, або S_{total} , або

Вичерпано відведений час T .

Цей алгоритм дозволяє чисельно розрахувати оптимальну стратегію пошуку радіаційної аномалії нерухомого типу, враховуючи просторову дифузію, вплив повітряних потоків та ресурсні обмеження пошукових систем.

Таким чином, розроблений алгоритм пошуку та локалізації радіаційного забруднення, що виникає у разі аварії на сховищі ВЯП внаслідок воєнних дій, спирається на поняття радіаційної аномалії як умовно нерухомої. Просторову мінливість аномалії враховують через процеси дифузії, адвекції, турбулентного розсіювання та осадження аерозолів. Запропонована формалізація зони забруднення як стохастичного поля концентрацій із часово-просторовою еволюцією дозволяє оцінювати ймовірні межі аномалії, локалізаційні інтервали та рівні екологічного ризику.

Алгоритм збору, оброблення та інтеграції моніторингових даних технології управління екологічною безпекою орієнтований на забезпечення безперервного, достовірного та оперативного інформаційного супроводу процесів оцінювання та прогнозування ризиків у зоні розміщення сховища ВЯП.

На етапі збору даних передбачено використання багатоканальної системи спостережень, що поєднує стаціонарні пости радіаційного, метеорологічного, гідрогеологічного та екологічного контролю з мобільними й дистанційними засобами моніторингу. До останніх належать пересувні лабораторії, автономні сенсорні платформи та

безпілотні літальні апарати, оснащені приладами вимірювання потужності дози, концентрацій радіонуклідів, параметрів повітряного та ґрунтового середовищ.

Оброблення моніторингових даних здійснюється з використанням процедур попередньої фільтрації, валідації та нормалізації. Алгоритм включає виявлення аномальних та помилкових вимірювань, корекцію даних з урахуванням похибок приладів та впливу зовнішніх факторів, а також приведення показників до уніфікованих форматів і шкал. Для підвищення стійкості системи до втрати частини інформації передбачено застосування методів інтерполяції та екстраполяції, що дозволяють відновлювати просторово-часові поля параметрів за умов неповноти спостережень.

Інтеграція моніторингових даних реалізується шляхом об'єднання різномірної інформації в єдиному інформаційно-аналітичному середовищі. Алгоритм інтеграції забезпечують сумісне використання результатів наземних, повітряних та дистанційних вимірювань, їх просторову агрегацію в межах заданих сіток або зон, а також зв'язок із результатами математичного моделювання поширення радіонуклідів та оцінювання екологічних ризиків. Механізм зворотного зв'язку забезпечує оперативну корекцію роботи систем моніторингу: дані про підвищений ризик спрямовуються на переналаштування датчиків і мобільних платформ, зміну частоти та параметрів збору даних, пріоритетизацію дій реагування та оптимізацію ресурсів для зон з найвищим ризиком. Одночасно результати моніторингу уточнюють параметри математичних моделей, враховуючи зміни умов, у тому числі бойову обстановку та динаміку пошкоджень інфраструктури.

На рис. 4.1 наведено схему алгоритму збору, оброблення та інтеграції моніторингових даних.

Формування структурно-логічної схеми технології управління екологічною безпекою (рис. 2) передбачає створення інтегрованої системи, яка об'єднує моніторингові засоби, алгоритми обробки даних, модулі оцінювання ризиків та механізми прийняття рішень у єдину функціональну структуру.

Схема передбачає багаторівневу організацію управління, у межах якої кожен рівень виконує чітко визначені функції та логічно пов'язаний з іншими елементами системи.

Рівень збору даних забезпечує безперервне надходження первинної інформації за рахунок використання стаціонарних датчиків, мобільних платформ, безпілотних літальних апаратів, засобів дистанційного зондування та оперативного моніторингу критичних ділянок сховища. На цьому рівні реалізуються процедури синхронізації даних у часі та просторі, стандартизації форматів, валідації вимірювань, що дозволяє підвищити достовірність та порівнюваність інформації з різних джерел.

Рівень обробки та інтеграції орієнтований на агрегування отриманих даних і формування єдиного просторово-часового поля параметрів, яке відображає поточний стан екологічної безпеки. На цьому етапі здійснюється аналіз динаміки показників, виявлення аномальних відхилень, автоматичне оновлення інформаційних уявлень про стан об'єкта та підготовка узагальнених результатів для подальшого використання в управлінні.

Рівень оцінювання ризиків забезпечує ідентифікацію джерел небезпеки, визначення рівнів загрози та можливих наслідків для персоналу, населення та довкілля, а також формування сценаріїв розвитку подій. Результати подаються у вигляді інтегральних індикаторів ризику, карт зон підвищеної небезпеки та ранжованих пріоритетів реагування, що створює основу для обґрунтованого прийняття управлінських рішень.

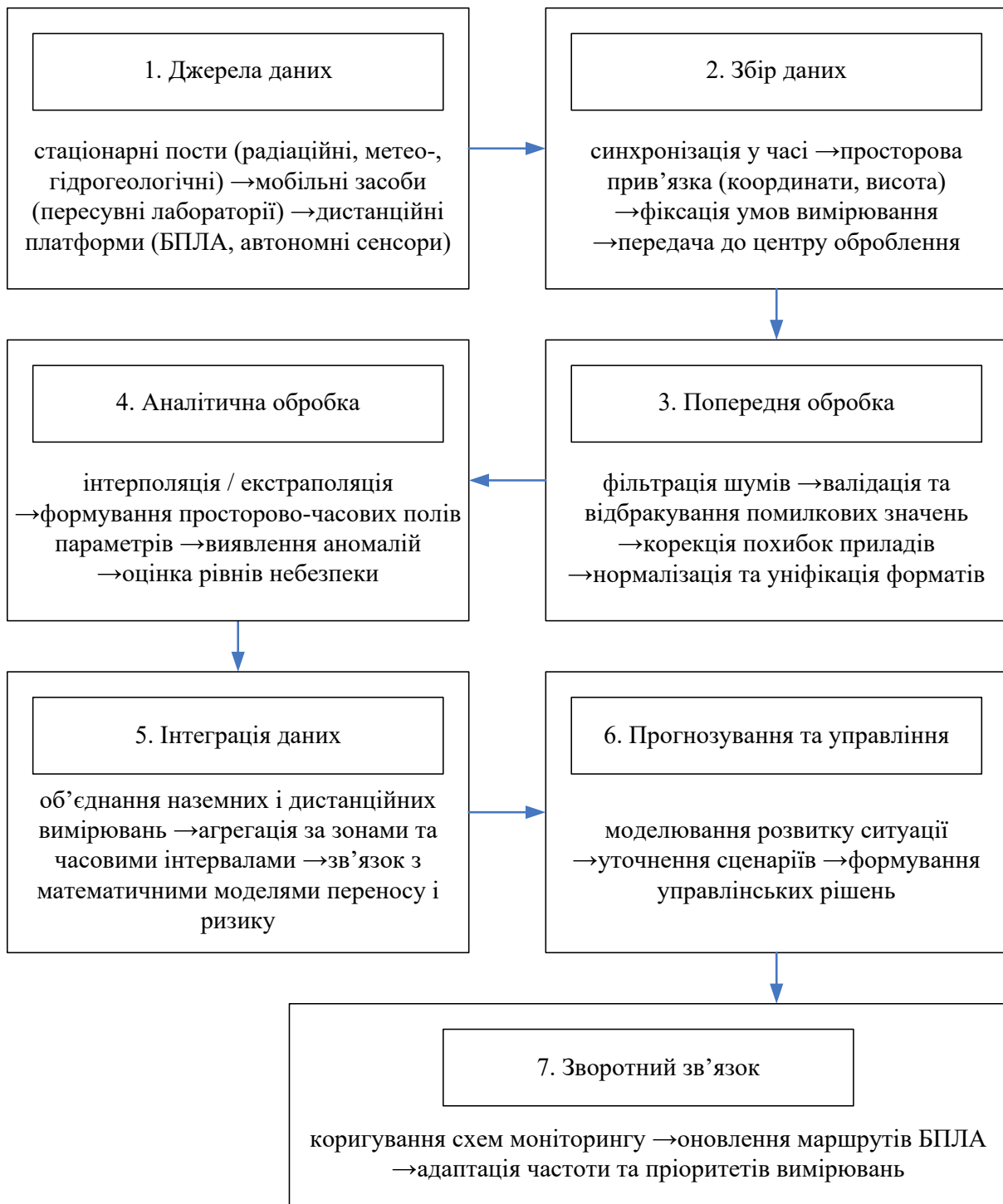


Рисунок 1: Схема алгоритму збору, оброблення та інтеграції моніторингових даних технології управління екологічною безпекою

Рівень підтримки управлінських рішень поєднує результати оцінки з механізмами практичного реагування. Він включає адаптивний розподіл ресурсів, автоматизоване формування рекомендацій для персоналу, узгодження дій із чинними планами та регламентами реагування на аварії.

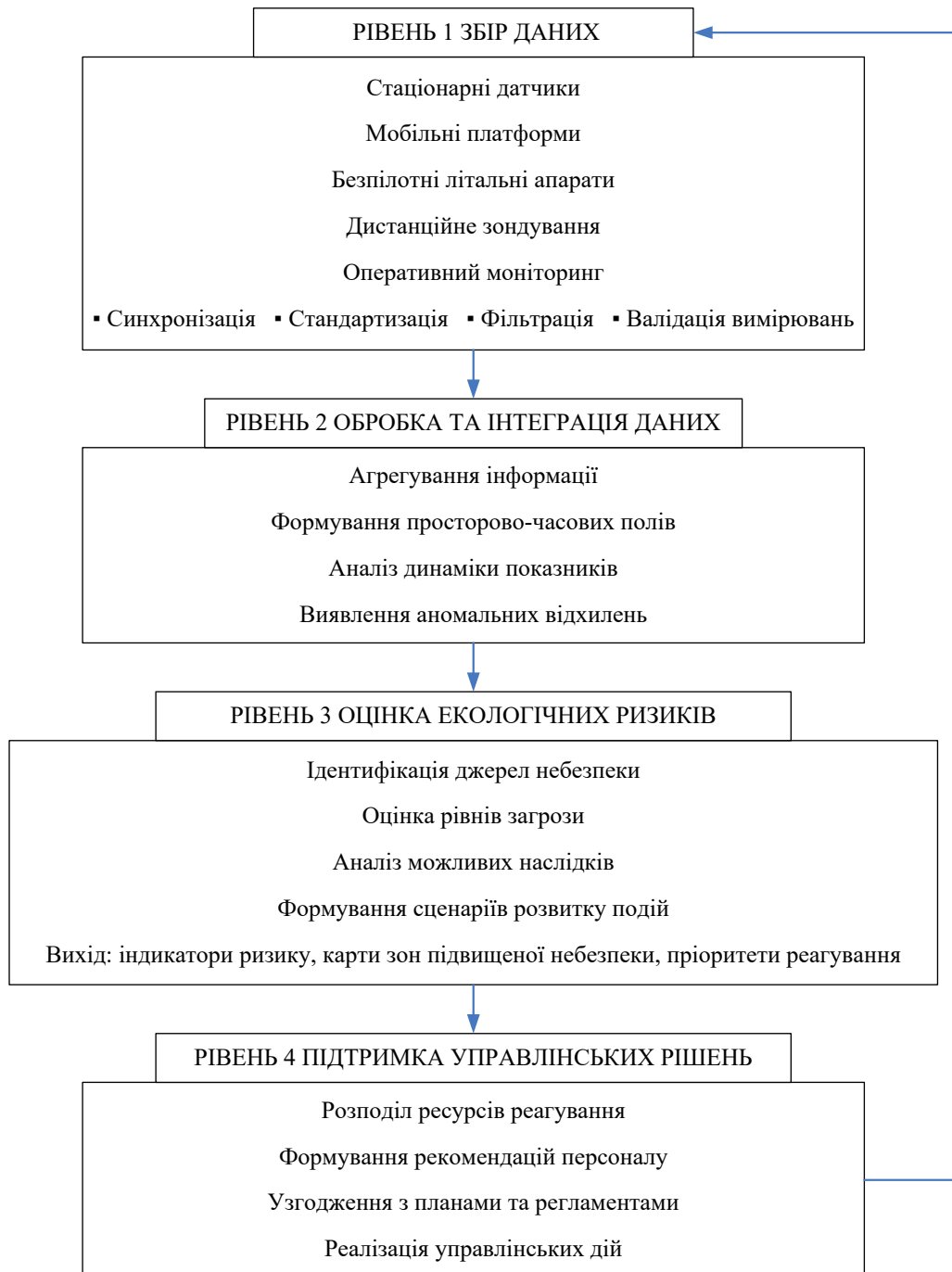


Рисунок 2: Структурно-логічна схема технології управління екологічною безпекою сховища ВЯП

Основою схеми є модульна архітектура, що дозволяє гнучко інтегрувати стаціонарні та мобільні сенсорні системи, автоматизовані засоби збору та передачі даних, а також алгоритми аналізу та прогнозування розвитку аварійної ситуації.

Логіка функціонування схеми:

1–2 рівні – інформаційний контур;

3 рівень – аналітико-оцінювальний контур;

4 рівень – управлінський контур з адаптацією.

Таким чином, структурно-логічна схема технології управління являє собою ієрархічну сукупність взаємопов'язаних функціональних блоків, що забезпечують безперервний цикл збору, оброблення, інтеграції та інтерпретації інформації про стан екологічної безпеки, її

оцінювання та формування управлінських рішень. Вона поєднує рівень первинного моніторингу, рівень аналітичної обробки й узагальнення даних, рівень оцінювання ризиків і сценаріїв розвитку ситуації та рівень підтримки прийняття рішень, між якими реалізовано механізми прямого та зворотного зв'язку.

Обговорення

Отримані результати свідчать, що управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, не може обмежуватися лише технічним контролем стану об'єкта. На відміну від штатних або регламентованих аварійних сценаріїв, у цьому випадку розвиток ситуації визначається одночасним впливом технічних, природних, інфраструктурних та організаційних чинників. Це обумовлює необхідність розгляду зони можливого радіаційного забруднення як багатокомпонентної системи, в межах якої джерело небезпеки, середовища перенесення радіонуклідів, об'єкти впливу та підсистема управління перебувають у постійній взаємодії.

Запропонована методична основа технології управління екологічною безпекою дозволяє перейти від фрагментарного реагування на окремі прояви аварійної ситуації до системно організованого процесу оцінювання, прогнозування та підтримки прийняття рішень. Її відмінність полягає в тому, що математичне моделювання, моніторингові спостереження та аналітичне опрацювання інформації розглядаються не як ізольовані елементи, а як взаємопов'язані складові єдиного управлінського циклу. Такий підхід створює передумови для узгодження дій персоналу, технічних засобів і процедур реагування в умовах неповноти даних та обмеженості ресурсів.

Результатом досліджень є розроблення алгоритму збору, оброблення та інтеграції моніторингових даних у межах технології управління екологічною безпекою. Його практичне значення полягає у можливості об'єднання первинних вимірювань, просторової інформації та розрахункових параметрів у межах єдиного інформаційного контуру. Це дає змогу не лише фіксувати наявність радіаційної аномалії, а й уточнювати її ймовірні межі, просторову конфігурацію та динаміку зміни під впливом процесів дифузії, адвекції, турбулентного розсіювання та осадження аерозолів.

Запропонована структурно-логічна схема технології управління підтверджує доцільність ієрархічної організації системи, в якій рівень первинного моніторингу, рівень аналітичної обробки даних, рівень оцінювання ризику та рівень підтримки прийняття рішень функціонують у взаємозв'язку. Наявність прямих і зворотних зв'язків між цими рівнями забезпечує адаптивність системи до змін зовнішніх умов, порушень інфраструктури та оновлення вхідної інформації.

Разом з тим результати дослідження мають певні обмеження. Запропонована технологія обґрунтована переважно на концептуальному та алгоритмічному рівнях і потребує подальшої параметричної верифікації на основі реальних даних моніторингу та сценарних розрахунків для конкретних об'єктів.

Висновки

1. Сукупність принципів, а саме системності, ієрархічності управління, ризик-орієнтованості, адаптивності, інформаційної інтегрованості, оперативності, превентивності, урахування ресурсних обмежень та узгодженості управлінських рішень, формує методичну основу технології управління екологічною безпекою в зоні розміщення сховища відпрацьованого ядерного палива та забезпечує узгоджене поєднання математичного моделювання, екологічного моніторингу й процедур підтримки прийняття рішень у межах єдиної системи управління.

2. Розроблений алгоритм пошуку та локалізації радіаційного забруднення, що виникає у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива внаслідок воєнних дій, спирається на поняття радіаційної аномалії як умовно нерухомої. Просторову мінливість аномалії враховують через процеси дифузії, адвекції, турбулентного розсіювання та осадження аерозолів. Запропонована формалізація зони забруднення як стохастичного поля концентрацій із часово-просторовою еволюцією дозволяє оцінювати ймовірні межі аномалії, локалізаційні інтервали та рівні екологічного ризику.

3. Структурно-логічна схема технології управління являє собою ієрархічну сукупність взаємопов'язаних функціональних блоків, що забезпечують безперервний цикл збору, оброблення, інтеграції та інтерпретації інформації про стан екологічної безпеки, її оцінювання та формування управлінських рішень. Вона поєднує рівень первинного моніторингу, рівень аналітичної обробки й узагальнення даних, рівень оцінювання ризиків і сценаріїв розвитку ситуації та рівень підтримки прийняття рішень, між якими реалізовано механізми прямого та зворотного зв'язку. Така схема забезпечує адаптивність технології управління до змін зовнішніх умов і стану інфраструктури, оперативне реагування на виявлені загрози та узгодженість дій персоналу й технічних засобів у межах єдиної системи управління екологічною безпекою.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. IAEA. *Storage of spent nuclear fuel*. IAEA Safety Standards Series No. SSG-15. Vienna, 2020. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1882_web.pdf
2. Dolin V. V., Lo Frano R., Kopylenko O. L., Cancemi S. A. Assessment of the behavior of spent nuclear fuel in Ukraine. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 2023. Vol. 2. P. 199–200. DOI: <https://doi.org/10.5194/sand-2-199-2023>.
3. Weiss C. et al. Assessment of spent nuclear fuel in Ukrainian storage system: inventory and performance. *Energies*, 2024. Vol. 17. No. 8. Art. 1945. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17081945>.
4. WENRA. *Waste and spent fuel storage safety reference levels*. 2024. URL: https://www.wenra.eu/sites/default/files/publications/WENRA_WGWD_StorageReport_v_2_3_January2024.pdf
5. Xu C., Wang Z., Tang S., Chi X., Zhu X., Li Y., Wang N. Research progress on thermal hydraulic characteristics of spent fuel pools: a review. *Energies*, 2023. Vol. 16. No. 10. Art. 3990. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16103990>.
6. Han X., Xu J., Li Y., Bai B., Chang Z., Zhang S., Wang S. Progress in passive spent fuel pool cooling system R&D based on heat pipe technology. *Progress in Nuclear Energy*, 2024. Vol. 175. Art. 105335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105335>.
7. IAEA. *Nuclear safety, security and safeguards in Ukraine*. GOV/2026/7. Vienna, 2026. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/gov2026-7.pdf>
8. OECD NEA. *Radiological protection during armed conflict: improving regulatory and operational resilience*. 2025. URL: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2025-01/nea_crpph_r_2024_3.pdf

9. Fan Y., Zhu X., Yang J., Xie H. A review on nuclear emergency preparedness and response management. *Annals of Nuclear Energy*, 2025. Vol. 219. Art. 111492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111492>.
10. Ardiny H., Beigzadeh A., Mahani H. Applications of unmanned aerial vehicles in radiological monitoring: a review. *Nuclear Engineering and Design*, 2024. Vol. 422. Art. 113110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113110>.
11. Рашкевич Н., Шевченко О., Рушак І., Крадожон В., Краснов В. Формування умов існування математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження. *Social Development and Security*, 2025. Т. 15. № 5. С. 151–161. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.5.12>.
12. 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>.
13. Рашкевич Н. В., Краснов В. А., Рашкевич О. С. Теорія і практика розробки інтегрованої моделі оцінювання забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на уражених територіях. *Техногенно-екологічна безпека*, 2025. 18(2/2025). С. 23–33. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2025.2.3>.
14. 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>.

References

1. IAEA. (2020). *Storage of spent nuclear fuel*. IAEA Safety Standards Series No. SSG-15. Vienna. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1882_web.pdf
2. Dolin, V.V., Lo Frano, R., Kopylenko, O.L., & Cancemi, S.A. (2023). Assessment of the behavior of spent nuclear fuel in Ukraine. *Safety of Nuclear Waste Disposal*, 2, 199–200. DOI: <https://doi.org/10.5194/sand-2-199-2023>.
3. Weiss, C., et al. (2024). Assessment of spent nuclear fuel in Ukrainian storage system: inventory and performance. *Energies*, 17(8), Article 1945. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17081945>.
4. WENRA. (2024). *Waste and spent fuel storage safety reference levels*. URL: https://www.wenra.eu/sites/default/files/publications/WENRA_WGWD_StorageReport_v_2_3_January2024.pdf
5. Xu, C., Wang, Z., Tang, S., Chi, X., Zhu, X., Li, Y., & Wang, N. (2023). Research progress on thermal hydraulic characteristics of spent fuel pools: a review. *Energies*, 16(10), Article 3990. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16103990>
6. Han, X., Xu, J., Li, Y., Bai, B., Chang, Z., Zhang, S., & Wang, S. (2024). Progress in passive spent fuel pool cooling system R&D based on heat pipe technology. *Progress in Nuclear Energy*, 175, Article 105335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105335>
7. IAEA. (2026). *Nuclear safety, security and safeguards in Ukraine*. GOV/2026/7. Vienna. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/documents/gov2026-7.pdf>
8. OECD NEA. (2025). *Radiological protection during armed conflict: improving regulatory and operational resilience*. URL: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2025-01/nea_crpph_r_2024_3.pdf
9. Fan, Y., Zhu, X., Yang, J., & Xie, H. (2025). A review on nuclear emergency preparedness and response management. *Annals of Nuclear Energy*, 219, Article 111492. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2025.111492>

10. Ardiny, H., Beigzadeh, A., & Mahani, H. (2024). Applications of unmanned aerial vehicles in radiological monitoring: a review. *Nuclear Engineering and Design*, 422, Article 113110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113110>
11. Rashkevich, N., Shevchenko, O., Rushchak, I., Kradozhon, V., & Krasnov, V. (2025). Formulation of the Conditions for the Existence of a Mathematical Model for Emergency Prevention in Areas Contaminated by Residues of Rocket and Artillery Strikes. *Social Development & Security*, 15(5), 151-161. <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.5.12> [in Ukrainian].
12. Krasnov, V.A., & Rashkevich, N.V. (2025). Otsinka radiatsiinoho vplyvu pid chas avarii na skhovyshchi vidpratsovanoho yadernoho palyva. *Komunalne hospodarstvo mist. Seriya: Informatsiini tekhnologii ta inzheneriia*, 6(194), 74–81. DOI: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-74-81> [in Ukrainian].
13. Rashkevich, N.V., Krasnov, V.A., & Rashkevich, O.S. (2025). Teoriia i praktyka rozrobky intehrovanoi modeli otsiniuvannia zabrudnennia gruntiv ta gruntovykh vod na urazhenykh terytoriiakh. *Tekhnohenko-ekolohichna bezpeka*, 18(2/2025), 23–33. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2025.2.3> [in Ukrainian].
14. Rashkevich, N.V., Krasnov, V.A., & Huz, A.S. (2025). Protsedury heoprostorovoho profiliuvannia terytorii mozhlyvoho radiatsiinoho zabrudnennia vnaslidok raketno-artyleryiiskykh urazhen. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu*, 111, 158–165. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.158> [in Ukrainian].



This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.