

Національний університет цивільного захисту України
Державної служби України з надзвичайних ситуацій

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Краснов Вячеслав Анатолійович

УДК 504.064.3

ДИСЕРТАЦІЯ
ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ У РАЗІ АВАРІЇ НА
СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА,
СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ

Спеціальність – 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Галузь знань – 18 «Виробництво та технології»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ В.А. Краснов

Наукові керівники:

Кондратенко Олександр Миколайович, доктор технічних наук, професор;

Рашкевич Ніна Владиславна, PhD, доцент

Черкаси – 2026

АНОТАЦІЯ

Краснов В.А. Забезпечення екологічної безпеки у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю – Технології захисту навколишнього середовища. Національний університет цивільного захисту України, Державна служба України з надзвичайних ситуацій, м. Черкаси, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального науково-практичного завдання в галузі технології захисту навколишнього природного середовища, а саме розроблено методику управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, на основі розподілу пошуково-вимірнювального ресурсу за пріоритетними зонами контролю, результатів дистанційного та інструментального моніторингу, математичного моделювання поширення небезпечних чинників і оцінювання екологічного ризику як складових технології захисту навколишнього природного середовища.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, визначено її зв'язок із науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про особистий внесок здобувача, апробацію результатів, публікації, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі «СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СХОВИЩ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА» проведено аналіз сучасного стану забезпечення екологічної безпеки об'єктів поводження з відпрацьованим ядерним паливом. Розглянуто практику зберігання ВЯП у світі та Україні, охарактеризовано вологі й сухі

сховища, централізоване зберігання, а також перспективи довгострокового поводження з відпрацьованим ядерним паливом.

Встановлено, що сухе контейнерне зберігання є одним з основних підходів до проміжного та довгострокового поводження з відпрацьованим ядерним паливом після зниження його залишкового тепловиділення. Показано, що в Україні сформовано відповідну інфраструктуру, яка включає сухі сховища на майданчиках ядерних об'єктів і централізоване сховище у зоні відчуження.

Проаналізовано нормативно-правову базу, яка регламентує вимоги до ядерної та радіаційної безпеки, фізичного захисту, поводження з ядерним паливом, оцінювання впливу на навколишнє природне середовище та радіаційного контролю. Встановлено, що чинні підходи переважно орієнтовані на штатну експлуатацію, проєктні аварії, природні й техногенні впливи мирного часу. Водночас аварія, спричинена воєнними діями, потребує врахування механічного пошкодження об'єкта, обмеженого доступу до окремих ділянок, ускладненого інструментального контролю та неповноти первинної інформації.

Розглянуто заходи захисту сухих сховищ ВЯП, зокрема інженерні бар'єри, радіаційний і фізичний захист, тепловідведення, контроль старіння, аварійну готовність і моніторинг довкілля. Показано, що у разі аварії, спричиненої воєнними діями, така система має бути доповнена процедурами оперативного контролю стану прилеглих територій та обґрунтуванням заходів щодо локалізації можливого радіоактивного забруднення.

Проаналізовано системи екологічного та радіаційного моніторингу в зонах впливу ядерних об'єктів. Обґрунтовано доцільність поєднання стаціонарних постів контролю, мобільних лабораторій, лабораторного аналізу проб, геоінформаційних інструментів і дистанційного моніторингу із застосуванням безпілотних літальних апаратів.

У другому розділі «НЕБЕЗПЕЧНІ ЧИННИКИ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СУХОГО СХОВИЩА

ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА У РАЗІ АВАРІЇ, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ» систематизовано небезпечні чинники аварійного впливу на сухе сховище ВЯП. До них віднесено механічне пошкодження контейнерів і захисних конструкцій, порушення умов тепловідведення, утворення радіоактивного пилу й аерозолів, забруднення поверхонь і ґрунтового покриву, обмеження доступу до окремих ділянок та неповноту первинної інформації.

Обґрунтовано систему критеріїв оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища ВЯП. Вона охоплює радіаційні, середовищні, просторові, часові та інформаційно-вимірні показники, що характеризують стан повітряного середовища, ґрунтового покриву, поверхневого стоку, водних об'єктів і прилеглих територій.

Проаналізовано потенційні шляхи поширення радіоактивного забруднення у зоні впливу сухого сховища ВЯП. До них належать атмосферне перенесення пилу й аерозолів, сухе та вологе осадження, поверхневий стік, міграція в ґрунтовому покриві, потрапляння до водного середовища та механічне перенесення забруднених матеріалів. Урахування цих шляхів є необхідним для визначення меж можливого радіоактивного забруднення та вибору ділянок першочергового обстеження.

Сформовано основу для подальшого математичного моделювання моніторингу стану навколишнього природного середовища сухого сховища ВЯП. Вона поєднує небезпечні чинники аварійного впливу, критерії оцінювання стану довкілля, шляхи поширення радіоактивного забруднення та показники можливих екологічних наслідків.

У третьому розділі «МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА У ЗОНІ ВПЛИВУ СУХОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА У РАЗІ АВАРІЇ, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ» розроблено математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища ВЯП.

Просторово-часовий розвиток екологічної небезпеки розглянуто через поділ території на ділянки контролю, у межах яких можливе виникнення, поширення або накопичення радіоактивного забруднення. Для кожної ділянки враховуються показники стану довкілля, рівень потенційної небезпеки, доступність, інформаційна невизначеність і потреба в пошуково-вимірювальних діях.

Задачу моніторингу зон можливого аварійного радіоактивного забруднення сформульовано як пошуково-вимірювальну задачу. Зона можливого аварійного забруднення розглядається як об'єкт пошуку з невизначеним просторовим положенням, яке уточнюється за результатами дистанційного обстеження, інструментальних вимірювань та апостеріорного оновлення інформації.

Розроблено математичні закономірності розподілу пошуково-вимірювального ресурсу за пріоритетними зонами контролю. Встановлено зв'язок між апріорною ймовірністю формування зони можливого радіоактивного забруднення, коефіцієнтом пріоритетності ділянки, ефективністю виявлення, доступним ресурсом обстеження, параметрами маршруту та технічними характеристиками безпілотних літальних апаратів.

Показано, що раціональна стратегія моніторингу має передбачати нерівномірний розподіл пошуково-вимірювального ресурсу з урахуванням рівня небезпеки, інформаційної невизначеності, обмеження доступу, площі покриття та очікуваної ймовірності виявлення небезпечної зміни.

У четвертому розділі «МЕТОДИКА УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ У РАЗІ АВАРІЇ НА СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ» розроблено відповідну методику управління екологічною безпекою.

Методика ґрунтується на принципах компонентної орієнтації оцінювання стану навколишнього природного середовища, просторового ранжування території за рівнем потенційної небезпеки, поєднання дистанційного, інструментального та лабораторного контролю, поетапного

оновлення інформації після кожного циклу моніторингу, використання результатів математичного моделювання, урахування обмежень безпеки персоналу та відповідності природоохоронних заходів установленому рівню екологічної небезпеки.

Методика побудована на поєднанні трьох функціональних блоків: аналітично-розрахункового, пошуково-вимірювального та управлінського. Аналітично-розрахунковий блок забезпечує визначення пріоритетних зон контролю. Пошуково-вимірювальний блок спрямований на уточнення стану можливого радіоактивного забруднення за результатами БпЛА-обстеження, наземного контролю та лабораторного аналізу. Управлінський блок забезпечує класифікацію стану ділянок за рівнем екологічної небезпеки, вибір контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів та повторну перевірку їх результативності.

Запропонована методика включає послідовний цикл процедур: від фіксації аварійного впливу, ідентифікації небезпечних чинників, формування ділянок контролю, розрахунку їхньої пріоритетності та визначення множини першочергового обстеження до побудови маршруту БпЛА, проведення дистанційного контролю, виявлення радіаційної аномалії або зони можливого радіоактивного забруднення, апостеріорного уточнення положення небезпечної зони, наземного й лабораторного підтвердження, класифікації рівня екологічної небезпеки, вибору природоохоронних заходів і повторного контролю їх результативності.

У п'ятому розділі «ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ У РАЗІ АВАРІЇ НА СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ» проведено розрахунково-сценарну перевірку достовірності математичної моделі моніторингу та результативності методики управління екологічною безпекою.

Перевірку виконано для чотирьох сценаріїв: локального механічного пошкодження, утворення радіоактивного пилу або аерозолів, забруднення

технологічних покриттів із подальшим перенесенням поверхневим стоком, а також аварійного впливу за умов невизначеного місця пошкодження та обмеженого доступу.

Встановлено, що у трьох сценаріях коефіцієнт охоплення небезпечних ділянок становить 1,00, а у сценарії з невизначеним місцем пошкодження та обмеженим доступом – 0,80. Показано, що пріоритетне обстеження дає змогу виявити основну частину небезпечних ділянок після перевірки 40–60 % території.

За тривалості БпЛА-обстеження близько 20 хв і швидкості польоту до 4–5 м/с досягаються імовірність виявлення радіаційної аномалії 0,84, коефіцієнт покриття 0,84 та зменшення інформаційної невизначеності не менше ніж на 50 %. Після виконання природоохоронних заходів середнє значення інтегрального показника екологічної безпеки зменшилося з 0,65 до 0,37, тобто приблизно на 43 %. Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої моделі та методики для визначення пріоритетних зон контролю, уточнення стану можливого радіоактивного забруднення й вибору природоохоронних заходів.

У шостому розділі «ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ У РАЗІ АВАРІЇ НА СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ» розроблено практичні рекомендації щодо застосування результатів дисертаційного дослідження.

Запропоновані рекомендації визначають порядок організації екологічного та радіаційного моніторингу у зоні впливу сховища, поєднання стаціонарних, мобільних, дистанційних і лабораторних засобів контролю, встановлення пріоритетних ділянок обстеження, уточнення меж можливого радіоактивного забруднення та вибір природоохоронних заходів за результатами математичного моделювання.

Практичне застосування рекомендацій передбачає послідовний перехід від фіксації аварійного впливу та збору первинної інформації до ранжування

ділянок контролю, проведення БпЛА-обстеження, наземного й лабораторного підтвердження, визначення режиму кожної ділянки та повторної перевірки результативності виконаних дій.

Наукова новизна отриманих результатів:

– уперше розроблено математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями. У моделі зона можливого аварійного забруднення розглядається як об'єкт пошуку з невизначеним просторовим положенням, що уточнюється на основі апріорних і апостеріорних ймовірностей, результатів дистанційного обстеження, інструментальних вимірювань, пошуково-вимірювальних ресурсів та ефективності виявлення. Модель враховує пріоритетність ділянок контролю, обмеження доступу, інформаційну невизначеність, технічні характеристики БпЛА і часові обмеження, що дає змогу обґрунтовувати черговість обстеження території, розподіляти ресурс і уточнювати положення потенційно небезпечних зон.

– уперше розроблено методику управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, яка поєднує аналітично-розрахунковий, пошуково-вимірювальний та управлінський блоки. Методика охоплює послідовний цикл процедур: фіксацію аварійного впливу, ідентифікацію небезпечних чинників, формування ділянок контролю, розрахунок їхньої пріоритетності, визначення першочергових зон обстеження, побудову маршруту БпЛА, дистанційний контроль, уточнення положення небезпечної зони, наземне й лабораторне підтвердження, класифікацію рівня екологічної безпеки, вибір природоохоронних заходів та повторний контроль їх результативності.

– удосконалено систему оцінювання стану екологічної безпеки у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями, шляхом поєднання небезпечних чинників, критеріїв стану компонентів довкілля, шляхів поширення радіоактивного

забруднення та показників інформаційної невизначеності. На відміну від підходів, орієнтованих переважно на радіаційний контроль і технічний стан об'єкта, запропонована система дає змогу визначати пріоритетні зони пошуково-вимірального контролю, уточнювати кількісні та якісні характеристики географічних меж екологічної небезпеки та обґрунтовувати подальші природоохоронні заходи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої методики для організації моніторингу у зоні впливу сухого сховища ВЯП, визначення пріоритетних ділянок обстеження, планування маршрутів БпЛА, уточнення меж можливого радіоактивного забруднення, вибору природоохоронних заходів і повторної перевірки їх результативності в умовах аварії, спричиненої воєнними діями.

Отримані результати дисертаційного дослідження, зокрема математична модель моніторингу стану та методика управління екологічною безпекою сховища відпрацьованого ядерного палива впроваджені у науково-дослідну діяльність Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України та практичну діяльність КП ХМР «САНІТАРНО-ЕКОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР» для аналізу техногенно-екологічних ризиків, підготовки інженерно-аналітичних рішень і розширення можливостей комплексного екологічного моніторингу радіаційно-небезпечних об'єктів.

Ключові слова: екологічна безпека, сухе сховище відпрацьованого ядерного палива, аварія, воєнні дії, радіоактивне забруднення, моніторинг, математичне моделювання, безпілотний літальний апарат.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. 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>.

Особисто здобувачем проаналізовано умови формування небезпеки на забруднених територіях, узагальнено чинники просторово-часового поширення небезпечних речовин та обґрунтовано підходи до математичного опису зон екологічної небезпеки.

2. Рашкевич Н.В., Мележик Р.С., Перегін А.В., **Краснов В.А.** Оцінка забруднення ґрунтів у районах ураження ракетно-артилерійських систем за показниками електропровідності. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2025. № 2(42). С. 294–303. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2025-42-19>.

Особисто здобувачем проаналізовано підходи до оцінювання забруднення ґрунтів у районах воєнного ураження, обґрунтовано використання показників електропровідності та узагальнено результати для формування критеріїв екологічної безпеки.

3. **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>.

Особисто здобувачем сформовано постановку задачі оцінювання радіаційного впливу, визначено чинники радіаційної небезпеки та обґрунтовано необхідність поєднання радіаційного контролю з математичним моделюванням.

4. 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>.

Особисто здобувачем проаналізовано особливості забруднення ґрунтів та ґрунтових вод, обґрунтовано підходи до інтегрованого оцінювання стану довкілля та використання результатів моделювання для просторового зонування території.

5. 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>.

Особисто здобувачем розроблено підходи до геопросторового профілювання території можливого радіаційного забруднення та обґрунтовано процедури виділення ділянок першочергового обстеження.

6. **Краснов В.**, Рашкевич Н., Шевченко О., Погрібна Ю., Тригуб В. Розробка технології управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива. *Social Development and Security*. 2026. Vol. 16, No. 2. P. 173–185. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.15>.

Особисто здобувачем розроблено структурну побудову методики управління екологічною безпекою сухого сховища ВЯП, обґрунтовано поєднання аналітично-розрахункового, пошуково-вимірювального та управлінського блоків і визначено послідовність вибору природоохоронних заходів.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Смірнов А. В., **Краснов В. А.**, Сербин В. А. Оцінка екологічного стану території навколо сховища відпрацьованого ядерного палива. *Безпека людини у сучасних умовах* : збірник доповідей XVII Міжнародної науково-методичної конференції, м. Харків, 4–5 грудня 2025 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 152–153. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28291>.

Особисто здобувачем проаналізовано чинники впливу на екологічний стан території навколо сховища ВЯП, визначено основні показники контролю стану довкілля та обґрунтовано необхідність поєднання радіаційного моніторингу з просторовим аналізом прилеглих територій.

8. Рашкевич Н. В., Шевченко О. С., **Краснов В. А.** Моделювання процесу пошуку джерел забруднення водних об'єктів в умовах сучасних військових загроз. *Maritime Security of the Baltic-Black Sea Region: Challenges and Threats* : proceedings of the V International Scientific Conference. Riga : Baltija Publishing, 2025. P. 42–45. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26737>.

Особисто здобувачем обґрунтовано постановку задачі пошуку джерел забруднення в умовах військових загроз, визначено чинники просторової невизначеності та запропоновано підходи до розподілу пошукових дій у зоні можливого радіоактивного забруднення.

9. **Краснов В. А.**, Рашкевич Н. В. Підходи до оцінювання техногенно-екологічних наслідків ракетно-артилерійських уражень. *Problems of Emergency Situations* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси : НУЦЗ України, 2026. С. 452–453. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28455>.

Особисто здобувачем систематизовано підходи до оцінювання техногенно-екологічних наслідків ракетно-артилерійських уражень, визначено основні небезпечні чинники та обґрунтовано необхідність урахування просторового поширення забруднення, обмеження доступу і неповноти первинної інформації.

10. **Краснов В. А.**, Рашкевич Н. В., Рашкевич О. С. Моніторинг територій навколо сховищ відпрацьованого ядерного палива. *Інформаційні технології в сучасному світі* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених. Харків : Державний біотехнологічний університет, 2026. С. 353–356. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28456>.

Особисто здобувачем обґрунтовано необхідність моніторингу територій навколо сховищ ВЯП, визначено роль стаціонарних, мобільних і дистанційних засобів контролю та запропоновано підходи до встановлення пріоритетних ділянок обстеження.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Kondratenko O. M., Andronov V. A., Polishchuk T. R., Kasionkina N. D., **Krasnov V. A.** Accounting the emissions of engine fuel vapors in the criteria-based assessment of the ecological safety level of power plants with reciprocating ICE exploitation process. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2022. № 1. С. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.1.06>.

Особисто здобувачем проаналізовано підходи до критеріального оцінювання екологічної безпеки техногенних об'єктів, узагальнено вплив викидів забруднювальних речовин та обґрунтовано використання інтегральних показників для оцінювання екологічної небезпеки.

2. Кондратенко О. М., Андронов В. А., Строков О. П., Бабакін В. М., **Краснов В. А.** Інструментальна похибка відомих формул перерахунку показників димності у показники токсичності відпрацьованих газів поршневих ДВЗ. *Technogenic and Ecological Safety*. 2022. № 12(2/2022). С. 3–18. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2022.2.1>.

Особисто здобувачем проаналізовано відомі формули перерахунку показників димності у показники токсичності відпрацьованих газів поршневих двигунів внутрішнього згорання, взято участь в оцінюванні інструментальної похибки цих залежностей та узагальненні результатів розрахунків.

3. Kondratenko O. M., **Krasnov V. A.**, Semykin M. V. The place of DPF with a liquid working body in the classification of atmospheric air protection technologies from the complex negative influence of power plants with reciprocating ICE. *Technogenic and Ecological Safety*. Харків : НУЦЗУ, 2023. № 14(2/2023). С. 67–91. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2023.2.8>.

Особисто здобувачем проаналізовано місце фільтрів твердих частинок із рідким робочим тілом у системі технологій захисту атмосферного повітря, узагальнено їх функціональне призначення та взято участь у класифікації засобів зменшення негативного впливу енергетичних установок із поршневими двигунами внутрішнього згорання.

4. Kondratenko O. M., **Krasnov V. A.** Development of the mobile disassembly test bench for experimental study of the ecological safety level of exploitation of firefighting and emergency-rescue equipment with reciprocating ICE and the performance characteristics of the executive devices of EPT. *Technogenic and Ecological Safety*. 2025. № 17(1/2025). P. 37–47. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2025.1.4>.

Особисто здобувачем взято участь у розробленні мобільного розбірного експериментального стенда для дослідження рівня екологічної безпеки експлуатації пожежно-рятувальної техніки з поршневими двигунами внутрішнього згорання, обґрунтовано його функціональне призначення та проаналізовано можливості використання стенда для оцінювання робочих характеристик виконавчих пристроїв природоохоронних технологій.

5. **Krasnov V. A.**, Kondratenko O. M. Portable test bench for experimental research of the working characteristics of executive elements of environmental protection technologies against the influence of power plants with reciprocating ICE. *Екологічна безпека в умовах війни* : збірник тез доповідей V Міжнародної

науково-практичної конференції, м. Львів, 21 листопада 2024 р. Львів : ЛДУБЖД, 2024. С. 45–46. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22441>.

Особисто здобувачем обґрунтовано призначення переносного експериментального стенда для дослідження робочих характеристик виконавчих елементів природоохоронних технологій, визначено його функціональні можливості та взято участь у формуванні підходу до експериментального оцінювання ефективності засобів захисту довкілля від впливу енергетичних установок із поршневыми двигунами внутрішнього згорання.

6. Kondratenko O., **Krasnov V.** Designing and developing of portable dismountable test bench for experimental research of the working characteristics of executive elements of environmental protection technologies against the influence of power plants with reciprocating ICE. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії* : збірник тез та доповідей міжнародної конференції, м. Харків, 11–12 березня 2025 р. Харків : ФОП Бровін О. В., 2025. С. 185–188. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26321>.

Особисто здобувачем взято участь у проектуванні переносного розбірного експериментального стенда для дослідження робочих характеристик виконавчих елементів природоохоронних технологій, обґрунтовано його конструктивні та функціональні особливості, а також можливість застосування для оцінювання засобів зменшення негативного впливу енергетичних установок із поршневыми двигунами внутрішнього згорання.

7. Кондратенко О. М., **Краснов В. А.** Розробка пересувного експериментального стенду для дослідження показників екологічної безпеки пожежно-рятувального транспорту. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : матеріали доповідей XXXIII Міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025, м. Харків, 14–17 травня 2025 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 196. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/26345/1/%D0%9A%D0%BE%>

D0%BD%D1%84_%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D1%80%D0%B0%
D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%9E%D0%9C_%D0%94%
D0%92%D0%97_MicroCAD-2025.pdf.

Особисто здобувачем взято участь у розробленні пересувного експериментального стенда для дослідження показників екологічної безпеки пожежно-рятувального транспорту, обґрунтовано його призначення та визначено можливість використання для оцінювання впливу технічних засобів із поршневыми двигунами внутрішнього згоряння на стан довкілля.

ABSTRACT

Krasnov V. A. Ensuring environmental safety in the event of an accident at a dry spent nuclear fuel storage facility caused by military actions. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty – Environmental protection technologies. National university of civil protection of Ukraine, State emergency service of Ukraine, Cherkasy, 2026.

The dissertation is devoted to solving an urgent scientific and practical task in the field of environmental protection technologies, namely the development of a methodology for managing ecological safety in the event of an accident at a dry spent nuclear fuel storage facility caused by military actions. The methodology is based on the distribution of search-and-measurement resources among priority control zones, the results of remote and instrumental monitoring, mathematical modelling of the spread of hazardous factors, and ecological risk assessment as components of environmental protection technology.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation research topic, defines its connection with scientific programmes, plans and research topics, formulates the aim and objectives of the study, identifies the object, subject and methods of research, presents the scientific novelty and practical significance of the obtained results, and provides information on the personal contribution of the applicant, approbation of the results, publications, structure and scope of the dissertation.

The first chapter, “CURRENT STATE OF ENSURING ENVIRONMENTAL SAFETY OF SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITIES”, analyses the current state of ensuring environmental safety at facilities for the management of spent nuclear fuel. The practice of spent nuclear fuel (SNF) storage in the world and in Ukraine is considered; wet and dry storage

facilities, centralized storage, and prospects for long-term management of spent nuclear fuel are characterized.

It has been established that dry cask storage is one of the main approaches to the interim and long-term management of spent nuclear fuel after the reduction of its residual heat generation. It is shown that Ukraine has developed the relevant infrastructure, which includes dry storage facilities at nuclear facility sites and a centralized storage facility in the exclusion zone.

The regulatory and legal framework governing the requirements for nuclear and radiation safety, physical protection, nuclear fuel management, environmental impact assessment and radiation monitoring has been analysed. It has been established that the current approaches are mainly focused on normal operation, design-basis accidents, and natural and technogenic impacts typical of peacetime conditions. At the same time, an accident caused by military actions requires consideration of mechanical damage to the facility, restricted access to certain areas, complicated instrumental monitoring and incomplete initial information.

Protective measures for dry SNF storage facilities are considered, including engineering barriers, radiation and physical protection, heat removal, ageing management, emergency preparedness and environmental monitoring. It is shown that under conditions of military threats, such a system should be supplemented with procedures for operational monitoring of the state of adjacent territories and justification of actions aimed at localizing possible contamination.

Environmental and radiation monitoring systems in the impact zones of nuclear facilities have been analysed. The expediency of combining stationary monitoring posts, mobile laboratories, laboratory analysis of samples, geographic information tools and remote monitoring using unmanned aerial vehicles has been substantiated.

The second chapter, “HAZARDOUS FACTORS AND CRITERIA FOR ASSESSING THE ENVIRONMENTAL SAFETY STATUS OF A DRY SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITY IN THE EVENT OF AN ACCIDENT

CAUSED BY MILITARY ACTIONS”, systematizes the hazardous factors of accident impact on a dry SNF storage facility. These include mechanical damage to containers and protective structures, disruption of heat removal conditions, formation of radioactive dust and aerosols, contamination of surfaces and soil cover, restricted access to certain areas and incomplete initial information.

A system of criteria for assessing the environmental safety status of a dry SNF storage facility has been substantiated. It includes radiation, environmental, spatial, temporal and information-measurement indicators that characterize the state of the air environment, soil cover, surface runoff, water bodies and adjacent territories.

Potential pathways for the spread of radioactive contamination within the impact zone of a dry SNF storage facility have been identified. These include atmospheric transport of dust and aerosols, dry and wet deposition, surface runoff, migration within the soil cover, entry into the aquatic environment, and mechanical transfer of contaminated materials. Taking these pathways into account is necessary for determining the boundaries of possible contamination and selecting areas for priority survey.

A basis has been formed for further mathematical modelling of monitoring the environmental safety status of a dry SNF storage facility. It combines hazardous factors of accident impact, criteria for assessing the state of the environment, pathways of radioactive contamination spread, and indicators of possible environmental consequences.

The third chapter, “MATHEMATICAL MODEL FOR MONITORING THE STATE OF THE NATURAL ENVIRONMENT IN THE IMPACT ZONE OF A DRY SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITY IN THE EVENT OF AN ACCIDENT CAUSED BY MILITARY ACTIONS”, develops a mathematical model for monitoring the state of the natural environment in the impact zone of a dry SNF storage facility.

The spatio-temporal development of environmental hazard is considered through the division of the territory into control areas within which radioactive

contamination may occur, spread or accumulate. For each area, indicators of the environmental state, the level of potential hazard, accessibility, information uncertainty and the need for survey-and-measurement operations are taken into account.

The task of monitoring zones of possible accident-related contamination is formulated as a survey-and-measurement task. The zone of possible accident-related contamination is considered as a search object with an uncertain spatial location, which is refined based on the results of remote survey, instrumental measurements and posterior updating of information.

Mathematical regularities have been developed for the distribution of survey-and-measurement operations among priority control zones. The relationship has been established between the prior probability of formation of a possible contamination zone, the priority coefficient of an area, detection efficiency, the available survey resource, route parameters and the technical characteristics of unmanned aerial vehicles.

It is shown that a rational monitoring strategy should provide for an uneven distribution of survey-and-measurement resources, taking into account the level of hazard, information uncertainty, access restrictions, coverage area and the expected probability of detecting a hazardous change.

The fourth chapter, “**METHODOLOGY FOR MANAGING ECOLOGICAL SAFETY IN THE EVENT OF AN ACCIDENT AT A DRY SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITY CAUSED BY MILITARY ACTIONS**”, develops the corresponding methodology for managing ecological safety.

The methodology is based on the principles of component-oriented assessment of the state of the natural environment, spatial ranking of the territory according to the level of potential hazard, combination of remote, instrumental and laboratory control, phased updating of information after each monitoring cycle, use of mathematical modelling results, consideration of personnel safety restrictions and

correspondence of environmental protection measures to the established level of environmental hazard.

The methodology is based on the combination of three functional blocks: analytical-and-calculation, survey-and-measurement, and management. The analytical-and-calculation block ensures the identification of priority control zones. The survey-and-measurement block is aimed at refining the state of possible contamination based on the results of UAV survey, ground control and laboratory analysis. The management block ensures the classification of areas according to the level of environmental hazard, the selection of control, restrictive and environmental protection actions, and repeated verification of their effectiveness.

The proposed methodology includes a sequential cycle of procedures: from recording the accident impact, identifying hazardous factors, forming control areas, calculating their priority and determining the set of areas for priority survey to constructing a UAV route, conducting remote control, detecting a radiation anomaly or a zone of possible contamination, posterior refinement of the location of the hazardous zone, ground and laboratory confirmation, classification of the environmental hazard level, selection of environmental protection actions and repeated control of their effectiveness.

The fifth chapter, “VERIFICATION OF THE RELIABILITY OF THE MATHEMATICAL MODEL AND THE METHODOLOGY FOR MANAGING ECOLOGICAL SAFETY IN THE EVENT OF AN ACCIDENT AT A DRY SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITY CAUSED BY MILITARY ACTIONS”, presents a calculation-and-scenario verification of the reliability of the mathematical monitoring model and the effectiveness of the methodology for managing ecological safety.

The verification was performed for four scenarios: local mechanical damage, formation of radioactive dust or aerosols, contamination of technological surfaces with subsequent transfer by surface runoff, and accident impact under conditions of an uncertain damage location and restricted access.

It has been established that in three scenarios the coverage coefficient of hazardous areas is 1.00, while in the scenario with an uncertain damage location and restricted access it is 0.80. It is shown that priority survey makes it possible to detect the main part of hazardous areas after inspecting 40–60% of the territory.

With a UAV survey duration of approximately 20 minutes and a flight speed of up to 4–5 m/s, a probability of detecting a radiation anomaly of 0.84, a coverage coefficient of 0.84, and a reduction in information uncertainty of not less than 50% are achieved. After the implementation of environmental protection measures, the average value of the integral environmental hazard indicator decreased from 0.65 to 0.37, i.e. by approximately 43%. The obtained results confirm the operability of the proposed model and methodology for identifying priority control zones, refining the state of possible contamination, and selecting environmental protection measures.

The sixth chapter, “PRACTICAL RECOMMENDATIONS FOR APPLYING THE RESEARCH RESULTS TO ENSURE ECOLOGICAL SAFETY IN THE EVENT OF AN ACCIDENT AT A DRY SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE FACILITY CAUSED BY MILITARY ACTIONS”, develops practical recommendations for applying the results of the dissertation research.

The proposed recommendations define the procedure for organizing environmental and radiation monitoring in the impact zone of the storage facility, combining stationary, mobile, remote, and laboratory means of control, establishing priority survey areas, refining the boundaries of possible contamination, and selecting environmental protection measures based on the results of mathematical modelling.

The practical application of the recommendations provides for a sequential transition from recording the accident impact and collecting initial information to ranking control areas, conducting a UAV survey, ground and laboratory confirmation, determining the regime for each area, and repeated verification of the effectiveness of the actions performed.

Scientific novelty of the obtained results:

– for the first time, a mathematical model has been developed for monitoring the state of the natural environment in the impact zone of a dry spent nuclear fuel storage facility in the event of an accident caused by military actions. In the model, the zone of possible accidental contamination is considered as a search object with an uncertain spatial location, which is refined on the basis of prior and posterior probabilities, the results of remote surveys, instrumental measurements, search-and-measurement effort, and detection efficiency. The model takes into account the priority of control areas, access restrictions, information uncertainty, technical characteristics of UAVs, and time constraints, which makes it possible to substantiate the sequence of territory surveys, allocate resources, and clarify the location of potentially hazardous zones.

– for the first time, a methodology has been developed for managing ecological safety in the event of an accident at a dry spent nuclear fuel storage facility caused by military actions, which combines analytical-and-calculation, search-and-measurement, and management blocks. The methodology covers a sequential cycle of procedures: recording the accident impact, identifying hazardous factors, forming control areas, calculating their priority, determining priority survey zones, constructing a UAV route, conducting remote monitoring, clarifying the location of the hazardous zone, carrying out ground-based and laboratory confirmation, classifying the level of ecological hazard, selecting environmental protection measures, and performing repeated control of their effectiveness.

– the system for assessing the state of ecological safety in the impact zone of a dry spent nuclear fuel storage facility in the event of an accident caused by military actions has been improved by combining hazardous factors, criteria for the state of environmental components, pathways of radioactive contamination spread, and indicators of information uncertainty. Unlike approaches focused mainly on radiation monitoring and the technical condition of the facility, the proposed system makes it possible to determine priority zones for search-and-measurement control,

clarify the quantitative and qualitative characteristics of the geographical boundaries of ecological hazard, and substantiate further environmental protection measures.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the developed methodology for managing environmental safety to organize monitoring in the impact zone of a dry spent nuclear fuel storage facility, identify priority survey areas, plan UAV routes, refine the boundaries of possible contamination, select environmental protection measures, and repeatedly verify their effectiveness under the conditions of an accident caused by military actions.

The obtained results of the dissertation research, in particular the mathematical model for state monitoring and the methodology for managing environmental safety of a spent nuclear fuel storage facility, have been implemented in the research activities of the Center for Information, Analytical and Technical Support for Monitoring Nuclear Energy Facilities of the National Academy of Sciences of Ukraine and in the practical activities of the Municipal Enterprise of KhMR “SANITARY AND ENVIRONMENTAL CENTRE” for the analysis of technogenic and environmental risks, preparation of engineering and analytical solutions, and expansion of the capabilities of comprehensive environmental monitoring of radiation-hazardous facilities.

Keywords: environmental safety, dry spent nuclear fuel storage facility, accident, military actions, radioactive contamination, monitoring, mathematical modelling, unmanned aerial vehicle.

List of the Applicant’s Publications on the Dissertation Topic

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation have been published:

Articles in scientific professional journals of Ukraine included in international scientometric databases:

1. Rashkevych N., Shevchenko O., Rushchak I., Kradozhon V., **Krasnov V.** Formation of Conditions for the Existence of a Mathematical Model for Preventing Emergencies in Territories Contaminated with Remnants of Missile and Artillery Damage. *Social Development and Security*. 2025. Vol. 15. No. 5. P. 151–161. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.5.12>.

The applicant personally analysed the conditions for hazard formation in contaminated territories, generalized the factors of spatio-temporal spread of hazardous substances, and substantiated approaches to the mathematical description of environmental hazard zones.

2. Rashkevych N. V., Melezhyk R. S., Perehin A. V., **Krasnov V. A.** Assessment of Soil Contamination in Areas Affected by Missile and Artillery Systems Based on Electrical Conductivity Indicators. *Problems of Emergency Situations*. 2025. No. 2(42). P. 294–303. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2025-42-19>.

The applicant personally analysed approaches to assessing soil contamination in areas affected by military actions, substantiated the use of electrical conductivity indicators, and generalized the results for the formation of environmental safety criteria.

3. **Krasnov V. A.**, Rashkevych N. V. Assessment of Radiation Impact During an Accident at a Spent Nuclear Fuel Storage Facility. *Municipal Economy of Cities. Series: Information Technologies and Engineering*. 2025. Vol. 6, Is. 194. P. 74–81. DOI: <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2025-6-194-74-81>.

The applicant personally formulated the problem statement for assessing radiation impact, identified radiation hazard factors, and substantiated the need to combine radiation monitoring with mathematical modelling.

4. Rashkevych N. V., **Krasnov V. A.**, Rashkevych O. S. Theory and Practice of Developing an Integrated Model for Assessing Soil and Groundwater Contamination in Affected Territories. *Technogenic and Environmental Safety*.

2025. No. 18(2/2025). P. 23–33. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2025.2.3>.

The applicant personally analysed the features of soil and groundwater contamination, substantiated approaches to integrated assessment of the state of the environment, and justified the use of modelling results for spatial zoning of the territory.

5. Rashkevych N. V., **Krasnov V. A.**, Huz A. S. Procedures for Geospatial Profiling of a Territory of Possible Radiation Contamination Caused by Missile and Artillery Damage. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2025. No. 111. P. 158–165. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.158>.

The applicant personally developed approaches to geospatial profiling of a territory of possible radiation contamination and substantiated procedures for identifying areas requiring priority survey.

6. **Krasnov V.**, Rashkevych N., Shevchenko O., Pohribna Yu., Tryhub V. Development of a Technology for Environmental Safety Management in the Event of an Accident at a Spent Nuclear Fuel Storage Facility. *Social Development and Security*. 2026. Vol. 16. No. 2. P. 173–185. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.15>.

The applicant personally developed the structural framework of the methodology for managing the environmental safety status of a dry spent nuclear fuel storage facility, substantiated the combination of analytical-and-calculation, survey-and-measurement, and management blocks, and determined the sequence for selecting environmental protection measures.

Scientific works certifying the approbation of the dissertation materials:

7. Smirnov A. V., **Krasnov V. A.**, Serbyn V. A. Assessment of the Environmental State of the Territory Around a Spent Nuclear Fuel Storage Facility. *Human Safety in Modern Conditions: Collection of Reports of the XVII International Scientific and Methodological Conference, Kharkiv, December 4–5,*

2025. Kharkiv: NTU “KhPI”, 2025. P. 152–153. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28291>.

The applicant personally analysed the factors affecting the environmental state of the territory around a spent nuclear fuel storage facility, identified the main indicators for monitoring the state of the environment, and substantiated the need to combine radiation monitoring with spatial analysis of adjacent territories.

8. Rashkevych N. V., Shevchenko O. S., **Krasnov V. A.** Modelling the Process of Searching for Sources of Water Body Contamination Under Conditions of Modern Military Threats. *Maritime Security of the Baltic-Black Sea Region: Challenges and Threats: Proceedings of the V International Scientific Conference*. Riga: Baltija Publishing, 2025. P. 42–45. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26737>.

The applicant personally substantiated the formulation of the task of searching for sources of contamination under conditions of military threats, identified the factors of spatial uncertainty, and proposed approaches to the distribution of search actions within the zone of possible contamination.

9. **Krasnov V. A.**, Rashkevych N. V. Approaches to Assessing the Technogenic and Environmental Consequences of Missile and Artillery Damage. *Problems of Emergency Situations: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. Cherkasy: National University of Civil Protection of Ukraine, 2026. P. 452–453. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28455>.

The applicant personally systematized approaches to assessing the technogenic and environmental consequences of missile and artillery damage, identified the main hazardous factors, and substantiated the need to take into account the spatial spread of contamination, restricted access and incomplete initial information.

10. **Krasnov V. A.**, Rashkevych N. V., Rashkevych O. S. Monitoring of Territories Around Spent Nuclear Fuel Storage Facilities. *Information Technologies in the Modern World: Proceedings of the International Scientific and Practical*

Conference of Higher Education Applicants and Young Scientists. Kharkiv: State Biotechnological University, 2026. P. 353–356. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28456>.

The applicant personally substantiated the need to monitor territories around spent nuclear fuel storage facilities, defined the role of stationary, mobile and remote control means, and proposed approaches to identifying priority survey areas.

**Scientific works that additionally reflect the scientific results of the
dissertation:**

1. Kondratenko O. M., Andronov V. A., Polishchuk T. R., Kasionkina N. D., **Krasnov V. A.** Accounting the Emissions of Engine Fuel Vapors in the Criteria-Based Assessment of the Ecological Safety Level of Power Plants with Reciprocating ICE Exploitation Process. *Internal Combustion Engines*. 2022. No. 1. P. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.1.06>.

The applicant personally analysed approaches to criteria-based assessment of the environmental safety of technogenic facilities, generalized the impact of pollutant emissions, and substantiated the use of integral indicators for assessing environmental hazard.

2. Kondratenko O. M., Andronov V. A., Stokov O. P., Babakin V. M., **Krasnov V. A.** Instrumental Error of Known Formulas for Converting Smoke Opacity Indicators into Toxicity Indicators of Exhaust Gases of Reciprocating Internal Combustion Engines. *Technogenic and Ecological Safety*. 2022. No. 12(2/2022). P. 3–18. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2022.2.1>.

The applicant personally analysed known formulas for converting smoke opacity indicators into toxicity indicators of exhaust gases of reciprocating internal combustion engines, participated in assessing the instrumental error of these dependencies and in generalizing the calculation results.

3. Kondratenko O. M., **Krasnov V. A.**, Semykin M. V. The Place of DPF with a Liquid Working Body in the Classification of Atmospheric Air Protection Technologies from the Complex Negative Influence of Power Plants with Reciprocating ICE. *Technogenic and Ecological Safety*. Kharkiv: National University of Civil Protection of Ukraine, 2023. No. 14(2/2023). P. 67–91. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2023.2.8>.

The applicant personally analysed the place of diesel particulate filters with a liquid working body in the system of atmospheric air protection technologies, generalized their functional purpose, and participated in the classification of means for reducing the negative impact of power plants with reciprocating internal combustion engines.

4. Kondratenko O. M., **Krasnov V. A.** Development of the Mobile Disassembly Test Bench for Experimental Study of the Ecological Safety Level of Exploitation of Firefighting and Emergency-Rescue Equipment with Reciprocating ICE and the Performance Characteristics of the Executive Devices of EPT. *Technogenic and Ecological Safety*. 2025. No. 17(1/2025). P. 37–47. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2025.1.4>.

The applicant personally participated in developing a mobile dismountable experimental test bench for studying the level of environmental safety of the operation of firefighting and emergency-rescue equipment with reciprocating internal combustion engines, substantiated its functional purpose, and analysed the possibilities of using the test bench to assess the working characteristics of executive devices of environmental protection technologies.

5. **Krasnov V. A.**, Kondratenko O. M. Portable Test Bench for Experimental Research of the Working Characteristics of Executive Elements of Environmental Protection Technologies Against the Influence of Power Plants with Reciprocating ICE. *Environmental Safety Under Conditions of War: Collection of Abstracts of the V International Scientific and Practical Conference*, Lviv, November 21, 2024. Lviv:

Lviv State University of Life Safety, 2024. P. 45–46. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22441>.

The applicant personally substantiated the purpose of the portable experimental test bench for studying the working characteristics of executive elements of environmental protection technologies, defined its functional capabilities, and participated in forming an approach to the experimental assessment of the effectiveness of environmental protection means against the impact of power plants with reciprocating internal combustion engines.

6. Kondratenko O., **Krasnov V.** Designing and Developing of Portable Dismountable Test Bench for Experimental Research of the Working Characteristics of Executive Elements of Environmental Protection Technologies Against the Influence of Power Plants with Reciprocating ICE. *Power Plants and Alternative Energy Sources: Collection of Abstracts and Reports of the International Conference, Kharkiv, March 11–12, 2025.* Kharkiv: FOP Brovin O. V., 2025. P. 185–188. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26321>.

The applicant personally participated in designing a portable dismountable experimental test bench for studying the working characteristics of executive elements of environmental protection technologies, substantiated its structural and functional features, as well as the possibility of its application for assessing means of reducing the negative impact of power plants with reciprocating internal combustion engines.

7. Kondratenko O. M., **Krasnov V. A.** Development of a Mobile Experimental Test Bench for Studying Environmental Safety Indicators of Firefighting and Emergency-Rescue Transport. *Information Technologies: Science, Engineering, Technology, Education, Health: Proceedings of the XXXIII International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2025, Kharkiv, May 14–17, 2025.* Kharkiv: NTU “KhPI”, 2025. P. 196. http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/26345/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%84_%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D1%80%D0%B0%

D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%9E%D0%9C_%D0%94%D0%92%D0%97_MicroCAD-2025.pdf.

The applicant personally participated in developing a mobile experimental test bench for studying environmental safety indicators of firefighting and emergency-rescue transport, substantiated its purpose, and determined the possibility of using it to assess the impact of technical means with reciprocating internal combustion engines on the state of the environment.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ВСТУП	37
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СХОВИЩ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА	46
1.1 Практика зберігання відпрацьованого ядерного палива у світі та Україні	46
1.2 Заходи захисту сухого сховища відпрацьованого ядерного палива	55
1.3 Системи екологічного та радіаційного моніторингу в зонах впливу ядерних об'єктів	60
1.4 Формулювання наукової задачі та напрями подальшого дослідження	68
Висновки до розділу 1	70
РОЗДІЛ 2 НЕБЕЗПЕЧНІ ЧИННИКИ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СУХОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА У РАЗІ АВАРІЇ, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ	72
2.1 небезпечні чинники аварійного впливу на сухе сховище відпрацьованого ядерного палива	72
2.2 Критерії оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища відпрацьованого ядерного палива	79
2.3 Потенційні шляхи поширення радіоактивного забруднення у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива	86
2.4 Оцінювання можливих екологічних наслідків аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива	94
Висновки до розділу 2	100
РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА У ЗОНІ	102

ВПЛИВУ СУХОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА У РАЗІ АВАРІЇ, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ	
3.1 Просторово-часова характеристика розвитку екологічної небезпеки у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива	102
3.2 Постановка задачі моніторингу зон можливого аварійного радіоактивного забруднення	105
3.2.1 Формулювання задачі пошуково-вимірювального контролю	107
3.2.2 Початкові умови задачі пошуково-вимірювального контролю	110
3.2.3 Критерії вибору стратегії пошуково-вимірювального контролю та уточнення зон можливого аварійного радіоактивного забруднення	112
3.3 Математичні закономірності розподілу пошуково-вимірювального ресурсу за пріоритетними зонами контролю	116
3.3.1 Імовірнісна постановка задачі виявлення зон можливого аварійного радіоактивного забруднення	117
3.3.2 Процедура отримання раціональних стратегій пошуково-вимірювального контролю за пріоритетними зонами	121
3.3.3 Характеристики безпілотних літальних апаратів та їх вплив на результати дистанційного обстеження пріоритетних зон контролю	126
3.4 Розроблення математичної моделі моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями	134
Висновки до розділу 3	142
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ У РАЗІ АВАРІЇ НА СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ	145
4.1 Принципи формування методики управління екологічною безпекою	145

4.2 Структурна побудова розробленої методики управління екологічною безпекою	148
4.2.1 Вхідні дані та розрахункові показники методики	148
4.2.2 Функціональні блоки, структурно-логічна схема та взаємозв'язок процедур методики	150
4.3 Аналітично-розрахунковий блок методики: визначення пріоритетних зон контролю	152
4.3.1 Попередня ідентифікація небезпечних чинників	153
4.3.2 Формування ділянок контролю у зоні впливу сховища	154
4.3.3 Формування маршруту пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БПЛА	156
4.3.4 Блок-схема визначення першочергових зон обстеження	156
4.4 Пошуково-вимірювальний блок методики: уточнення стану можливого радіоактивного забруднення	158
4.4.1 Первинне дистанційне обстеження	159
4.4.2 Виявлення радіаційної аномалії або зони можливого радіоактивного забруднення	160
4.4.3 Апостеріорне уточнення положення небезпечної зони	161
4.4.4 Наземне підтвердження та лабораторний аналіз проб	162
4.4.5 Блок-схема уточнення стану забруднення після отримання моніторингових даних	163
4.5 Управлінський блок методики: вибір і перевірка природоохоронних заходів	165
4.5.1 Класифікація стану ділянок за рівнем екологічної небезпеки	166
4.5.2 Вибір контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів	166
4.5.3 Повторний контроль після виконання заходів	169
4.5.4 Блок-схема прийняття управлінського рішення	169

4.6 Узагальнення розробленої методики управління екологічною безпекою	171
Висновки до розділу 4	175
РОЗДІЛ 5 ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ У РАЗІ АВАРІЇ НА СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ	178
5.1 Постановка задачі перевірки достовірності математичної моделі та методики управління екологічною безпекою	178
5.2 Показники оцінювання достовірності та результативності	180
5.3 Формування розрахункових сценаріїв аварійного впливу на сухе сховище відпрацьованого ядерного палива	185
5.4 Оцінювання ефективності визначення пріоритетних зон контролю	188
5.5 Перевірка результативності пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА	193
5.6 Оцінювання обґрунтованості вибору управлінських та природоохоронних заходів	199
Висновки до розділу 5	206
РОЗДІЛ 6 ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ У РАЗІ АВАРІЇ НА СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ	209
6.1 Організація екологічного та радіаційного моніторингу у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями	209
6.2 Застосування стаціонарних, мобільних і дистанційних засобів контролю	212

	36
6.3 Рекомендації щодо уточнення меж можливого радіоактивного забруднення	214
6.4 Використання результатів математичного моделювання для вибору природоохоронних заходів	217
6.5 Очікувані екологічні та управлінські результати застосування розробленої методики	220
Висновки до розділу 6	222
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	224
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	228
Додаток А	249
Додаток Б	257

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сухі сховища відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) є об'єктами, безпечне функціонування яких пов'язане з тривалим зберіганням радіоактивних матеріалів у межах інженерних бар'єрів, контролем стану контейнерів, дотриманням регламентів експлуатації та спостереженням за параметрами навколишнього природного середовища. Контролю підлягають стан систем зберігання і фізичного захисту, потужність еквівалентної дози, параметри повітряного середовища, ґрунтового покриву, поверхневих і підземних вод, а також можливе радіоактивне забруднення пилу, аерозолів та інших носіїв небезпечних речовин.

У разі аварії, спричиненої воєнними діями, умови екологічного та радіаційного контролю ускладнюються через можливе механічне пошкодження елементів сховища й прилеглої інфраструктури, обмеження доступу персоналу, небезпеку повторного ураження, нестабільну роботу стаціонарних засобів спостереження або неможливість проведення повного інструментального обстеження. Це підвищує невизначеність щодо джерела забруднення, меж його поширення, інтенсивності міграції радіонуклідів і необхідного обсягу природоохоронних заходів.

Аварійний вплив на сухе сховище ВЯП може супроводжуватися порушенням цілісності захисних бар'єрів, локальним радіоактивним забрудненням території, вторинним пиловим перенесенням, утворенням забруднених аерозолів, потраплянням радіонуклідів у поверхневий стік, забрудненням ґрунтового покриву і формуванням зон підвищеного екологічного ризику. Характер наслідків залежить від виду пошкодження, метеорологічних умов, рельєфу території, стану дорожніх і технологічних покриттів, наявності дренажних систем, напрямів поверхневого стоку,

доступності окремих ділянок для обстеження та швидкості отримання первинних даних.

Актуальність теми дослідження зумовлена потребою в розробленні методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями. Така методика має поєднувати критерії оцінювання стану довкілля, систему моніторингу небезпечних чинників, математичну модель просторово-часового розвитку екологічної небезпеки, процедури дистанційного обстеження із застосуванням БпЛА та послідовність природоохоронних заходів для підтримання або відновлення прийняттого рівня екологічної безпеки.

Таким чином, вибір теми дисертаційного дослідження пов'язаний з необхідністю вирішення науково-практичного завдання щодо забезпечення екологічної безпеки у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, на основі моніторингу, математичного моделювання, пріоритетного розподілу пошуково-вимірювального ресурсу і обґрунтованого вибору природоохоронних заходів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в межах наукової складової освітньо-наукової програми вищої освіти «Техногенно-екологічна безпека» за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища» галузі знань 18 «Виробництво та технології» у Національному університеті цивільного захисту України [1]. Тематика дослідження відповідає змісту цієї освітньо-наукової програми, оскільки пов'язана з розробленням науково обґрунтованих підходів до оцінювання стану довкілля, прогнозування розвитку небезпечних процесів та обґрунтування заходів захисту навколишнього природного середовища в умовах аварійного впливу на техногенно-небезпечний об'єкт.

Зміст дисертаційної роботи безпосередньо узгоджується з визначеними в освітньо-науковій програмі напрямками наукових досліджень, зокрема з напрямками «дистанційний контроль стану навколишнього середовища» та

«імітаційне моделювання системи управління екологічною безпекою техногенно-небезпечних об'єктів» [1]. У межах цих напрямів у дисертації розглянуто задачу отримання, оброблення та використання моніторингових даних для оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища ВЯП у разі аварії, спричиненої воєнними діями.

Результати дисертаційного дослідження узгоджуються з положеннями національних документів у сфері енергетичної, техногенної, екологічної, ядерної та радіаційної безпеки. Зокрема, робота відповідає положенням розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року» [2], оскільки безпечне функціонування об'єктів ядерно-енергетичного комплексу потребує належної системи контролю екологічних наслідків аварійних ситуацій, зокрема у разі аварії, спричиненої воєнними діями.

Окремі положення дисертації відповідають Указу Президента України від 4 квітня 2019 р. № 104/2019 «Про заходи з підтримки розвитку ядерної енергетики та підвищення рівня безпеки у сфері використання ядерної енергії» [3]. Зв'язок дисертаційного дослідження з цим документом полягає в обґрунтуванні підходів до підвищення безпеки об'єктів, пов'язаних із поводженням з відпрацьованим ядерним паливом, через удосконалення моніторингу, прогнозування екологічних наслідків аварії та визначення заходів щодо обмеження поширення небезпечних чинників у довкіллі.

Дисертаційна робота також пов'язана зі Стратегічним планом розвитку Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» на 2024–2028 роки [4]. Дотичність дослідження до цього документа визначається тематикою підвищення безпеки ядерних об'єктів, радіаційних джерел та об'єктів поводження з радіоактивними матеріалами. У дисертації цей напрям конкретизовано через задачу забезпечення екологічної безпеки у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями.

Окремі методичні підходи, використані в дисертаційному дослідженні, пов'язані з тематикою науково-дослідної роботи «Розробка методики комплексного оцінювання впливу експлуатації та застосування спеціальної техніки на довкілля в умовах військової агресії» за номером державної реєстрації 0124U000374, термін виконання – 01.2024–12.2026 рр. Зв'язок із зазначеною НДР полягає у використанні підходів до оцінювання негативного техногенного впливу на довкілля в умовах воєнних дій, аналізу чинників екологічної небезпеки, урахування просторово-часової невизначеності та застосування розрахункових методів для оцінювання показників екологічної безпеки. Здобувач брав участь у виконанні зазначеної НДР як відповідальний виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розроблення методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, на основі розподілу пошуково-вимірювального ресурсу за пріоритетними зонами контролю, результатів дистанційного та інструментального моніторингу, математичного моделювання поширення небезпечних чинників і оцінювання екологічного ризику як складових технології захисту навколишнього природного середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-практичні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану забезпечення екологічної безпеки сховищ відпрацьованого ядерного палива.
2. Визначити та систематизувати небезпечні чинники та критерії оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями.
3. Розробити математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями.

4. Розробити методика управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями.

5. Перевірити достовірність математичної моделі та методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями.

6. Розробити рекомендації щодо застосування результатів дослідження для забезпечення екологічної безпеки у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення екологічної безпеки сухого сховища відпрацьованого ядерного палива та прилеглих територій у разі аварії, спричиненої воєнними діями.

Предметом дослідження є параметри забезпечення екологічної безпеки сухого сховища відпрацьованого ядерного палива в умовах воєнних загроз.

Наукова новизна отриманих результатів:

– уперше розроблено математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями. У моделі зона можливого аварійного забруднення розглядається як об'єкт пошуку з невизначеним просторовим положенням, що уточнюється на основі апіорних і апостеріорних ймовірностей, результатів дистанційного обстеження, інструментальних вимірювань, пошуково-вимірювальних ресурсів та ефективності виявлення. Модель враховує пріоритетність ділянок контролю, обмеження доступу, інформаційну невизначеність, технічні характеристики БПЛА і часові обмеження, що дає змогу обґрунтовувати черговість обстеження території, розподіляти ресурс і уточнювати положення потенційно небезпечних зон.

– уперше розроблено методика управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої

воєнними діями, яка поєднує аналітично-розрахунковий, пошуково-вимірювальний та управлінський блоки. Методика охоплює послідовний цикл процедур: фіксацію аварійного впливу, ідентифікацію небезпечних чинників, формування ділянок контролю, розрахунок їхньої пріоритетності, визначення першочергових зон обстеження, побудову маршруту БпЛА, дистанційний контроль, уточнення положення небезпечної зони, наземне й лабораторне підтвердження, класифікацію рівня екологічної небезпеки, вибір природоохоронних заходів та повторний контроль їх результативності.

– удосконалено систему оцінювання стану екологічної безпеки у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями, шляхом поєднання небезпечних чинників, критеріїв стану компонентів довкілля, шляхів поширення радіоактивного забруднення та показників інформаційної невизначеності. На відміну від підходів, орієнтованих переважно на радіаційний контроль і технічний стан об'єкта, запропонована система дає змогу визначати пріоритетні зони пошуково-вимірювального контролю, уточнювати кількісні та якісні характеристики географічних меж екологічної небезпеки та обґрунтовувати подальші природоохоронні заходи.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі для вирішення поставлених наукових завдань застосовано теоретичні, аналітичні, розрахункові, чисельні та сценарні методи дослідження, а саме:

– методи системного аналізу, узагальнення та класифікації науково-технічної інформації, порівняльного аналізу нормативних документів і практики поводження з відпрацьованим ядерним паливом – для аналізу сучасного стану забезпечення екологічної безпеки об'єктів поводження з відпрацьованим ядерним паливом;

– методи аналізу небезпек, сценарного аналізу, систематизації критеріїв, експертно-аналітичного оцінювання та просторового узагальнення даних – для визначення небезпечних чинників, критеріїв стану екологічної безпеки,

шляхів поширення радіоактивного забруднення та можливих екологічних наслідків аварії;

– методи математичного моделювання, теорії ймовірностей, математичної статистики, теорії пошуку, оптимізації та просторової дискретизації – для розроблення математичної моделі моніторингу, оцінювання ймовірності виявлення радіаційної аномалії та розподілу пошуково-вимірювального ресурсу між ділянками контролю;

– методи системного синтезу, структурно-логічного моделювання, інформаційно-аналітичного проектування та підтримки прийняття рішень – для формування методики управління екологічною безпекою на основі аналітично-розрахункового, пошуково-вимірювального та управлінського блоків;

– методи розрахунково-сценарної перевірки, чисельного експерименту, порівняльного аналізу, параметричних досліджень і статистичного узагальнення результатів – для перевірки достовірності математичної моделі та результативності методики;

– методи експертного оцінювання, логічного узагальнення та системного аналізу управлінських рішень – для розроблення практичних рекомендацій щодо застосування результатів дослідження.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає у можливості використання розробленої методики для організації екологічного та радіаційного моніторингу у зоні впливу сухого сховища ВЯП у разі аварії, спричиненої воєнними діями; визначення пріоритетних ділянок обстеження; планування маршрутів БпЛА; уточнення меж можливого радіоактивного забруднення; вибору контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів; повторної перевірки їх результативності та раціонального розподілу стаціонарних, мобільних, дистанційних і лабораторних засобів контролю.

Отримані результати дисертаційного дослідження, зокрема математична

модель моніторингу стану навколишнього природного середовища та методика управління екологічною безпекою, впроваджені у науково-дослідну діяльність Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України та практичну діяльність КП ХМР «САНІТАРНО-ЕКОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР» для аналізу техногенно-екологічних ризиків, підготовки інженерно-аналітичних рішень і розширення можливостей комплексного екологічного моніторингу радіаційно-небезпечних об'єктів.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором особисто та наведені в роботах, які представлені у додатку А.

Особисто здобувачем проведено пошук та аналіз літературних джерел щодо забезпечення екологічної безпеки сховищ ВЯП, проаналізовано нормативно-правові документи, наукові публікації та дослідження з моніторингу, прогнозування поширення забруднення й оцінювання екологічних ризиків. Здобувачем сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, систематизовано небезпечні чинники та критерії оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища ВЯП у разі аварії, спричиненої воєнними діями.

Особисто здобувачем розроблено математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища ВЯП, методику управління екологічною безпекою, підхід до визначення пріоритетних зон пошуково-вимірювального контролю, процедури уточнення меж можливого радіоактивного забруднення, виконано розрахунково-сценарну перевірку працездатності запропонованих рішень, розроблено практичні рекомендації щодо їх застосування та удосконалено систему оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища ВЯП у разі аварії, спричиненої воєнними діями.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи висвітлені та обговорені на наукових конференціях: XVII Міжнародній науково-методичній конференції «Безпека людини у сучасних умовах» (Харків, 4–5 грудня 2025 р.), V Міжнародній науковій конференції «Морська безпека Балто-Чорноморського регіону: виклики та загрози» (Одеса, 26 листопада 2025 р.), Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інформаційні технології в сучасному світі» (Харків, 21 квітня 2026 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Problems of Emergency Situations» (Черкаси, 21 травня 2026 р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 10 наукових працях: 6 статей у наукових фахових виданнях України та 4 тези доповідей на наукових конференціях. Додаткові наукові результати опубліковано у 7 наукових працях: 4 статті у наукових фахових виданнях України та 3 тези доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація загальним обсягом 259 сторінок складається з анотації, змісту, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 153 найменувань та 2 додатків. Робота містить 20 рисунків та 33 таблиці.

РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СХОВИЩ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

Рішення першої наукової задачі дисертаційного дослідження щодо аналізу сучасного стану забезпечення екологічної безпеки об'єктів поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) здійснено за такими напрямками. Спочатку проаналізовано практику зберігання ВЯП у світі та Україні з урахуванням застосування вологих і сухих сховищ, розвитку централізованого зберігання та нормативно-правових засад функціонування таких об'єктів. Далі розглянуто заходи захисту сухих сховищ ВЯП. Після цього проаналізовано системи екологічного та радіаційного моніторингу в зонах впливу ядерних об'єктів. Окремо визначено обмеження існуючих підходів, що виникають у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями.

1.1 Практика зберігання відпрацьованого ядерного палива у світі та Україні

Ядерна енергетика залишається складовою енергетичних систем багатьох держав і водночас формує довгострокове завдання поводження з ВЯП. Після вивантаження з реактора ВЯП зберігає залишкове тепловиділення та радіоактивність, тому потребує контрольованого охолодження, радіаційного захисту, фізичного захисту, обліку, моніторингу стану паливних збірок і контейнерів, а також контролю можливого впливу на навколишнє природне середовище [5, 6].

На міжнародному рівні вимоги до поводження з ВЯП, ядерної та радіаційної безпеки, фізичного захисту, аварійної готовності та екологічного контролю визначаються документами Міжнародного агентства з атомної енергії, Агентства з ядерної енергії, Європейського співтовариства з атомної

енергії та національними регуляторними системами країн, що експлуатують ядерні установки [7–9]. У цих документах зберігання ВЯП розглядається як частина життєвого циклу ядерного палива, що охоплює його вивантаження з реактора, витримування у басейнах, переведення до проміжного або довгострокового зберігання, транспортування, подальшу переробку або захоронення.

Під час аналізу безпеки ядерних об'єктів враховують вихідні події зовнішнього та внутрішнього походження. До зовнішніх належать природні чинники, зокрема землетруси, повені, екстремальні метеорологічні явища, а також техногенні впливи: вибухи, пожежі за межами майданчика, руйнування гідротехнічних споруд, викиди горючих, вибухонебезпечних або токсичних речовин [10–12]. До внутрішніх подій відносять пожежі, вибухи на майданчику, відмови систем забезпечення, порушення технологічних режимів та помилки персоналу [13, 14]. Для сховищ ВЯП такі події мають розглядатися не лише з позицій збереження інженерних бар'єрів, а й з погляду можливого впливу на повітряне середовище, ґрунти, поверхневі й підземні води.

У міжнародній практиці використовують два основні типи сховищ ВЯП: вологі та сухі. Вологі сховища застосовують переважно на початковому етапі після вивантаження палива з реактора, коли залишкове тепловиділення і рівень радіоактивності залишаються високими. У таких сховищах вода виконує функції теплоносія, радіаційного захисту та середовища для контролю стану паливних збірок [15, 16]. Після зменшення тепловиділення ВЯП може переводитися до сухого зберігання, де паливні збірки розміщують у герметичних контейнерах або багатоцільових каністрах із пасивним відведенням тепла [16, 17].

Сухе зберігання набуло поширення як технологія проміжного та довгострокового поводження з ВЯП. Його застосування пов'язане з можливістю зберігання палива без активних систем охолодження, зменшенням залежності від водного середовища, модульністю розміщення

контейнерів і можливістю поетапного нарощування місткості сховища. Разом з тим безпечність такого зберігання залежить від герметичності контейнерів, теплового стану паливних збірок, радіаційного контролю, фізичного захисту майданчика, стану вентиляційних каналів, контролю корозійних процесів і моніторингу навколишнього природного середовища.

Окремим напрямом довгострокового поводження з ВЯП є геологічне захоронення. У Фінляндії реалізується проєкт Onkalo – глибоке геологічне сховище на майданчику Олкілуото, призначене для остаточного захоронення ВЯП у кристалічних породах. Сховище формується на глибині близько 400–430 м і передбачає використання системи інженерних та природних бар'єрів для ізоляції радіоактивних матеріалів від біосфери [18, 19]. У Швеції сховище для остаточного захоронення ВЯП будується у районі Форсмарка; проєкт передбачає розміщення палива на глибині близько 500 м у мідних контейнерах із бентонітовим бар'єром [20]. Такі приклади характеризують перехід від тривалого проміжного зберігання до рішень, орієнтованих на геологічну ізоляцію ВЯП.

Україна належить до держав із значною часткою ядерної генерації в енергобалансі. До початку повномасштабної війни в країні експлуатувалися 15 енергоблоків на чотирьох атомних електростанціях, а частка атомної енергетики у виробництві електроенергії у 2021 р. становила близько 55% [21]. Така структура енергетики зумовлює потребу в національній інфраструктурі поводження з ВЯП, включаючи його проміжне зберігання, транспортування, облік, фізичний захист і моніторинг можливого впливу на довкілля.

Забезпечення безпеки сховищ ВЯП в Україні здійснюється на основі нормативно-правової бази, технічних вимог і процедур ліцензування, що регулюють проєктування, будівництво, введення в експлуатацію, експлуатацію та зняття з експлуатації таких об'єктів [22, 23]. У цих процедурах враховуються вимоги до ядерної та радіаційної безпеки, фізичного захисту, аварійної готовності, обліку ядерних матеріалів, контролю технічного

стану обладнання і систематичного спостереження за станом навколишнього природного середовища.

В Україні функціонують об'єкти як вологого, так і сухого зберігання ВЯП. На майданчику Чорнобильської АЕС створено сухе сховище СВЯП-2, призначене для підготовки та довгострокового зберігання відпрацьованих паливних збірок, що переміщуються з попереднього сховища мокрого типу [24–26]. На Запорізькій АЕС застосовується сухе контейнерне зберігання з використанням вентильованих контейнерів, призначених для пасивного відведення тепла та радіаційного захисту [27].

Окремим елементом національної інфраструктури є Централізоване сховище ВЯП у зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Проєкт передбачає використання технології сухого контейнерного зберігання, транспортування ВЯП у спеціальних транспортних контейнерах і подальше розміщення паливних збірок у вентильованих модулях зберігання [21]. Створення такого сховища зменшує залежність від зовнішніх послуг з поводження з ВЯП і формує потребу в постійному екологічному контролі території розміщення, маршрутів транспортування та прилеглих зон можливого впливу.

Нормативно-правова основа поводження з ВЯП в Україні охоплює вимоги ядерної та радіаційної безпеки, фізичного захисту, охорони довкілля, оцінювання впливу на навколишнє природне середовище, вибору майданчиків, проєктування, будівництва та експлуатації ядерних установок і сховищ ВЯП.

Базові правові засади використання ядерної енергії визначає Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [28]. Він регламентує вимоги до ядерної та радіаційної безпеки, державного нагляду, відповідальності експлуатуючої організації, захисту персоналу, населення і навколишнього природного середовища. Його положення формують основу для розгляду сухого сховища ВЯП як об'єкта, безпечність якого має оцінюватися з урахуванням можливого аварійного впливу на довкілля.

Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами» [29] визначає вимоги до ізоляції, зберігання, перевезення та захоронення радіоактивних матеріалів. Хоча ВЯП має окремий правовий режим, положення цього закону є дотичними до теми дослідження через спільні вимоги до запобігання неконтрольованому поширенню радіоактивних речовин і контролю їх впливу на довкілля.

Радіаційний захист персоналу і населення регламентується Законом України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» [30] та ДСП 6.177-2005-09-02 «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України» [31]. Ці документи встановлюють засади обмеження опромінення, контролю дозових навантажень, організації радіаційно-гігієнічних заходів і поводження з джерелами іонізуючого випромінювання. Для дослідження вони задають групу показників, які мають враховуватися під час моніторингу території сухого сховища ВЯП і прилеглих зон.

Екологічну складову регулюють закони України «Про охорону навколишнього природного середовища» [32], «Про оцінку впливу на довкілля» [33] та «Про стратегічну екологічну оцінку» [34]. Їх положення дають підстави розглядати аварію на сухому сховищі ВЯП через можливий вплив на повітряне середовище, ґрунти, поверхневі й підземні води, а також через формування зон екологічного ризику. Вони також визначають загальну логіку вибору екологічних показників, оцінювання наслідків і врахування довгострокового впливу об'єктів ядерної інфраструктури на довкілля.

Питання фізичного захисту ядерних установок і матеріалів регулює Закон України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» [35]. Для теми дисертації цей закон важливий у частині врахування воєнних загроз, пошкодження об'єкта, несанкціонованого втручання та необхідності поєднання фізичного захисту з екологічним моніторингом і прогнозуванням наслідків аварії.

Процедури ухвалення рішень щодо розміщення, проєктування і будівництва ядерних установок та об'єктів поводження з радіоактивними відходами загальнодержавного значення визначає Закон України [36]. Його положення пов'язані з обґрунтуванням вибору майданчика, урахуванням екологічних, техногенних і соціальних чинників, визначенням зон потенційного впливу та формуванням вимог до подальшого моніторингу.

Спеціалізованим нормативним документом для сухих сховищ є НП 306.2.105-2004 «Основні положення забезпечення безпеки проміжних сховищ відпрацьованого ядерного палива сухого типу» [37]. Він встановлює принципи і критерії безпеки таких сховищ, вимоги до систем та елементів, а також до етапів вибору майданчика, проєктування, будівництва, введення в експлуатацію, експлуатації та зняття з експлуатації. У межах дослідження цей документ є основою для визначення технічних і організаційних умов безпечного сухого зберігання ВЯП.

НП 306.2.221-2019 «Вимоги безпеки під час поводження з ядерним паливом» [38] регламентує операції з ядерним паливом, зокрема перевантаження, транспортування, зберігання, контроль стану та запобігання пошкодженню паливних збірок. Його положення використовуються під час визначення небезпечних чинників, можливих порушень безпечного поводження з паливом і показників моніторингу, необхідних для оцінювання стану екологічної безпеки.

Загальні підходи до безпеки атомних станцій та оцінювання аварійних сценаріїв визначені у НП 306.2.245-2024 [39] і НП 306.2.162-2010 [40]. Ці документи встановлюють принципи безпеки, вимоги до аналізу вихідних подій, оцінювання наслідків аварій і достатності заходів захисту. Для сухого сховища ВЯП ці положення можуть бути використані як методична основа під час формування сценаріїв аварійного впливу та оцінювання можливих екологічних наслідків.

Нормативний документ щодо оцінки безпеки атомних станцій за умов зовнішніх впливів природного характеру [41] регламентує підхід до ідентифікації зовнішніх чинників, встановлення параметрів впливу, оцінювання стійкості об'єкта та наслідків для безпеки. У роботі ця логіка може бути використана для структурування механічних впливів воєнного походження, визначення зон можливого пошкодження та подальшого поширення забруднення.

У матеріалах [42, 43] зазначається, що наявні сховища ВЯП потребують подальшої модернізації, удосконалення технологій моніторингу та управління, а також розроблення довгострокових стратегій поводження з урахуванням міжнародного досвіду. В Україні створено базовий режим фізичного захисту ядерних матеріалів, але залишаються прогалини в нормативно-правовому регулюванні ядерної безпеки, які становлять загрозу [44].

Робота [45] окреслює контекст модернізації атомної енергетики України як передумову для впровадження інновацій у паливний цикл і системи зберігання, акцентуючи на потребі гармонізації зі світовими стандартами, диверсифікації технологій і посиленні інституційної спроможності операторів та регулятора.

У міжнародних технічних оглядах для України констатовано підвищені ризики, зумовлені воєнними діями: перериванням логістики та електропостачання, обмеженнями доступу персоналу, нестабільністю роботи систем моніторингу. Рекомендації стосуються посилення міжнародної координації, резервування каналів зв'язку й енергоживлення, а також уніфікації процедур аварійної готовності з урахуванням комбінованих сценаріїв [46].

Якщо традиційні моделі безпеки розглядали природні (сейсмічні, гідрологічні, кліматичні) та техногенні впливи, то повномасштабні збройні конфлікти, як показує досвід України, відкрили зовсім інший клас загроз –

навмисні або випадкові ураження ядерних об'єктів, які раніше вважалися малоймовірними.

Питання техногенно-екологічних наслідків ракетно-артилерійських уражень розглянуто у праці [47]. У ній подано підходи до оцінювання наслідків таких впливів для територій, що можуть зазнавати механічного пошкодження та забруднення. У роботі [48] сформовано умови існування математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях, забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження. У межах цієї тематики враховуються просторові межі ураженої території, початкові й граничні умови моделювання, а також параметри забрудненого середовища.

Проблему аварії на сховищі ВЯП розглянуто у праці [49]. У ній проаналізовано радіаційний вплив такої аварії та питання удосконалення управління екологічною безпекою сховищ ВЯП. Аварія на такому об'єкті може розглядатися не лише з позицій ядерної та радіаційної безпеки, а й з урахуванням можливого впливу на повітряне середовище, ґрунти, поверхневі та підземні води. У праці [50] розглянуто оцінювання екологічного стану території навколо сховища ВЯП, що доповнює питання радіаційного контролю аналізом стану прилеглих територій.

У роботі [51] запропоновано технологію управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі ВЯП. У ній поєднано оцінювання, прогнозування та заходи щодо зниження радіаційного впливу в умовах воєнних дій, неповноти вихідних даних і обмежених ресурсів реагування. Це дозволяє розглядати управління екологічною безпекою сухого сховища ВЯП як задачу, що потребує поєднання моніторингу, математичного моделювання, геопросторового аналізу та процедур прийняття рішень.

Дослідження [52, 53] розкривають ситуацію із функціонуванням українських сховищ ВЯП у період війни, підкреслюючи ризики пошкодження басейнів витримки, переривання електроживлення та втрати систем охолодження. Автори звертають увагу на непередбачуваність зовнішніх

впливів та обмеженість інженерних бар'єрів за умов високотемпературного або вибухового навантаження.

Аналітичні матеріали [54, 55] показують, що військові обстріли й окупація ядерних об'єктів порушують принципи безпеки МАГАТЕ – «захист у глибину» (defence-in-depth) та «фізичну недоторканність» об'єктів. Зокрема, Запорізька АЕС стала прикладом, коли військова присутність безпосередньо у зоні зберігання ВЯП створила загрозу розгерметизації контейнерів і вторинного радіоактивного забруднення [56, 57].

Дослідники [58, 59] ще до подій в Україні зазначають, що сухі сховища ВЯП є потенційно вразливими до цілеспрямованих атак або аварій за межами проєктного сценарію. Дослідження містять методичні орієнтири для оцінки уразливості та формування багаторівневого захисту – від посилення конструкцій контейнерів до організації периметрального контролю та дистанційного моніторингу.

Загальну картину ризиків доповнює робота [60], яка висвітлює соціотехнічний вимір проблеми: збої в енергопостачанні, загрозу втрати персоналу, обмеження доступу до аварійних систем. Такі чинники зумовлюють складні «каскадні ефекти», коли навіть локальне пошкодження може призвести до небезпечних наслідків для системи охолодження чи герметизації.

Таким чином, встановлено, що чинна нормативно-правова база України регламентує вимоги до ядерної та радіаційної безпеки, фізичного захисту, поводження з ядерним паливом, оцінювання впливу на довкілля і радіаційного контролю. Водночас ці підходи переважно орієнтовані на штатну експлуатацію, проєктні аварії, природні й техногенні впливи мирного часу, тоді як аварія, спричинена воєнними діями, потребує окремого врахування механічного пошкодження об'єкта, обмеженого доступу до території та неповноти первинної інформації.

1.2 Заходи захисту сухого сховища відпрацьованого ядерного палива

За умов підвищення техногенного та воєнного навантаження на енергетичну інфраструктуру на перший план виходять принципи пріоритету безпеки, багаторівневого захисту та аварійної готовності. Як зазначено у [28] «захист людини і довкілля має забезпечуватися через сукупність незалежних і взаємодоповнюючих бар'єрів», здатних зберігати функції навіть у разі зовнішніх дестабілізуючих впливів.

Застосування принципу оптимізації ALARA (As Low As Reasonably Achievable) у поєднанні з нормуванням і обґрунтуванням діяльності дає змогу досягти прийняттого балансу між користю від використання ядерної енергії та потенційним ризиком для довкілля. Міжнародна комісія з радіаційного захисту підкреслює, що ефективний контроль доз можливий лише за умови безперервного моніторингу та культури безпеки серед персоналу [61].

Пріоритетним є принцип запобігання поширенню радіоактивних речовин та мінімізації відходів. Сучасні дослідження [42, 53] показують, що системи зберігання ВЯП потребують постійного контролю герметичності контейнерів, відведення тепла й моніторингу навколишнього природного середовища, особливо в умовах воєнних дій.

У Конвенції про ядерну безпеку [62], Організації конвенції [63] закріплено принцип інформування суспільства та прозорість діяльності експлуатуючих організацій, який передбачає своєчасне, достовірне та доступне донесення інформації про стан радіаційної безпеки, потенційні ризики та заходи щодо їх мінімізації.

У цілому сучасна система забезпечення безпеки еволюціонує від концепції «допустимих ризиків» до парадигми екологічної стійкості ядерної діяльності, що передбачає обмеження наслідків радіаційного впливу та

відновлення стану довкілля, адаптацію до нових загроз і вдосконалення міжнародних механізмів співпраці у сфері радіаційного моніторингу [62, 63].

Основою фізичного захисту сховищ ВЯП є багатобар'ерна система, що передбачає послідовне використання внутрішніх та зовнішніх бар'єрів: паливні збірки, герметичні контейнери, приміщення сховищ та санітарно-захисні зони [28]. Такий підхід дозволяє знизити ризик поширення радіоактивності навіть у разі часткової відмови одного з бар'єрів.

Дослідження [53] показують, що ефективність конструктивних бар'єрів визначається станом матеріалів, їх корозійною стійкістю та наявністю систем моніторингу.

Зовнішні бар'єри спрямовані на протидію зовнішнім загрозам, включаючи механічні пошкодження, природні катаклізми та потенційні дії третіх осіб. До них належать санітарно-захисні зони, обмежений доступ до критичних об'єктів та охоронні системи периметра [64].

Відсутність своєчасного моніторингу стану бар'єрів захисту може призвести до прихованих дефектів, які з часом підвищують ризик викидів радіоактивних речовин [53]. Крім того, дослідження підкреслюють необхідність адаптації систем фізичного захисту до потенційних зовнішніх загроз, включаючи воєнні дії, терористичні атаки та надзвичайні техногенні події [52, 65].

У перші роки після вивантаження палива з реактора його зберігають у басейнах витримки, де вода виконує роль як теплового поглинача, так і радіаційного захисту. Системи охолодження басейнів зазвичай включають насосні станції, теплообмінники та резервні джерела енергії для забезпечення безперервного відведення тепла [66]. Вода в басейні повинна підтримувати температуру нижче 50 °С, щоб уникнути радіолізу та накопичення водню, що може призвести до вибухонебезпечних ситуацій.

Згідно з дослідженням [67], теплогідрравлічні характеристики басейнів витримки визначають ефективність охолодження, і пасивні системи, здатні

функціонувати без зовнішнього живлення, підвищують надійність експлуатації сховищ.

Після завершення ядерної реакції паливо продовжує виділяти тепло через бета-розпад фрагментів поділу. Наприклад, через годину після зупинки реактора залишкове тепловиділення становить близько 1,5% від початкової потужності, а через добу – близько 0,4% [68]. Це підкреслює необхідність ефективного відведення тепла протягом тривалого часу після зупинки реактора.

Науковці [69] продемонстрували, що використання інертних газів високої щільності у сухих контейнерах покращує теплопередачу, знижує температуру палива та зменшує залежність від активних охолоджувальних систем.

Робота [70] підкреслює важливість інтеграції пасивних стратегій відведення тепла, таких як природна конвекція та спеціальні теплообмінні матеріали, що забезпечує довгострокову безпеку сховищ та знижує ризики у випадку відмови активних систем. У роботі [71] запропоновано метод прогнозування залишкового тепла за допомогою гамма-аналізу, що дозволяє оцінити теплові характеристики палива без його переміщення.

Для довгострокового зберігання ВЯП використовуються сухі контейнери, які забезпечують пасивне охолодження через природну конвекцію повітря. Такі системи не потребують зовнішнього енергопостачання та використовуються у багатьох країнах, включаючи США та Францію [72].

Сучасні дослідження спрямовані на розроблення альтернативних систем охолодження, таких як використання CO_2 (sCO_2) для відведення тепла. Проєкт sCO_2 -HeRo розробляє самопідтримувану систему охолодження, яка не залежить від зовнішніх джерел енергії та забезпечує високий рівень надійності [73, 74].

Для оцінювання ефективності охолодження та прогнозування температурних режимів використовуються такі інструменти, як MOOSE [75] та NekRS [76], що дозволяють проводити симуляції теплових процесів у контейнерах для ВЯП.

Сейсмічна та гідрологічна стійкість сховищ повинна відповідати регіональним ризикам, з урахуванням місцевих сейсмічних характеристик та потенційного впливу на підземні води [77, 78].

Захист від пожеж забезпечується багаторівневими системами: протипожежними бар'єрами, автоматичними спринклерними та газовими системами гасіння, а також плануванням безпечної евакуації персоналу [79, 80].

Для захисту від вибухонебезпечних, токсичних або запалювальних речовин у зоні впливу застосовуються ізоляційні приміщення, контроль за обробкою та зберіганням небезпечних матеріалів, а також обмеження доступу до критичних ділянок [81, 82].

Планування території включає встановлення санітарно-захисних зон навколо сховищ, обмеження доступу та розподіл території на функціональні зони для забезпечення швидкого реагування у надзвичайних ситуаціях [83, 84].

Основні заходи захисту від навмисних дій (несанкціонованого доступу, саботажу) включають контроль доступу через пропускні системи, охорону периметра та відеоспостереження, системи сигналізації та сенсорів для раннього виявлення проникнення [85–87]. План реагування на інциденти охоплює сценарії протидії вторгненню чи терористичним загрозам та інтеграцію зі службою цивільного захисту й правоохоронними структурами [88]. Фізичне посилення об'єктів, включаючи армування та бетонні укриття, забезпечує захист критичних компонентів від вибухів і механічних пошкоджень [89, 90].

Основні заходи ефективного управління експлуатацією та старінням сховищ ВЯП включають регулярні програми технічного обслуговування та інспекцій контейнерів і обладнання для виявлення механічних ушкоджень, корозії або інших дефектів, що можуть впливати на цілісність конструкцій [16, 91]. Аналіз стану матеріалів та конструкцій здійснюється з урахуванням впливу старіння, корозійних процесів, термічного навантаження та радіаційного впливу, що дозволяє своєчасно визначати необхідність відновлювальних робіт або заміни компонентів [91, 92].

Документування та контроль інвентаря ВЯП охоплює точний облік кількості, тепловиділення, рівня радіоактивності та стану контейнерів, що забезпечує можливість оперативного реагування на будь-які зміни та підвищує безпеку зберігання [93, 94]. Крім того, плани аварійного реагування регулярно актуалізуються з урахуванням реальних умов експлуатації, зміни характеристик сховищ та оновлення нормативних вимог, що дозволяє адаптувати процедури до потенційних надзвичайних ситуацій [95, 96]. Сукупність цих заходів формує багаторівневу систему управління, яка знижує ризики пошкодження контейнерів і втрати контролю над ВЯП, а також забезпечує стабільну безпечну експлуатацію сховища протягом усього терміну служби.

Для забезпечення безперервної роботи сховищ ВЯП важливо мати резервні джерела енергії та комунікацій, що підтримують охолодження та моніторинг у разі відключень [16, 97]. Доступ аварійних бригад та технічних служб до сховищ у будь-яких умовах дозволяє оперативно усувати дефекти та проводити аварійне реагування [98, 99]. Організація резервних ланцюгів постачання для обладнання, реагентів та запасних частин забезпечує безперебійну експлуатацію та готовність до надзвичайних ситуацій [100, 101].

Інженерні, організаційні та фізичні заходи захисту знижують імовірність пошкодження сховища ВЯП, але не охоплюють повністю питання управління екологічними наслідками аварії воєнного походження. У такій ситуації

необхідно визначати фактичний стан прилеглої території, прогнозувати можливе поширення забруднення, виділяти ділянки з підвищеним рівнем небезпеки та обирати першочергові природоохоронні заходи. У роботі [51] запропоновано підхід до управління екологічною безпекою сховища ВЯП в умовах неповноти інформації, обмеженого доступу до території та обмежених ресурсів реагування.

Таким чином, заходи захисту сухого сховища відпрацьованого ядерного палива охоплюють інженерні бар'єри, радіаційний і фізичний захист, тепловідведення, контроль старіння, аварійну готовність і моніторинг довкілля. У штатних умовах вони спрямовані на підтримання безпечного зберігання палива та запобігання його впливу на персонал, населення і навколишнє природне середовище. У разі аварії, спричиненої воєнними діями, така система має бути доповнена процедурами оперативного контролю стану прилеглих територій та обґрунтуванням заходів щодо локалізації можливого радіоактивного забруднення.

1.3 Системи екологічного та радіаційного моніторингу в зонах впливу ядерних об'єктів

Системи екологічного та радіаційного моніторингу в зонах впливу ядерних об'єктів призначені для отримання достовірної інформації про стан навколишнього природного середовища, виявлення відхилень від фонових або нормативних показників, оцінювання можливого впливу на персонал, населення і компоненти довкілля, а також інформаційного забезпечення аварійного реагування.

У сфері поводження з ВЯП моніторинг охоплює контроль потужності дози гамма-випромінювання, визначення вмісту радіонуклідів у повітрі, воді, ґрунтах, донних відкладах і біоті, спостереження за метеорологічними

параметрами та аналіз змін у зоні впливу об'єкта [102–106]. Такі дані використовуються для встановлення джерел можливого радіоактивного забруднення, просторового уточнення його меж, прогнозування перенесення радіоактивних речовин і планування природоохоронних заходів.

Для попереднього оцінювання стану ґрунтів можуть використовуватися не лише лабораторні методи, а й польові експрес-показники. У праці [107] розглянуто оцінювання забруднення ґрунтів у районах ураження ракетно-артилерійських систем за показниками електропровідності. Такий підхід може застосовуватися для виявлення ділянок зі зміненими фізико-хімічними властивостями ґрунту та визначення місць подальшого пробовідбору.

У праці [108] розглянуто інтегровану модель оцінювання забруднення ґрунтів і ґрунтових вод на уражених територіях. Для сухого сховища ВЯП такий підхід може бути використаний під час оцінювання стану геосередовища з урахуванням можливого перенесення забруднюючих речовин у ґрунтах і підземних водах. Це дає змогу враховувати не лише радіаційні показники, а й загальний стан території у зоні можливого впливу.

Моніторингові системи виконують не лише функцію оперативного контролю, а й забезпечують накопичення довгострокових рядів даних. Це дає змогу аналізувати фонові зміни радіаційного стану, виявляти тенденції накопичення радіонуклідів у компонентах довкілля, уточнювати параметри моделей розповсюдження радіоактивного забруднення та оцінювати ефективність заходів захисту. Інформація, отримана під час спостережень, також використовується для інформування органів влади, експлуатуючих організацій, міжнародних структур і громадськості відповідно до принципів відкритості та прозорості [62, 63].

В Україні екологічний та радіаційний моніторинг у зонах впливу ядерних об'єктів здійснюють Державне агентство України з управління зоною відчуження [109], Державна інспекція ядерного регулювання України [110], Український гідрометеорологічний центр Державної служби України з

надзвичайних ситуацій [111] та Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія “Енергоатом”» [112].

Основним радіаційним показником, що контролюється в зонах впливу ядерних об’єктів, є потужність дози гамма-випромінювання. Її вимірювання здійснюється стаціонарними постами, мобільними лабораторіями, автомобільними комплексами, переносними дозиметрами та радіометрами [113]. У разі аварійної ситуації ці дані можуть використовуватися для оперативного картування території, визначення ділянок із підвищеним рівнем радіаційного фону та уточнення меж зон контролю.

Окрему групу показників становить вміст радіонуклідів у повітрі, атмосферних випадіннях, поверхневих і підземних водах, ґрунтах, донних відкладах та рослинності. Аналіз таких середовищ дає змогу оцінювати як поточне забруднення, так і довгострокове накопичення радіоактивних речовин [114]. Для водного середовища застосовуються активні й пасивні пробовідбірники, сорбційні матеріали та лабораторні методи визначення радіонуклідного складу. Для ґрунтів і донних відкладів важливим є просторове картування забруднення, оскільки ці компоненти можуть фіксувати наслідки попередніх викидів і вторинного перенесення радіоактивних речовин.

Метеорологічні параметри – напрямок і швидкість вітру, температура, вологість, атмосферний тиск, опади та характеристики атмосферної стабільності – є необхідними для прогнозування перенесення радіоактивних аерозолів і пилу [115, 116]. У разі аварії на сухому сховищі ВЯП ці дані мають використовуватися разом із результатами радіаційних вимірювань, оскільки напрямок перенесення забруднення може змінюватися залежно від поточних погодних умов. Ефективність мереж спостереження визначається їх просторовим розміщенням, чутливістю приладів, періодичністю вимірювань і здатністю фіксувати короткочасні аномалії [117].

Засоби моніторингу радіаційного стану поділяються на стаціонарні, мобільні та дистанційні. Стаціонарні системи забезпечують безперервне

вимірювання параметрів у контрольних точках і передавання даних до центрів спостереження. До таких систем належать локальні мережі радіаційного контролю, пости гамма-моніторингу, автоматизовані комплекси контролю повітряного середовища та інші засоби, що формують основу державного й об'єктового моніторингу [102, 118, 119].

Мобільні комплекси використовуються для оперативного обстеження територій, картування радіаційного фону, перевірки результатів стаціонарних вимірювань і уточнення меж радіоактивного забруднення. Вони можуть базуватися на автомобільних лабораторіях, переносних дозиметрах і радіометрах, зокрема приладах типу ДРГ-01Т, ДКС-АТ1123, РКС-20.03, СРП-68-01 [120, 121]. У складних умовах перевагу мають рішення, які зменшують потребу перебування персоналу в потенційно небезпечній зоні.

Дистанційні й автоматизовані системи контролю поєднують безперервне спостереження, передавання даних у режимі реального часу та автоматизоване оброблення результатів. До них належать системи типу ASKRO, TERRA Cloud, мережі на основі IoT-рішень, а також комплекси, що можуть інтегрувати стаціонарні пости, мобільні платформи та безпілотні засоби [122–124]. Такі системи дають змогу працювати з великими масивами даних, відстежувати зміну параметрів у часі та формувати інформаційну основу для прогнозування розвитку аварійної ситуації.

Для кількісного визначення радіонуклідів у пробах навколишнього природного середовища застосовують лабораторні та польові методи радіаційного контролю. До традиційних лабораторних методів належать гамма-спектрометрія високої роздільної здатності з використанням HPGe-детекторів, альфа- і бета-лічильники, а також радіохімічні методи виділення та визначення окремих ізотопів. HPGe-спектрометрія застосовується для визначення гамма-випромінювальних нуклідів у ґрунтах, донних відкладах і пробах води завдяки високій енергетичній роздільній здатності [125]. Для визначення актинідів і бета-випромінювальних нуклідів, зокрема Sr-90,

використовують радіохімічне розділення з подальшим вимірюванням активності [125, 126].

Окремим напрямом є застосування мас-спектрометричних методів, зокрема ICP-MS, ICP-MS/MS, AMS і TIMS, для визначення довгоживучих радіонуклідів та ізотопів у низьких концентраціях [127]. Перевагою таких методів є висока чутливість, скорочення часу аналізу та можливість визначення ізотопного складу. Водночас точність результатів залежить від підготовки проб, очищення зразків, урахування матричних інтерференцій та досягнення необхідних меж виявлення [128–130].

Для польових вимірювань використовують портативні NaI(Tl)-детектори, мобільні HPGe-системи, автомобільні комплекси та маршрутизовані піші обстеження, що дають змогу оперативно картувати просторовий розподіл гамма-фону [131]. У водному середовищі застосовують пасивні пробовідбірники, зокрема DGT-системи, які забезпечують *in situ* накопичення актинідів та інших радіонуклідів без постійної присутності оператора [66]. Класичний пробовідбір ґрунтів, донних відкладів, поверхневих і підземних вод, рослинності та харчових продуктів залишається необхідним для радіохімічного й ізотопного аналізу, оцінювання накопичення радіонуклідів і формування інвентаризації радіонуклідного навантаження [132].

Перспективним напрямом є дистанційне радіаційне картування із застосуванням БпЛА та автономних наземних платформ. БпЛА, оснащені компактними гамма-детекторами, можуть забезпечувати швидке обстеження складнодоступних територій і формування карт із високою просторовою деталізацією [133]. Разом з тим точність таких даних залежить від висоти польоту, швидкості руху, калібрування сенсорів, геоприв'язки та характеристик підстильної поверхні. Тому результати дистанційних вимірювань доцільно поєднувати з наземними обстеженнями й лабораторним аналізом проб.

Математичне моделювання поширення радіонуклідів є складовою системи моніторингу, оскільки дає змогу прогнозувати просторово-часовий

розподіл забруднення, інтерпретувати результати вимірювань і відновлювати параметри джерела викиду. У таких моделях враховують адвекцію, турбулентне розсіювання, сухе і вологе осадження, радіоактивний розпад, хімічні перетворення та взаємодію радіонуклідів із поверхнями або середовищами перенесення [134].

Для оперативних оцінок локального впливу застосовують гаусові моделі, які є простими у використанні та придатними для короткочасних розрахунків за відносно однорідних метеорологічних умов. Для регіональних оцінок використовують ейлерові сіткові моделі, що описують перенесення і розсіювання домішок у просторі на основі дифузійно-адвективних рівнянь. Лагранжеві частинкові моделі дають змогу відстежувати траєкторії значної кількості умовних частинок і застосовуються для трасування перенесення, зворотного моделювання та аналізу сценаріїв на середніх і великих відстанях [135].

Серед поширених інструментів атмосферного моделювання використовують HYSPLIT і FLEXPART. HYSPLIT застосовується для швидкої оцінки траєкторій, перенесення і розсіювання домішок у разі небезпечних подій [136]. FLEXPART орієнтований на регіональні та довготривалі симуляції, зокрема на зворотне трасування джерел і кількісне оцінювання внеску радіонуклідів у забруднення територій [137]. Для оперативного реагування також застосовують спеціалізовані системи підтримки рішень, зокрема RASCAL, які поєднують моделі джерела, схеми атмосферної дисперсії та набори сценарних параметрів для розрахунків в умовах обмеженої інформації [138].

Уточнення параметрів джерела забруднення може здійснюватися методами зворотного моделювання. На основі результатів вимірювань радіоактивності визначають орієнтовний час, інтенсивність, обсяг і характеристики викиду. Для цього застосовують байєсівські підходи, оптимізаційні методи, матриці чутливості та ансамблеві схеми, які дають змогу враховувати невизначеність вихідних даних [139]. Поєднання моделей

зі спостереженнями через методи асиміляції даних, зокрема EnKF і варіаційні схеми, зменшує похибку короткострокового прогнозу та підвищує точність реконструкції джерела [140].

Для оцінювання перенесення радіонуклідів у поверхневих і підземних водах застосовують гідрологічні та гідрогеологічні моделі. Зокрема, поєднання MODFLOW із транспортними модулями типу MT3DMS дає змогу описувати фільтраційний потік, адвекцію, дифузію, дисперсію та сорбцію радіонуклідів у підземному середовищі [141]. Такі інструменти використовують для оцінювання часу міграції забруднення, визначення зон ризику та аналізу можливого впливу на джерела водопостачання. Верифікація моделей має ґрунтуватися на польових, лабораторних і моніторингових даних.

Моделювання забруднення водних об'єктів є окремою складовою оцінювання наслідків аварійного впливу. У праці [142] розглянуто моделювання процесу пошуку джерел забруднення водних об'єктів в умовах сучасних воєнних загроз. У разі аварії на сухому сховищі ВЯП забруднення може поширюватися не лише повітряним шляхом, а й через поверхневий стік, інфільтрацію та подальше перенесення у підземних водах. Тому визначення джерела забруднення, напрямів його перенесення та ділянок можливого накопичення є складовою оцінювання екологічної небезпеки.

Основні обмеження математичного моделювання пов'язані з невизначеністю параметрів джерела, похибками метеорологічних даних, складністю рельєфу, неоднорідністю забудови, нестачею вимірювань для інверсних задач і змінністю умов перенесення. Для зменшення цих обмежень застосовують ансамблеві прогнози, порівняння результатів кількох моделей, асиміляцію спостережень та інтеграцію розрахунків із даними польового моніторингу [143].

Геоінформаційні системи (ГІС) забезпечують просторову інтеграцію результатів польових вимірювань, лабораторного аналізу, дистанційного зондування, дисперсійного й гідрологічного моделювання. У ГІС-середовищі

можуть поєднуватися карти радіаційного фону, результати мобільних обстежень, дані атмосферного перенесення, гідрологічні шари, характеристики землекористування та соціально-просторові показники [144–147]. Це створює основу для картування зон забруднення, оцінювання екологічного ризику та визначення пріоритетних ділянок контролю.

Досвід застосування ГІС і дистанційного зондування під час аварійних ситуацій показує їхню придатність для швидкого картування зон руйнувань, затоплень, радіоактивного забруднення та потенційного радіаційного впливу [148]. Поєднання геопросторових даних із моделями атмосферного перенесення, гідрогеологічного руху радіонуклідів і багатокритеріальним просторовим аналізом дає змогу визначати території з підвищеним екологічним ризиком і пріоритети природоохоронних заходів [149–151].

Для просторового аналізу території може застосовуватися геопросторове профілювання. У праці [152] запропоновано процедури геопросторового профілювання території можливого радіоактивного забруднення внаслідок ракетно-артилерійських уражень. Такий підхід передбачає визначення меж потенційно ураженої території, збирання вихідних даних, використання дистанційного зондування, картування небезпеки та підготовку даних для прийняття рішень. Для сухого сховища ВЯП це може бути використано для визначення ділянок, які потребують першочергового контролю.

У праці [153] розглянуто питання моніторингу територій навколо сховищ ВЯП. У цьому контексті території навколо сховищ ВЯП доцільно розглядати як зону постійного контролю, де результати стаціонарних вимірювань, мобільних обстежень, дистанційного моніторингу та лабораторного аналізу мають поєднуватися для оцінювання стану довкілля і підтримки управлінських рішень.

Для теми дисертаційного дослідження принциповим є те, що моніторинг у зоні впливу сухого сховища ВЯП має забезпечувати не лише фіксацію

радіаційних показників, а й підтримку управлінських рішень. У разі аварії, спричиненої воєнними діями, система спостереження повинна давати змогу визначати пріоритетні ділянки обстеження, уточнювати межі можливого радіоактивного забруднення, оцінювати напрями його поширення та формувати вихідні дані для математичного моделювання.

Таким чином, екологічний та радіаційний моніторинг у зонах впливу ядерних об'єктів є джерелом даних для оцінювання стану довкілля та виявлення відхилень від фонових або нормативних показників. Для сухого сховища відпрацьованого ядерного палива доцільним є поєднання стаціонарних постів контролю, мобільних лабораторій, лабораторного аналізу проб, ГІС-інструментів та дистанційного моніторингу із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Використання безпілотних літальних апаратів дає змогу виконувати оперативне обстеження важкодоступних або потенційно небезпечних ділянок, уточнювати просторовий розподіл радіаційних показників і формувати картографічну основу для визначення зон екологічної безпеки.

1.4 Формулювання наукової задачі та напрями подальшого дослідження

Результати аналізу сучасних підходів до зберігання ВЯП та систем екологічного і радіаційного моніторингу дали змогу сформулювати науково-практичну задачу дослідження. Її зміст полягає в обґрунтуванні підходу до управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, з урахуванням обмеженого доступу до окремих ділянок, неповноти первинної інформації та потреби в оперативному уточненні зон можливого радіоактивного забруднення.

Метою дисертаційного дослідження є розроблення методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, на основі розподілу пошуково-вимірювального ресурсу за пріоритетними зонами контролю, результатів дистанційного та інструментального моніторингу, математичного моделювання поширення небезпечних чинників і оцінювання екологічного ризику як складових технології захисту навколишнього природного середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі науково-практичні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану забезпечення екологічної безпеки сховищ ВЯП.

2. Визначити та систематизувати небезпечні чинники та критерії оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища ВЯП у разі аварії, спричиненої воєнними діями

3. Розробити математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища ВЯП у разі аварії, спричиненої воєнними діями.

4. Розробити методику управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями.

5. Перевірити достовірність математичної моделі та методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями.

6. Розробити рекомендації щодо застосування результатів дослідження для забезпечення екологічної безпеки у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями.

Вирішення зазначених завдань формує послідовність дисертаційного дослідження: від аналізу сучасного стану забезпечення екологічної безпеки та

визначення небезпечних чинників до побудови математичної моделі, розроблення методики управління, її перевірки й підготовки практичних рекомендацій. Така логіка забезпечує зв'язок між теоретичним обґрунтуванням, розрахунковими процедурами та прикладним використанням результатів для захисту навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива.

Висновки до розділу 1

1. Встановлено, що чинна нормативно-правова база України регламентує вимоги до ядерної та радіаційної безпеки, фізичного захисту, поводження з ядерним паливом, оцінювання впливу на довкілля і радіаційного контролю. Водночас ці підходи переважно орієнтовані на штатну експлуатацію, проєктні аварії, природні й техногенні впливи мирного часу, тоді як аварія, спричинена воєнними діями, потребує окремого врахування механічного пошкодження об'єкта, обмеженого доступу до території та неповноти первинної інформації.

2. Встановлено, що заходи захисту сухих сховищ відпрацьованого ядерного палива охоплюють інженерні бар'єри, радіаційний і фізичний захист, тепловідведення, контроль старіння, аварійну готовність і моніторинг довкілля. У штатних умовах вони спрямовані на підтримання безпечного зберігання палива та запобігання його впливу на персонал, населення і навколишнє природне середовище. У разі аварії, спричиненої воєнними діями, така система має бути доповнена процедурами оперативного контролю стану прилеглих територій та обґрунтуванням заходів щодо локалізації можливого радіоактивного забруднення.

3. Екологічний та радіаційний моніторинг у зонах впливу ядерних об'єктів є джерелом даних для оцінювання стану довкілля та виявлення

відхилень від фонових або нормативних показників. Для сухого сховища відпрацьованого ядерного палива доцільним є поєднання стаціонарних постів контролю, мобільних лабораторій, лабораторного аналізу проб, ГІС-інструментів та дистанційного моніторингу із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Використання безпілотних літальних апаратів дає змогу виконувати оперативне обстеження важкодоступних або потенційно небезпечних ділянок, уточнювати просторовий розподіл радіаційних показників і формувати картографічну основу для визначення зон екологічної небезпеки.

4. Сформульовано науково-практичну задачу дисертаційного дослідження, яка полягає в розробленні методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями. Подальше дослідження має бути спрямоване на визначення небезпечних чинників і критеріїв оцінювання, побудову математичної моделі моніторингу, розподіл пошуково-вимірвальних дій за пріоритетними зонами контролю, перевірку запропонованої методики та підготовку практичних рекомендацій.

РОЗДІЛ 2 НЕБЕЗПЕЧНІ ЧИННИКИ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ СУХОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА У РАЗІ АВАРІЇ, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ

Рішення другої наукової задачі дисертаційного дослідження щодо визначення небезпечних чинників і критеріїв оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища ВЯП у разі аварії, спричиненої воєнними діями, здійснено за такими напрямками. Спочатку систематизовано небезпечні чинники аварійного впливу на сухе сховище ВЯП. Далі обґрунтовано систему критеріїв оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища ВЯП. Після цього визначено потенційні шляхи поширення радіоактивного забруднення у зоні впливу сухого сховища ВЯП. Окремо розглянуто підхід до оцінювання можливих екологічних наслідків аварії на сухому сховищі ВЯП.

2.1 Небезпечні чинники аварійного впливу на сухе сховище відпрацьованого ядерного палива

Аварійний вплив на сухе сховище ВЯП, спричинений воєнними діями, розглядається як сукупність чинників (табл. 2.1), що здатні порушити цілісність інженерних бар'єрів, змінити умови безпечного зберігання палива, ускладнити контроль стану об'єкта та створити передумови для забруднення навколишнього природного середовища. На відміну від штатної експлуатації або проєктних аварій, такий вплив характеризується невизначеністю місця пошкодження, обмеженим доступом до окремих ділянок і потребою в оперативному встановленні зон можливого погіршення екологічного стану території.

Таблиця 2.1 Класифікація небезпечних чинників аварійного впливу на сухе сховище ВЯП

Група чинників	Можливий прояв	Екологічний наслідок	Дані для оцінювання
Механічні	пошкодження контейнерів, модулів, захисних конструкцій, технологічних майданчиків	локальне порушення бар'єрів, формування ділянок потенційного забруднення	місце пошкодження, характер руйнування, рівні радіаційного фону
Теплові	пожежа, локальне нагрівання, зміна умов пасивного тепловідведення	погіршення стану конструкцій, посилення наслідків механічного впливу	температура, зона нагрівання, стан вентиляційних каналів
Радіаційні	поява радіоактивного пилу, аерозолів, забруднених фрагментів	забруднення повітря, поверхонь і ґрунтового покриву	потужність дози, концентрація радіонуклідів, щільність забруднення
Поверхнево-міграційні	забруднення покриттів, ґрунту, дренажних ділянок	вторинне перенесення забруднення стоком або пилом	стан покриттів, рельєф, напрями стоку, метеоумови
Організаційно-інформаційні	обмеження доступу, неповнота первинних даних, нерівномірність вимірювань	невизначеність меж небезпечної зони	доступність ділянок, кількість вимірювань, дані БПЛА

Небезпечні чинники аварійного впливу доцільно розглядати за походженням, характером прояву та можливими екологічними наслідками. За походженням вони поділяються на механічні, теплові, радіаційні, поверхнево-міграційні, організаційно-інформаційні та комбіновані. За характером прояву виділяються прямі чинники, які безпосередньо впливають на елементи сховища, і вторинні чинники, що виникають унаслідок перенесення забруднених частинок, зміни теплового режиму або ускладнення контролю території.

Одним із первинних джерел небезпеки є механічне пошкодження елементів сухого сховища. До таких елементів належать контейнери або модулі зберігання, захисні конструкції, технологічні майданчики, транспортні ділянки, вентиляційні канали, системи контролю та допоміжна інфраструктура. Пошкодження цих елементів може призвести до порушення захисних функцій сховища, зміни умов тепловідведення, втрати герметичності окремих бар'єрів або утворення локальних ділянок потенційного забруднення.

Чинники, пов'язані з дією ударного навантаження, уламків, локального руйнування конструкцій і вторинного переміщення матеріалів, формують неоднорідні за площею та рівнем небезпеки ділянки. У подальшому такі ділянки розглядаються як пріоритетні зони пошуково-вимірювального контролю.

Теплові чинники аварійного впливу пов'язані з виникненням пожежі, локальним підвищенням температури, нагріванням конструкцій сховища або зміною умов пасивного відведення тепла. Для сухих систем зберігання ВЯП збереження допустимого теплового режиму впливає на стан паливних збірок, контейнерів і захисних матеріалів. Порушення тепловідведення може посилювати наслідки механічного пошкодження та створювати умови для погіршення радіаційної й екологічної обстановки.

Радіаційні чинники проявляються через утворення радіоактивного пилу, аерозольних частинок або забруднених фрагментів матеріалів у разі

пошкодження захисних бар'єрів чи поверхонь, на яких могли накопичуватися радіоактивні речовини. Такі прояви можуть фіксуватися не лише у зоні пошкодження, а й на прилеглих ділянках залежно від метеорологічних умов, стану покриттів і характеру подальшого перенесення.

Для кількісного порівняння небезпечних чинників різнорідні показники необхідно звести до єдиної безрозмірної шкали. Для цього використовується нормування окремих складових:

$$X_{q,i}^{(n)} = \frac{X_{q,i} - X_{q,\min}}{X_{q,\max} - X_{q,\min}}, \quad (2.1)$$

де $X_{q,i}^{(n)}$ – нормоване значення q-го показника для i-го небезпечного чинника; $X_{q,i}$ – фактичне або розрахункове значення показника; $X_{q,\min}$, $X_{q,\max}$ – мінімальне та максимальне значення показника в межах прийнятої шкали; q – складова оцінювання: механічне пошкодження, тепловий вплив, радіаційний прояв, потенціал поширення, невизначеність даних або обмеження доступу.

Після нормування інтегральний показник потенційної екологічної небезпеки i-го чинника подається у вигляді зваженої суми складових:

$$E_i = w_M M_i^{(n)} + w_T T_i^{(n)} + w_R R_i^{(n)} + w_L L_i^{(n)} + w_U U_i^{(n)} + w_A A_i^{(n)}, \quad (2.2)$$

де E_i – інтегральний показник потенційної екологічної небезпеки i-го чинника; $M_i^{(n)}$ – нормований рівень механічного пошкодження; $T_i^{(n)}$ – нормований рівень теплового впливу; $R_i^{(n)}$ – нормований рівень радіаційного прояву; $L_i^{(n)}$ – нормований потенціал поширення радіоактивного забруднення; $U_i^{(n)}$ – нормований рівень невизначеності первинних даних;

$A_i^{(n)}$ – нормований рівень обмеження доступу; $w_M, w_T, w_R, w_L, w_U, w_A$ – вагові коефіцієнти відповідних складових, для яких виконується умова:

$$w_M + w_T + w_R + w_L + w_U + w_A = 1. \quad (2.3)$$

Таблиця 2.2 Шкала інтерпретації нормованих показників та інтегрального показника небезпеки

Діапазон значень	Рівень прояву	Характеристика ситуації
0,00–0,25	низький	відхилення незначні, плановий контроль достатній
0,26–0,50	помірний	є локальні ознаки небезпеки, потрібне уточнення даних
0,51–0,75	підвищений	наявні ознаки пошкодження або забруднення, потрібне пріоритетне обстеження
0,76–1,00	високий	імовірне формування зони екологічної небезпеки, потрібні першочергові пошуково-вимірювальні дії

Обмеження доступу персоналу до окремих зон після аварійного впливу є окремим чинником, який ускладнює оцінювання стану екологічної безпеки. За таких умов неможливо одразу отримати повну інформацію про стан усіх елементів сховища, рівні радіаційного фону, характер пошкодження та межі можливого радіоактивного забруднення. Це підвищує роль дистанційного обстеження із застосуванням безпілотних літальних апаратів.

Для переходу від оцінювання окремого чинника до оцінювання ділянки контролю вводиться зональний показник небезпеки. Якщо на k -ту ділянку

впливає множина чинників G_k , то узагальнений рівень небезпеки цієї ділянки можна визначити за найбільшим значенням серед чинників, що в ній проявляються:

$$Z_k = \max_{i \in G_k} E_i, \quad (2.4)$$

де Z_k – узагальнений рівень потенційної небезпеки k -ї ділянки контролю;
 G_k – множина небезпечних чинників, що можуть проявлятися на цій ділянці; E_i – інтегральний показник потенційної екологічної небезпеки i -го чинника.

Для визначення черговості обстеження території використовується коефіцієнт пріоритетності пошуково-вимірювального контролю:

$$P_k = Z_k \left(1 + U_k^{(n)}\right) \left(1 + A_k^{(n)}\right), \quad (2.5)$$

де P_k – коефіцієнт пріоритетності обстеження k -ї ділянки;
 Z_k – узагальнений рівень небезпеки ділянки; $U_k^{(n)}$ – нормований рівень невизначеності даних для цієї ділянки; $A_k^{(n)}$ – нормований рівень обмеження доступу до ділянки. Чим більшим є значення P_k , тим вищою є черговість її обстеження.

Технічні можливості БпЛА впливають на обсяг території, що може бути обстежена протягом заданого часу. Площа дистанційного обстеження визначається шириною смуги вимірювання, швидкістю польоту і тривалістю виконання завдання:

$$S_{d,k} = B_k v_k t_k, \quad (2.6)$$

де $S_{d,k}$ – площа дистанційного обстеження k -ї ділянки, обстежена за допомогою безпілотного літального апарата; B_k – ширина смуги огляду або

вимірювання; v_k – швидкість польоту під час обстеження; t_k – час виконання пошуково-вимірального завдання на цій ділянці.

За геометричними параметрами сенсора ширина смуги огляду може бути визначена так:

$$B_k = 2h_k \tan\left(\frac{\varphi_k}{2}\right), \quad (2.7)$$

де h_k – висота польоту безпілотного літального апарата над k -ю ділянкою; φ_k – кут огляду сенсора або зона ефективного вимірювання.

Для оцінювання достатності дистанційного обстеження вводиться коефіцієнт покриття пріоритетної ділянки. Щоб уникнути змішування з коефіцієнтом перевищення у підрозділі 2.2, для цього показника використано позначення H_k :

$$H_k = \frac{S_{d,k}}{S_k}, \quad (2.8)$$

де H_k – коефіцієнт покриття k -ї ділянки; $S_{d,k}$ – площа, фактично обстежена за допомогою безпілотного літального апарата; S_k – площа ділянки, що потребує контролю. Якщо $H_k \geq 1$, ділянка вважається повністю охопленою дистанційним обстеженням. Якщо $H_k < 1$, потрібне повторне обстеження, зміна маршруту або залучення додаткових засобів контролю.

Використання наведених показників дає змогу кількісно пов'язати небезпечний чинник, доступність ділянки, рівень інформаційної невизначеності та технічні можливості дистанційного обстеження. Для формування подальшої математичної моделі небезпечні чинники слід розглядати не лише як перелік можливих пошкоджень, а як джерела інформаційної невизначеності. Після аварії невідомими можуть залишатися місце виникнення небезпечної зміни, її просторові межі, інтенсивність

радіаційного прояву, динаміка розвитку та можливий вплив на компоненти довкілля. Тому зона екологічної небезпеки може бути подана як об'єкт пошуку, положення якого уточнюється за результатами пошуково-вимірювальних дій.

Таким чином, систематизовано небезпечні чинники аварійного впливу на сухе сховище відпрацьованого ядерного палива, спричиненого воєнними діями. До них віднесено механічне пошкодження контейнерів і захисних конструкцій, порушення умов тепловідведення, утворення радіоактивного пилу й аерозолів, забруднення поверхонь і ґрунтового покриву, обмеження доступу до окремих ділянок та неповноту первинної інформації. Показано, що ці чинники формують зони потенційної екологічної небезпеки, які можуть розглядатися як об'єкти подальшого пошуково-вимірювального контролю.

2.2 Критерії оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища відпрацьованого ядерного палива

Критерії екологічної безпеки сухого сховища ВЯП мають відображати не перелік аварійних чинників, а стан довкілля після їх можливого прояву. У межах цього дослідження критерій розглядається як кількісний або якісний показник, за яким встановлюється рівень безпеки контрольованої ділянки та формується інформаційна основа для подальшого управлінського рішення.

У разі аварії, спричиненої воєнними діями, система критеріїв повинна враховувати просторову неоднорідність можливого радіоактивного забруднення, обмеженість первинних даних і потребу в оперативному уточненні зон контролю. Тому критерії поділяються на радіаційні, середовищні, просторові, часові та інформаційно-вимірювальні (табл. 2.3). Такий поділ пов'язує результати моніторингу з подальшою математичною моделлю пошуково-вимірювального контролю.

Таблиця 2.3 Система критеріїв оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища ВЯП

Група критеріїв	Зміст критерію	Показники для оцінювання	Призначення в дослідженні
Радіаційні	характеризують рівень радіаційного прояву на ділянці контролю	потужність дози, концентрація радіонуклідів, щільність забруднення поверхні	встановлення факту відхилення від контрольного або фонового рівня
Середовищні	відображають стан компонентів довкілля	забруднення повітря, ґрунту, поверхневих і підземних вод	визначення природного середовища, яке зазнало впливу
Просторові	характеризують межі та площу небезпечної зони	площа забруднення, відстань від джерела, напрям поширення	зонування території та вибір ділянок першочергового контролю
Часові	показують динаміку зміни показників	час виявлення, швидкість зміни, тривалість збереження відхилення	оцінювання розвитку ситуації в часі
Інформаційно-вимірвальні	характеризують достатність і надійність даних	кількість вимірювань, охоплення ділянки, підтвердження різними засобами контролю	визначення потреби у повторному або дистанційному обстеженні

Радіаційні критерії є базовими для первинного встановлення небезпечної зміни. До них належать потужність дози гамма-випромінювання, щільність радіоактивного забруднення поверхні, концентрація радіонуклідів у повітрі, воді та ґрунті. Для порівняння фактичного значення показника з контрольним або нормативним рівнем використовується коефіцієнт перевищення:

$$K(r, k) = \frac{X(r, k)}{X_{\text{контр}}(r)}, \quad (2.9)$$

де $K(r, k)$ – коефіцієнт перевищення r -го показника на k -й ділянці контролю; $X(r, k)$ – фактичне або розрахункове значення r -го показника на k -й ділянці; $X_{\text{контр}}(r)$ – контрольне, фонове або нормативне значення r -го показника.

Якщо $K(r, k) \leq 1$, значення показника не перевищує прийнятий контрольний рівень. Якщо $K(r, k) > 1$, ділянка потребує додаткового уточнення, а за наявності зростання показника в часі – пріоритетного обстеження.

Часові критерії потрібні для розмежування разового відхилення та тенденції до погіршення стану довкілля. Для цього використовується швидкість зміни показника за інтервал спостереження:

$$V(r, k) = \frac{X(r, k, t_2) - X(r, k, t_1)}{t_2 - t_1}, \quad (2.10)$$

де $V(r, k)$ – швидкість зміни r -го показника на k -й ділянці; $X(r, k, t_1)$, $X(r, k, t_2)$ – значення показника у моменти часу t_1 і t_2 ; $t_2 - t_1$ – інтервал між вимірюваннями.

Додатне значення $V(r, k)$ свідчить про зростання показника, від'ємне – про його зменшення, нульове або близьке до нуля – про стабільний стан у межах інтервалу спостереження.

Просторові критерії характеризують не тільки факт забруднення, а й його поширення в межах контрольованої території. Для цього використовується частка забрудненої площі у межах ділянки контролю:

$$F(k) = \frac{S_{\text{забр}}(k)}{S(k)}, \quad (2.11)$$

де $F(k)$ – частка забрудненої площі k -ї ділянки; $S_{\text{забр}}(k)$ – площа забруднення в межах k -ї ділянки; $S(k)$ – загальна площа k -ї ділянки контролю.

Значення $F(k)$, близьке до нуля, відповідає локальному прояву забруднення. Зростання $F(k)$ свідчить про просторове поширення небезпечного чинника і потребує перегляду меж зони контролю.

Для узагальнення результатів радіаційного контролю в межах однієї ділянки використовується граничний критерій стану. Він визначається за найбільшим коефіцієнтом перевищення серед усіх показників, що контролюються:

$$C(k) = \max\{K(1, k); K(2, k); \dots; K(m, k)\}, \quad (2.12)$$

де $C(k)$ – граничний критерій стану k -ї ділянки; $K(1, k)$, $K(2, k)$, ..., $K(m, k)$ – коефіцієнти перевищення для m контрольованих показників.

Використання $C(k)$ дає змогу визначити найменш сприятливий показник на ділянці без змішування різних за фізичною природою величин. Це відрізняє граничний критерій від інтегральних індексів безпеки, які застосовуються для попереднього ранжування чинників.

Таблиця 2.4 Інтерпретація стану екологічної безпеки за результатами контролю

Рівень стану	Умова оцінювання	Характеристика ситуації	Необхідна дія
Прийнятний	$C(k) \leq 1$; $V(r, k) \leq 0$ або близьке до 0	показники не перевищують контрольні рівні, ознак поширення немає	планове спостереження
Ускладнений	$C(k) \leq 1$ за наявності зростання $V(r, k)$ або локального збільшення $F(k)$	показники ще не перевищують контрольні рівні, але є тенденція до погіршення	повторне вимірювання, уточнення меж ділянки
Небезпечний	$C(k) > 1$ або стійке зростання $V(r, k)$	є перевищення контрольного рівня або підтверджена динаміка погіршення	пріоритетне обстеження, вибір захисних заходів
Критичний	$C(k) > 1$ на кількох суміжних ділянках або значне збільшення $F(k)$	забруднення має просторове поширення і може впливати на кілька компонентів довкілля	обмеження доступу, локалізація, розширений моніторинг

Середовищні критерії конкретизують, який компонент довкілля зазнав або може зазнати впливу. Для повітряного середовища визначальними є наявність радіоактивного пилу й аерозолів, для ґрунтового покриву – щільність забруднення та глибина проникнення, для поверхневого стоку –

можливість винесення забруднених частинок за межі первинної ділянки, для підземних вод – ризик інфільтраційного перенесення.

Таблиця 2.5 Критерії оцінювання за компонентами навколишнього природного середовища

Компонент довкілля	Критерій оцінювання	Основні дані	Результат оцінювання
Повітряне середовище	наявність радіоактивного пилу або аерозолів	пробовідбір повітря, потужність дози, метеорологічні параметри	визначення напряму першочергового контролю
Ґрунтовий покрив	щільність забруднення і площа прояву	маршрутні вимірювання, проби ґрунту, дистанційне обстеження	уточнення меж забрудненої ділянки
Поверхневий стік	можливість перенесення забруднення з водою	напрями стоку, рельєф, проби води	визначення ділянок накопичення
Підземні води	ризик інфільтрації радіонуклідів	фільтраційні умови, проби води, характеристика ґрунтів	оцінювання відкладених наслідків
Технологічні покриття	наявність забруднених поверхонь	вимірювання потужності дози, змиви, візуальне обстеження БпЛА	визначення потреби в локалізації або дезактивації

Інформаційно-вимірювальні критерії враховують достатність даних для прийняття рішення. В умовах аварії, спричиненої воєнними діями, частина території може бути недоступною для персоналу, тому оцінювання має спиратися на поєднання стаціонарних постів, мобільних засобів, лабораторного аналізу проб і дистанційного обстеження із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Якщо результати різних засобів контролю не узгоджуються, ділянка має бути віднесена до зони повторного обстеження.

Для подальшої математичної моделі критерії екологічної безпеки виконують роль вхідних умов. Коефіцієнти $K(r, k)$, $V(r, k)$, $F(k)$ і $C(k)$ дають змогу описати стан ділянки та визначити, чи потребує вона включення до пошуково-вимірювального маршруту. При цьому об'єктом пошуку виступає не сам небезпечний чинник, а зона екологічної небезпеки, межі якої уточнюються за результатами вимірювань.

Таблиця 2.6 Зв'язок критеріїв екологічної безпеки з подальшими етапами дослідження

Критерій	Що встановлює	Подальше використання
$K(r, k)$	чи є перевищення контрольного рівня за окремим показником	визначення необхідності додаткового контролю
$V(r, k)$	чи змінюється показник у часі	оцінювання розвитку аварійної ситуації
$F(k)$	яку частку ділянки охоплює забруднення	уточнення меж зони екологічної небезпеки
$C(k)$	який показник формує найгірший стан ділянки	класифікація стану ділянки
Дані БпЛА	просторове розміщення локальних відхилень	формування маршруту пошуково-вимірювальних дій

Таким чином, обґрунтовано систему критеріїв оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища відпрацьованого ядерного палива. Вона охоплює радіаційні, середовищні, просторові, часові та інформаційно-вимірjuвальні показники, що характеризують стан повітряного середовища, ґрунтового покриву, поверхневого стоку, водних об'єктів і прилеглих територій. Застосування таких критеріїв дає змогу перейти від фіксації окремих радіаційних показників до оцінювання стану контрольованих ділянок у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива.

2.3 Потенційні шляхи поширення радіоактивного забруднення у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива

Поширення радіоактивного забруднення після аварії на сухому сховищі ВЯП визначається не лише місцем первинного пошкодження, а й подальшим переміщенням радіоактивних речовин у повітряному, поверхневому, ґрунтовому та водному середовищах. Для теми дослідження важливо встановити потенційні напрями міграції забруднення, оскільки саме вони визначають межі зони екологічної небезпеки та зміст подальших пошуково-вимірjuвальних дій.

Шляхи поширення розглядаються як просторові механізми перенесення забруднення від первинної аварійної ділянки до інших компонентів довкілля (табл. 2.7).

Таблиця 2.7 Потенційні шляхи поширення радіоактивного забруднення у зоні впливу сухого сховища ВЯП

Шлях поширення	Механізм перенесення	Умови прояву	Основний об'єкт контролю
Атмосферне перенесення	переміщення пилу й аерозолів повітряними потоками	утворення дрібнодисперсних частинок, наявність вітру, турбулентне перемішування	приземний шар повітря, напрямок перенесення
Сухе та вологе осадження	випадіння частинок на поверхні або їх вимивання опадами	гравітаційне осідання, дощ, сніг, підвищена вологість	технологічні покриття, ґрунти, рослинність
Поверхневий стік	переміщення забруднених частинок разом із водою	опади, пожежогасіння, ухил поверхні, наявність дренажу	понижені ділянки, лотки, канали стоку
Міграція у ґрунті	вертикальне або горизонтальне переміщення в ґрунтовому середовищі	інфільтрація, сорбція, дисперсія, зміна вологості	верхній шар ґрунту, профіль ґрунту
Потрапляння до водного середовища	перенесення до поверхневих або підземних вод	тривалий контакт забруднення з водою, фільтраційні шляхи	поверхневі води, підземні води
Механічне перенесення	переміщення забруднених частинок технікою, уламками або матеріалами	аварійно-відновлювальні роботи, рух транспорту, складування матеріалів	маршрути руху, місця тимчасового накопичення

Атмосферне перенесення є швидким шляхом формування зони можливого впливу. Воно виникає у разі появи радіоактивного пилу або аерозолів, здатних переміщуватися разом із повітряними потоками. Напрямок і дальність такого перенесення залежать від швидкості вітру, атмосферної стабільності, висоти підняття частинок, вологості та інтенсивності турбулентного перемішування.

Для орієнтовної оцінювання довжини можливого атмосферного перенесення за короткий проміжок часу може бути використана залежність:

$$L_{\text{atm}}(k, t) = v_w(k, t) \cdot t, \quad (2.13)$$

де $L_{\text{atm}}(k, t)$ – орієнтовна дальність атмосферного перенесення забруднених частинок у межах або поблизу k -ї ділянки за час t ; $v_w(k, t)$ – швидкість вітру на k -й ділянці у відповідний момент часу; t – час після утворення або підняття забруднених частинок у повітря.

Залежність (2.13) не замінює повну модель атмосферної дисперсії, але дає змогу попередньо визначити напрям першочергового обстеження після аварійного впливу. Для уточнення меж радіоактивного забруднення ці дані мають поєднуватися з вимірюваннями потужності дози, пробовідбором повітря і дистанційним обстеженням за напрямом перенесення.

Під час атмосферного перенесення частина радіоактивних частинок осідає на технологічних покриттях, ґрунтовому покриві, конструкціях сховища і рослинності. Таке осадження може бути сухим або вологим. Сухе осадження залежить від дисперсності частинок і швидкості їх випадіння, а вологе – від інтенсивності опадів і здатності атмосферної вологи вимивати забруднення з повітря.

Накопичену поверхневу активність унаслідок осадження можна подати у спрощеному вигляді:

$$G(k, t) = \int_0^t [v_d C_{\text{air}}(k, \tau) + \lambda_w(\tau) C_{\text{air}}(k, \tau)] d\tau, \quad (2.14)$$

де $G(k, t)$ – накопичена поверхнева активність на k -й ділянці за час t ;
 $C_{\text{air}}(k, \tau)$ – концентрація радіоактивних частинок у повітрі на k -й ділянці в момент часу τ ; v_d – швидкість сухого осадження; $\lambda_w(\tau)$ – коефіцієнт вологого вимивання, приведений до внеску у поверхнєве осадження радіоактивних частинок.; τ – поточний час інтегрування.

Формула (2.14) пояснює зв'язок між атмосферним шляхом і вторинним забрудненням поверхонь. У практичному застосуванні значення $G(k, t)$ уточнюється за результатами наземних вимірювань, відбору проб поверхневого шару та даних дистанційного радіаційного картування.

Поверхневий стік може переносити забруднення з первинної аварійної ділянки до понижених частин рельєфу, дренажних елементів, технологічних лотків або прилеглих територій. Цей шлях активізується під час опадів, пожежогасіння або змиву забруднення з твердих покриттів.

Для попередньої оцінки об'єму стоку на ділянці можна використати залежність:

$$V_{\text{run}}(k) = \psi(k) \cdot H_p \cdot S(k), \quad (2.15)$$

де $V_{\text{run}}(k)$ – об'єм поверхневого стоку з k -ї ділянки; $\psi(k)$ – коефіцієнт стоку, що враховує тип покриття і здатність поверхні утримувати воду; H_p – шар опадів або води, що бере участь у змиві; $S(k)$ – площа k -ї ділянки.

Кількість активності, яка може бути винесена поверхневим стоком, може бути подана як:

$$A_{\text{run}}(k) = C_w(k) \cdot V_{\text{run}}(k), \quad (2.16)$$

де $A_{\text{run}}(k)$ – активність, що переноситься зі стоком із k -ї ділянки; $C_w(k)$ – об'ємна активність радіонуклідів у воді або активність, пов'язана із завислими частинками стоку; $V_{\text{run}}(k)$ – об'єм поверхневого стоку.

Формули (2.15)–(2.16) дають змогу встановити ділянки, де забруднення може накопичуватися після опадів або аварійного змиву. Такі ділянки мають включатися до маршруту повторного контролю та відбору проб.

Міграція радіонуклідів у ґрунтовому покриві має повільніший характер порівняно з атмосферним перенесенням або поверхневим стоком (табл. 2.8). Вона залежить від гранулометричного складу ґрунту, вологості, сорбційних властивостей, форми перебування радіонуклідів і тривалості контакту забруднення з ґрунтовим середовищем. Для орієнтовної оцінки глибини проникнення можна використати спрощену дифузійну залежність:

$$z(k, t) = \sqrt{2D_s(k)t}, \quad (2.17)$$

де $z(k, t)$ – орієнтовна глибина проникнення забруднення у ґрунтовий покрив на k -й ділянці за час t ; $D_s(k)$ – ефективний коефіцієнт міграції або дифузії радіонуклідів у ґрунті; t – час після надходження забруднення на поверхню.

Залежність (2.17) має орієнтовний характер і використовується для обґрунтування глибини пробовідбору та тривалості подальшого спостереження. Вона не враховує всі геохімічні процеси, проте дає змогу пов'язати час після аварії з можливим проникненням забруднення в нижчі шари ґрунту.

Потенційне забруднення поверхневих і підземних вод може мати відкладений характер. Поверхневі води можуть зазнати впливу через забруднений стік із території сховища, а підземні води – унаслідок тривалого інфільтраційного перенесення. Для таких процесів важливими є фільтраційні властивості ґрунтів, глибина залягання водоносних горизонтів, наявність захисних шарів і напрям підземного потоку.

Механічне перенесення забруднених частинок і матеріалів може відбуватися під час руху техніки, переміщення уламків, аварійно-

відновлювальних робіт або тимчасового складування пошкоджених матеріалів. Такий шлях не є природним процесом міграції, але може змінювати просторовий розподіл радіоактивного забруднення в межах майданчика.

Таблиця 2.8 Параметри, що визначають інтенсивність поширення радіоактивного забруднення

Шлях поширення	Основні параметри	Що впливає на результат	Практичне значення
Атмосферне перенесення	швидкість і напрям вітру, стабільність атмосфери	напрямок та довжина смуги можливого перенесення	вибір маршруту БПЛА за напрямом вітру
Осадження	швидкість осадження, інтенсивність опадів	утворення забруднених поверхневих ділянок	визначення місць відбору проб поверхонь і ґрунту
Поверхневий стік	ухил, шар опадів, коефіцієнт стоку	винесення забруднення до понижених ділянок	контроль дренажу, лотків, водозбірних зон
Ґрунтова міграція	вологість, сорбція, проникність ґрунту	глибина проникнення і тривалість наслідків	визначення глибини пробовідбору
Механічне перенесення	рух техніки, переміщення уламків, складування	повторне забруднення нових ділянок	контроль маршрутів руху і місць накопичення матеріалів

Для визначення домінуючого шляху поширення в межах конкретної ділянки використовується частка внеску окремого механізму перенесення. Цей показник не дублює інтегральну оцінку небезпеки, оскільки характеризує не сам чинник, а механізм просторового переміщення забруднення.

$$Q(p, k) = \frac{A(p, k)}{\sum_{j=1}^n A(j, k)}, \quad (2.18)$$

де $Q(p, k)$ – частка внеску p -го шляху поширення у межах k -ї ділянки; $A(j, k)$ – активність або умовна кількість забруднення, що переноситься p -м шляхом; $\sum_{j=1}^n A(j, k)$ – сумарне перенесення всіма шляхами в межах k -ї ділянки; n – кількість врахованих шляхів поширення.

Найбільше значення $Q(p, k)$ вказує на домінуючий шлях перенесення забруднення для конкретної ділянки. Це дає змогу обрати відповідний тип контролю: атмосферний пробовідбір, обстеження поверхні, контроль стоку, відбір ґрунту або дистанційне картування.

Для умов аварії, спричиненої воєнними діями, визначення шляхів поширення ускладнюється обмеженням доступом до окремих ділянок і нерівномірністю первинних даних. У таких умовах безпілотні літальні апарати можуть використовуватися для дистанційного огляду території, виявлення локальних радіаційних аномалій, уточнення просторового розподілу показників і вибору ділянок, які потребують наземного підтвердження.

У межах подальшої математичної моделі шляхи поширення радіоактивного забруднення визначають просторові області, у яких має бути організований пошуково-вимірювальний контроль. Атмосферне перенесення задає напрям оперативного обстеження, поверхневий стік – ділянки можливого накопичення, ґрунтова міграція – глибину і тривалість контролю, а механічне перенесення – маршрути повторного обстеження.

Таблиця 2.9 Використання результатів аналізу шляхів поширення в подальших етапах дослідження

Результат аналізу	Що визначає	Використання в подальшому дослідженні
Напрямок атмосферного перенесення	смугу першочергового дистанційного обстеження	побудова маршруту БпЛА
Зони осадження	ділянки можливого поверхневого забруднення	уточнення меж контролю
Напрями поверхневого стоку	місця можливого накопичення забруднення	планування відбору проб води та ґрунту
Глибина ґрунтової міграції	необхідну глибину пробовідбору	оцінювання відкладених наслідків
Домінуючий шлях поширення $Q(p, k)$	основний механізм перенесення для ділянки	вибір засобу контролю і природоохоронного заходу

Таким чином, визначено потенційні шляхи поширення радіоактивного забруднення у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива. До них належать атмосферне перенесення пилу й аерозолів, сухе та вологе осадження, поверхневий стік, міграція в ґрунтовому покриві, потрапляння до водного середовища та механічне перенесення забруднених матеріалів. Урахування цих шляхів необхідне для визначення меж можливого радіоактивного забруднення, вибору ділянок першочергового обстеження та обґрунтування подальших пошуково-вимірвальних дій.

2.4 Оцінювання можливих екологічних наслідків аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива

Оцінювання можливих екологічних наслідків аварії на сухому сховищі ВЯП є завершальним етапом систематизації небезпечних чинників, критеріїв екологічної безпеки та шляхів поширення радіоактивного забруднення. Наслідки розглядаються не як перелік аварійних чинників, а як результат впливу аварійних чинників на компоненти навколишнього природного середовища, просторове поширення радіоактивного забруднення і подальшу потребу в природоохоронних заходах. (табл. 2.10).

Оцінювання наслідків доцільно здійснювати за компонентним принципом. Для кожного компонента довкілля встановлюється показник впливу, який враховує рівень радіоактивного забруднення або радіаційного стану, можливість подальшої міграції радіоактивного забруднення та тривалість прояву наслідку. Такий підхід дає змогу порівнювати різні за природою процеси без змішування їх із причинами аварії.

$$I_{eco}(c, k) = \frac{X(c, k)}{X_{lim}(c)} \cdot M(c, k) \cdot T(c, k), \quad (2.19)$$

де $I_{eco}(c, k)$ – показник екологічного впливу на компонент c у межах k -ї ділянки; $X(c, k)$ – фактичне або розрахункове значення показника забруднення; $X_{lim}(c)$ – контрольний або допустимий рівень для відповідного компонента; $M(c, k)$ – коефіцієнт можливості подальшої міграції забруднення; $T(c, k)$ – коефіцієнт тривалості прояву наслідку.

У таблиці 2.10 узагальнено можливі екологічні наслідки аварії для окремих компонентів навколишнього природного середовища, а в таблиці 2.11 наведено коефіцієнти, які використовуються під час їх оцінювання.

Таблиця 2.10 Можливі екологічні наслідки аварії за компонентами навколишнього природного середовища

Компонент довкілля	Можливий наслідок	Показники для оцінювання	Характер прояву
Повітряне середовище	наявність радіоактивного пилу або аерозолів у приземному шарі	потужність дози, концентрація аерозолів, напрям перенесення	короткочасний або змінний у часі
Поверхні та технологічні покриття	осадження радіоактивних частинок, локальне забруднення	щільність забруднення, площа ділянки, результати змивів	локальний, нерівномірний
Грунтовий покрив	накопичення радіонуклідів у верхньому шарі, вторинне пилове підняття	щільність забруднення, глибина проникнення, гранулометричний склад	локальний або поширений
Поверхневий стік	винесення забруднених частинок до понижених ділянок і дренажу	активність у воді, об'єм стоку, напрям руху води	епізодичний, залежний від опадів
Підземні води	потенційна міграція через водопроникні шари	концентрація радіонуклідів, фільтраційні умови, час міграції	відкладений у часі
Прилегла територія	формування зон обмеженого використання або додаткового контролю	площа впливу, рівні показників, доступність для обстеження	просторово неоднорідний

Таблиця 2.11 Коефіцієнти, що враховуються під час оцінювання екологічного наслідку

Позначення	Зміст показника	Орієнтовна інтерпретація значень
$X(c, k)/X_{lim}(c)$	відношення фактичного показника до контрольного рівня	менше 1 – контрольний рівень не перевищено; більше 1 – наявне перевищення
$M(c, k)$	можливість подальшої міграції забруднення	0 – міграція мало ймовірна; 1 – висока ймовірність перенесення
$T(c, k)$	тривалість прояву наслідку	0 – короткочасний прояв; 1 – тривалий або відкладений прояв
$I_{eco}(c, k)$	компонентний показник екологічного впливу	використовується для порівняння впливу на різні компоненти довкілля

Для узагальнення наслідків у межах окремої ділянки контролю компонентні показники об'єднуються з урахуванням вагомості кожного компонента довкілля. Вагові коефіцієнти можуть визначатися залежно від умов майданчика, наявності водних об'єктів, типу ґрунтового покриву, напрямів поверхневого стоку та можливих обмежень використання території.

$$N(k) = \sum_{c=1}^m a(c) \cdot I_{eco}(c, k), \quad (2.20)$$

де $N(k)$ – інтегральний показник можливих екологічних наслідків у межах k -ї ділянки; $a(c)$ – ваговий коефіцієнт значущості компонента c ; $I_{eco}(c, k)$ – компонентний показник екологічного впливу; m – кількість компонентів довкілля, врахованих під час оцінювання.

Оскільки наслідки аварії можуть мати різну просторову протяжність, інтегральний показник доцільно доповнювати площею ділянки, у межах якої зафіксовано або прогнозується вплив.

$$N_A(k) = N(k) \cdot S(k), \quad (2.21)$$

де $N_A(k)$ – площинно-зважений показник екологічних наслідків для k -ї ділянки; $N(k)$ – інтегральний показник наслідків; $S(k)$ – площа ділянки контролю або прогнозованої зони впливу.

Таблиця 2.12 Рівні можливих екологічних наслідків за інтегральним показником $N(k)$

Значення $N(k)$	Рівень наслідків	Характеристика стану ділянки	Подальша дія
до 0,25	незначний	показники близькі до фонових або контрольних значень	планове спостереження
0,26–0,50	локальний	вплив обмежений окремою ділянкою, потрібне уточнення даних	повторне вимірювання або відбір проб
0,51–0,75	підвищений	наявні ознаки поширення або накопичення забруднення	пріоритетний контроль і прогнозування
понад 0,75	значний	імовірне формування зони екологічної небезпеки	локалізація, обмеження доступу, природоохоронні заходи

Для аварії, спричиненої воєнними діями, оцінювання наслідків має враховувати ймовірність реалізації або підтвердження окремого аварійного сценарію. Це дає змогу перейти від опису наслідку до оцінювання екологічного ризику для конкретної ділянки.

$$R_{eco}(k) = P_s(k) \cdot N_A(k), \quad (2.22)$$

де $R_{eco}(k)$ – показник екологічного ризику для k -ї ділянки; $P_s(k)$ – ймовірність реалізації або підтвердження аварійного сценарію s на цій ділянці; $N_A(k)$ – площинно-зважений показник екологічних наслідків.

Сумарний показник екологічного ризику для зони впливу сухого сховища ВЯП може бути поданий як сума ризиків за всіма ділянками контролю:

$$R_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n R_{eco}(k), \quad (2.23)$$

де R_{Σ} – сумарний показник екологічного ризику у зоні впливу сховища; $R_{eco}(k)$ – показник екологічного ризику для k -ї ділянки; n – кількість ділянок, включених до оцінювання.

Для визначення внеску окремої ділянки у загальний ризик використовується відносний показник:

$$Z_R(k) = \frac{R_{eco}(k)}{R_{\Sigma}}, \quad (2.24)$$

де $Z_R(k)$ – частка внеску k -ї ділянки у сумарний екологічний ризик; $R_{eco}(k)$ – ризик для k -ї ділянки; R_{Σ} – сумарний ризик для всієї зони оцінювання. Найбільші значення $Z_R(k)$ відповідають ділянкам, які мають бути першочергово включені до природоохоронних і контрольних заходів.

Таблиця 2.13 Використання результатів оцінювання наслідків для вибору природоохоронних заходів

Результат оцінювання	Ознака стану	Рішення щодо контролю	Природоохоронна дія
Незначний наслідок	відхилення не перевищують контрольні рівні	планове спостереження	додаткові заходи не потрібні
Локальний наслідок	виявлено окрему ділянку з відхиленням	повторне обстеження, відбір проб	тимчасове зонування, уточнення меж
Підвищений наслідок	забруднення може поширюватися за межі первинної ділянки	пріоритетний контроль, залучення БпЛА	пилотпригнічення, контроль стоку, локалізація
Значний наслідок	формується зона екологічної небезпеки	постійний контроль, моделювання розвитку ситуації	обмеження доступу, дезактивація, комплекс захисних заходів

Дистанційне обстеження із застосуванням безпілотних літальних апаратів використовується для первинного огляду недоступних ділянок, виявлення радіаційних аномалій, уточнення просторових меж радіоактивного забруднення та контролю змін після виконання природоохоронних заходів. Отримані дані мають перевірятися наземними вимірюваннями або лабораторним аналізом проб у тих ділянках, де це можливо з погляду безпеки персоналу.

Таким чином, сформовано основу для подальшого математичного моделювання моніторингу стану навколишнього природного середовища у

зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива. Вона поєднує небезпечні чинники аварійного впливу, критерії оцінювання стану довкілля, шляхи поширення радіоактивного забруднення та показники можливих екологічних наслідків. Такий підхід дає змогу перейти до визначення пріоритетних зон пошуково-вимірювального контролю із застосуванням безпілотних літальних апаратів.

Висновки до розділу 2

1. Систематизовано небезпечні чинники аварійного впливу на сухе сховище відпрацьованого ядерного палива, спричиненого воєнними діями. До них віднесено механічне пошкодження контейнерів і захисних конструкцій, порушення умов тепловідведення, утворення радіоактивного пилу й аерозолів, забруднення поверхонь і ґрунтового покриву, обмеження доступу до окремих ділянок та неповноту первинної інформації. Показано, що ці чинники формують зони потенційної екологічної небезпеки, які можуть розглядатися як об'єкти подальшого пошуково-вимірювального контролю.

2. Обґрунтовано систему критеріїв оцінювання стану екологічної безпеки сухого сховища відпрацьованого ядерного палива. Вона охоплює радіаційні, середовищні, просторові, часові та інформаційно-вимірювальні показники, що характеризують стан повітряного середовища, ґрунтового покриву, поверхневого стоку, водних об'єктів і прилеглих територій. Застосування таких критеріїв дає змогу перейти від фіксації окремих радіаційних показників до оцінювання стану контрольованих ділянок у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива.

3. Визначено потенційні шляхи поширення радіоактивного забруднення у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива. До них належать атмосферне перенесення пилу й аерозолів, сухе та вологе осадження,

поверхневий стік, міграція в ґрунтовому покриві, потрапляння до водного середовища та механічне перенесення забруднених матеріалів. Урахування цих шляхів необхідне для визначення меж можливого радіоактивного забруднення, вибору ділянок першочергового обстеження та обґрунтування подальших пошуково-вимірвальних дій.

4. Сформовано основу для подальшого математичного моделювання моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива. Вона поєднує небезпечні чинники аварійного впливу, критерії оцінювання стану довкілля, шляхи поширення радіоактивного забруднення та показники можливих екологічних наслідків. Такий підхід дає змогу перейти до визначення пріоритетних зон пошуково-вимірвального контролю із застосуванням безпілотних літальних апаратів.

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МОНІТОРИНГУ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА У ЗОНІ ВПЛИВУ СУХОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА У РАЗІ АВАРІЇ, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ

Рішення третьої наукової задачі дисертаційного дослідження щодо розроблення математичної моделі моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища ВЯП у разі аварії, спричиненої воєнними діями, здійснено за такими напрямками. Спочатку охарактеризовано просторово-часовий розвиток екологічної небезпеки у зоні впливу сухого сховища ВЯП. Далі сформульовано задачу моніторингу зон можливого аварійного радіоактивного забруднення як пошуково-вимірну задачу. Після цього розроблено математичні закономірності розподілу пошуково-вимірну ресурсу за пріоритетними зонами контролю. Окремо сформовано математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища ВЯП у разі аварії, спричиненої воєнними діями.

3.1 Просторово-часова характеристика розвитку екологічної небезпеки у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива

Розвиток екологічної небезпеки після аварійного впливу на сухе сховище ВЯП має просторово-часовий характер. Це означає, що небезпечні зміни проявляються не одночасно на всій території, а формуються в окремих ділянках, змінюються в часі та можуть поширюватися за межі первинної зони пошкодження.

Початковою умовою такого процесу є виникнення аварійного впливу, який може спричинити механічне пошкодження конструкцій, порушення умов тепловідведення, утворення радіоактивного пилу або забруднених фрагментів

матеріалів. На цьому етапі місце виникнення небезпечної зміни може бути відоме лише орієнтовно або залишатися невизначеним. Тому первинна інформація про стан території має імовірнісний характер.

У подальшому небезпека може проявлятися через локальне підвищення потужності дози, забруднення технологічних покриттів, осадження радіоактивних частинок на ґрунтовий покрив, перенесення забруднення за напрямом вітру або винесення його поверхневим стоком. Кожен із цих процесів має власну швидкість розвитку, просторову протяжність і тривалість збереження наслідків. Тому для побудови математичної моделі необхідно враховувати не лише факт наявності небезпечного чинника, а й зміну його прояву в просторі та часі.

Зону впливу сухого сховища ВЯП доцільно подати як сукупність окремих ділянок контролю:

$$D = \{D_1, D_2, \dots, D_k, \dots, D_n\}, \quad (3.1)$$

де D – зона впливу сховища; D_k – k -та ділянка контролю; n – кількість ділянок, на які поділено територію для організації моніторингу.

Для кожної ділянки D_k може бути визначено набір показників, що характеризують її стан у певний момент часу:

$$X_k(t) = \{X_1(k, t), X_2(k, t), \dots, X_r(k, t), \dots, X_m(k, t)\}, \quad (3.2)$$

де $X_k(t)$ – сукупність контрольованих показників для k -ї ділянки в момент часу t ; $X_r(k, t)$ – значення r -го показника на k -й ділянці; m – кількість показників, що використовуються для оцінювання стану ділянки.

До таких показників можуть належати потужність дози гамма-випромінювання, щільність забруднення поверхні, концентрація радіонуклідів

у повітрі або воді, частка забрудненої площі, швидкість зміни показника в часі, рівень доступності ділянки та достовірність отриманих даних.

У разі аварії, спричиненої воєнними діями, не всі ділянки можуть бути обстежені одночасно. Тому для кожної ділянки необхідно оцінити не лише її поточний стан, а й пріоритетність включення до пошуково-вимірального маршруту. Ця пріоритетність залежить від рівня потенційної небезпеки, можливих шляхів поширення забруднення, доступності ділянки, наявності первинних даних і технічних можливостей засобів дистанційного контролю.

Просторово-часовий розвиток екологічної небезпеки можна подати як зміну стану ділянки у часі:

$$S_k(t) = f(E_k, P_k, Q_k, X_k(t), A_k, U_k), \quad (3.3)$$

де $S_k(t)$ – стан екологічної безпеки k -ї ділянки в момент часу t ; E_k – рівень потенційної екологічної небезпеки; P_k – пріоритетність обстеження ділянки; Q_k – характеристика можливого поширення забруднення; $X_k(t)$ – сукупність контрольованих показників; A_k – доступність ділянки для обстеження; U_k – рівень інформаційної невизначеності.

З практичної точки зору така постановка означає, що ділянка з високим рівнем потенційної небезпеки, обмеженим доступом і недостатньою кількістю первинних даних має розглядатися як пріоритетна для дистанційного обстеження. Якщо на ній додатково прогнозується атмосферне перенесення, осадження або поверхневий стік, вона має бути включена до першочергового маршруту пошуково-вимірального контролю.

Таким чином, просторово-часовий розвиток екологічної небезпеки у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива доцільно розглядати через поділ території на ділянки контролю, у межах яких можливе виникнення, поширення або накопичення радіоактивного забруднення. Для кожної ділянки враховуються показники стану довкілля, рівень потенційної

небезпеки, доступність, інформаційна невизначеність і потреба в пошуково-вимірjuвальних діях.

3.2 Постановка задачі моніторингу зон можливого аварійного радіоактивного забруднення

Задача моніторингу зон можливого аварійного радіоактивного забруднення полягає у визначенні ділянок території, на яких після аварійного впливу на сухе сховище ВЯП можуть сформуватися радіаційні аномалії або зони екологічної небезпеки. На відміну від штатного спостереження, така задача виконується за умов неповної первинної інформації, обмеженого часу, нерівномірної доступності території та необхідності залучення дистанційних засобів контролю.

У цьому дослідженні моніторинг розглядається як пошуково-вимірjuвальний процес. Його результатом має бути не лише фіксація окремого значення потужності дози або концентрації радіонуклідів, а й уточнення просторового положення ділянок, де можливе виникнення, накопичення або поширення радіоактивного забруднення. Тому об'єктом пошуку є зона можливого аварійного забруднення, а не окремий технічний елемент сховища.

Для формалізації задачі територія впливу сухого сховища поділяється на сукупність ділянок контролю, визначених у підрозділі 3.1. Кожна ділянка характеризується набором показників стану довкілля, рівнем потенційної небезпеки, доступністю для наземного контролю, ступенем інформаційної невизначеності та технічними умовами дистанційного обстеження.

У межах постановки задачі потрібно визначити область пошуку, об'єкт пошуку, початковий розподіл імовірності виникнення небезпечної зміни, закон виявлення радіаційної аномалії, обмеження на час і пошуково-вимірjuвальні ресурси та критерій вибору стратегії моніторингу (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 Відповідність елементів класичної задачі пошуку задачі моніторингу сухого сховища ВЯП

Елемент постановки	У класичній задачі пошуку	У задачі моніторингу сухого сховища
Область пошуку	задана область простору	зона впливу сухого сховища, поділена на ділянки контролю
Ціль пошуку	об'єкт із невідомим положенням	зона можливого аварійного забруднення або радіаційна аномалія
Початкова інформація	апріорна щільність розподілу цілі	попередня оцінка ймовірності забруднення за даними розділу 2
Пошукова одиниця	технічний засіб або група засобів пошуку	безпілотний літальний апарат, мобільна лабораторія, стаціонарний пост
Пошуково-вимірювальний ресурс	обсяг ресурсу, спрямований у точку або ділянку	час обстеження, щільність вимірювань, площа покриття, кількість проходів
Закон виявлення	залежність імовірності виявлення від пошуково-вимірювального ресурсу	залежність фіксації аномалії від чутливості сенсора, маршруту і тривалості обстеження
Результат	встановлення положення цілі	уточнення меж зони екологічної небезпеки і потреби в подальшому контролі

3.2.1 Формулювання задачі пошуково-вимірювального контролю. Нехай зона впливу сховища задана областю D , яка складається з окремих ділянок контролю D_k . У цій області після аварійного впливу може сформуватися зона можливого радіоактивного забруднення Z , положення якої заздалегідь невідоме. Для математичної постановки приймається, що положення такої зони може бути описане через апріорну щільність розподілу.

$$\pi_0(x) \geq 0, \quad \int_D \pi_0(x) dx = 1, \quad x \in D, \quad (3.4)$$

де $\pi_0(x)$ – апріорна щільність імовірності формування зони можливого радіоактивного забруднення в точці x ; D – область моніторингу; x – координата точки в межах області моніторингу.

Для дискретизованої території ймовірність того, що зона можливого радіоактивного забруднення пов'язана з k -ю ділянкою, визначається інтегруванням апріорної щільності в межах цієї ділянки:

$$P_k = \int_{D_k} \pi_0(x) dx, \quad \sum_{k=1}^n P_k = 1, \quad (3.5)$$

де P_k – апріорна ймовірність належності зони можливого радіоактивного забруднення до k -ї ділянки; D_k – k -та ділянка контролю; n – кількість ділянок контролю.

Значення P_k може формуватися на основі результатів попереднього аналізу: рівня потенційної небезпеки, наявності механічного пошкодження, напряму можливого атмосферного перенесення, поверхневого стоку, обмеження доступу та невизначеності первинних даних. Таке подання не замінює вимірювання, а визначає початковий розподіл уваги між ділянками території.

Засоби моніторингу мають обмежену здатність до виявлення небезпечної зміни. Тому навіть у разі перебування радіаційної аномалії в

межах обстежуваної ділянки її фіксація залежить від пошуково-вимірювального ресурсу, чутливості сенсора, висоти і швидкості руху безпілотного літального апарата, ширини смуги огляду та рівня фону.

Імовірність виявлення небезпечної зміни в точці x за накопиченого пошуково-вимірювального ресурсу $U(x, T)$ може бути подана у вигляді експоненціальної функції насичення:

$$P_d(x, T) = 1 - \exp[-\eta(x)U(x, T)], \quad (3.6)$$

де $P_d(x, T)$ – імовірність виявлення небезпечної зміни в точці x протягом часу T ; $\eta(x)$ – коефіцієнт ефективності виявлення, що враховує чутливість засобу контролю та умови вимірювання; $U(x, T)$ – накопичений обсяг пошуково-вимірювальних ресурсів в точці x за час T .

Накопичений обсяг пошуково-вимірювальних дій визначається як інтеграл від функції інтенсивності обстеження за часом:

$$U(x, T) = \int_0^T u(x, t) dt, \quad (3.7)$$

де $u(x, t)$ – інтенсивність пошуково-вимірювального ресурсу у точці x в момент часу t ; T – час, відведений на виконання моніторингового завдання.

Для дискретної постановки задачі аналогічне співвідношення записується для кожної ділянки контролю:

$$P_d(k, T) = 1 - \exp[-\eta_k U_k(T)], \quad (3.8)$$

де $P_d(k, T)$ – імовірність виявлення радіаційної аномалії на k -й ділянці; η_k – коефіцієнт ефективності виявлення на цій ділянці; $U_k(T)$ – накопичений обсяг пошуково-вимірювальних ресурсів, спрямованих на k -ту ділянку.

Загальна імовірність виявлення зони можливого радіоактивного забруднення в межах усієї області моніторингу визначається як сума внесків усіх ділянок:

$$P_D(T) = \sum_{k=1}^n P_k [1 - \exp(-\eta_k U_k(T))], \quad (3.9)$$

де $P_D(T)$ – загальна імовірність виявлення зони можливого радіоактивного забруднення протягом часу T ; P_k – апіорна ймовірність належності небезпечної зони до k -ї ділянки; η_k – ефективність виявлення; $U_k(T)$ – обсяг пошуково-вимірювальних ресурсів на ділянці.

У разі відсутності виявлення після виконання обстеження інформація про розташування зони небезпеки має бути уточнена. Ділянки, на які було спрямовано більше пошуково-вимірювального ресурсу, де не зафіксовано небезпечних змін, отримують меншу апостеріорну ймовірність. Для неперервної області це можна записати у вигляді:

$$\pi_T(x) = \frac{\pi_0(x) \exp[-\eta(x)U(x,T)]}{\int_D \pi_0(\xi) \exp[-\eta(\xi)U(\xi,T)] d\xi}, \quad (3.10)$$

де $\pi_T(x)$ – апостеріорна щільність імовірності після обстеження протягом часу T ; ξ – змінна інтегрування в області D .

Для дискретної сукупності ділянок апостеріорна ймовірність має вигляд:

$$P_k(T) = \frac{P_k(0) \exp[-\eta_k U_k(T)]}{\sum_{j=1}^n P_j(0) \exp[-\eta_j U_j(T)]}, \quad (3.11)$$

де $P_k(T)$ – апостеріорна ймовірність належності зони можливого радіоактивного забруднення до k -ї ділянки після проведення обстеження; $P_k(0)$ – початкова ймовірність; j – номер ділянки у сумі нормування.

3.2.2 Початкові умови задачі пошуково-вимірювального контролю. Початкові умови задачі моніторингу визначають стан території до початку пошуково-вимірювальних дій. Вони задають межі області контролю, перелік ділянок, початкову імовірність формування небезпечної зони, доступність ділянок, технічні характеристики засобів дистанційного обстеження та допустимий час виконання завдання (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 Початкові дані для постановки задачі моніторингу зон можливого аварійного радіоактивного забруднення

Група даних	Зміст	Використання в моделі
Просторові дані	межі зони впливу, площа ділянок, розташування контейнерів, покриттів і дренажу	поділ області на ділянки контролю
Радіаційні дані	фонові рівні, первинні вимірювання, контрольні значення показників	формування початкового стану ділянок
Дані про аварійний вплив	імовірне місце пошкодження, характер руйнування, наявність пилу або уламків	визначення апріорної ймовірності P_k
Метеорологічні дані	напрямок і швидкість вітру, опади, температура, стабільність атмосфери	уточнення напрямів можливого перенесення
Доступність території	безпечні, обмежено доступні та недоступні ділянки	вибір дистанційного або наземного способу контролю
Характеристики БпЛА	швидкість, висота польоту, час роботи, ширина смуги огляду, тип сенсора	розрахунок пошуково-вимірювального ресурсу

Для кожної ділянки D_k задається вектор початкових характеристик:

$$Y_k(0) = \{P_k(0), A_k, U_k^{info}, \eta_k, S_k, H_k\}, \quad (3.12)$$

де $Y_k(0)$ – вектор початкових характеристик k -ї ділянки; $P_k(0)$ – початкова ймовірність формування зони можливого радіоактивного забруднення; A_k – коефіцієнт доступності або обмеження доступу; U_k^{info} – рівень інформаційної невизначеності; η_k – ефективність виявлення; S_k – площа ділянки; H_k – коефіцієнт покриття ділянки дистанційним обстеженням.

У цій постановці U_k^{info} використовується лише для позначення інформаційної невизначеності. Обсяг пошуково-вимірювальних ресурсів позначається як $U_k(T)$, тому ці величини не змішуються за змістом.

Час виконання моніторингового завдання обмежується технічними можливостями безпілотного літального апарата, безпечним часом перебування у зоні, метеорологічними умовами та необхідністю отримання результатів у межах прийнятеного для аварійного реагування інтервалу:

$$0 \leq T \leq T_{max}, \quad (3.13)$$

де T – фактичний час виконання пошуково-вимірювального завдання; T_{max} – максимально допустимий час, визначений технічними й оперативними умовами.

Сумарний обсяг пошуково-вимірювальних дій, які можуть бути розподілені між ділянками, також обмежені:

$$\sum_{k=1}^n U_k(T) \leq U_{\Sigma}, \quad U_k(T) \geq 0, \quad (3.14)$$

де U_{Σ} – сумарний пошуково-вимірювальний ресурс, доступний протягом часу T .

У разі використання БПЛА пошуково-вимірювальний ресурс на ділянці може бути пов'язане з часом обстеження, шириною смуги огляду та кількістю проходів:

$$U_k(T) = \beta_k B_k v_k t_k n_k, \quad (3.15)$$

де β_k – коефіцієнт вимірювальної ефективності для k -ї ділянки; B_k – ширина смуги огляду або вимірювання; v_k – швидкість польоту; t_k – час обстеження ділянки; n_k – кількість проходів над ділянкою.

Під час побудови маршруту необхідно враховувати не лише час вимірювання над ділянками, а й час переходу між ними. Для послідовності обстеження $R = (D_{r_1}, D_{r_2}, \dots, D_{r_s})$ виконується обмеження:

$$\sum_{l=1}^s t_{r_l} + \sum_{l=1}^{s-1} \frac{d(r_l, r_{l+1})}{v_{tr}} \leq T_{max}, \quad (3.16)$$

де R – маршрут обстеження; D_{r_l} – l -та ділянка в маршруті; t_{r_l} – час вимірювання над цією ділянкою; $d(r_l, r_{l+1})$ – відстань між сусідніми ділянками маршруту; v_{tr} – швидкість переміщення БПЛА між ділянками; s – кількість ділянок, включених до маршруту.

3.2.3 Критерії вибору стратегії пошуково-вимірювального контролю та уточнення зон можливого аварійного радіоактивного забруднення. Стратегія моніторингу визначає, які ділянки мають бути обстежені першочергово, скільки пошуково-вимірювального ресурсу має бути спрямовано на кожну з них і як результати обстеження змінюють уявлення про розташування зони екологічної небезпеки.

Основним критерієм вибору стратегії є максимізація імовірності виявлення зони можливого радіоактивного забруднення за наявних часових і технічних обмежень:

$$\max_{U_1, \dots, U_n} P_D(T) = \max_{U_1, \dots, U_n} \sum_{k=1}^n P_k [1 - \exp(-\eta_k U_k)], \quad (3.17)$$

за умов:

$$\sum_{k=1}^n U_k \leq U_\Sigma, \quad U_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (3.18)$$

Така постановка означає, що пошуково-вимірювальний ресурс не повинен розподілятися рівномірно між усіма ділянками. Перевага надається ділянкам із вищою апіорною ймовірністю забруднення, більшою екологічною значущістю, нижчою доступністю для наземного контролю або нижчою ефективністю виявлення, яка потребує більшого часу обстеження. Для практичного розподілу ресурсу можна використати ваговий коефіцієнт ділянки:

$$W_k = \frac{P_k}{\eta_k + \varepsilon}, \quad (3.19)$$

де W_k – ваговий коефіцієнт k -ї ділянки; P_k – коефіцієнт пріоритетності ділянки, визначений у підрозділі 2.1; η_k – ефективність виявлення на ділянці; ε – малий додатний параметр, що запобігає діленню на нуль.

Тоді початковий розподіл пошуково-вимірювального ресурсу між ділянками може бути поданий як:

$$U_k^{rec} = U_\Sigma \frac{W_k}{\sum_{j=1}^n W_j}, \quad (3.20)$$

де U_k^{rec} – рекомендований обсяг пошуково-вимірювального ресурсу для k -ї ділянки; W_j – ваговий коефіцієнт j -ї ділянки.

Ділянка включається до першочергового маршруту, якщо виконується хоча б одна з умов: високий коефіцієнт пріоритетності, перевищення контрольного рівня за результатами первинного контролю, значна інформаційна невизначеність або недоступність для наземного обстеження. Узагальнено це можна подати у вигляді логічного правила:

$$D_k \in R_1, \quad \text{якщо} \quad P_k \geq P_{cr} \vee C(k) > 1 \vee U_k^{info} \geq U_{cr} \vee A_k \geq A_{cr}, \quad (3.21)$$

де R_1 – множина ділянок першочергового обстеження; P_{cr} , U_{cr} , A_{cr} – критичні значення відповідно для пріоритетності, інформаційної невизначеності та обмеження доступу; $C(k)$ – граничний критерій стану ділянки, визначений у підрозділі 2.2; \vee – логічне «або».

В таблиці 3.3 наведено критерії вибору стратегії пошуково-вимірювального контролю.

Таблиця 3.3 Критерії вибору стратегії пошуково-вимірювального контролю

Критерій	Зміст	Вплив на стратегію
Апріорна ймовірність P_k	імовірність належності зони забруднення до ділянки	підвищує черговість обстеження
Коефіцієнт пріоритетності P_k	враховує небезпеку, доступність і невизначеність	визначає початковий розподіл ресурсу
Ефективність виявлення η_k	характеризує здатність сенсора фіксувати аномалію	за низьких значень потребує більшого ресурсу
Граничний критерій $C(k)$	показує наявність перевищення контрольних рівнів	вимагає уточнення меж і повторного контролю
Часове обмеження T_{max}	задає тривалість виконання завдання	обмежує кількість ділянок у маршруті
Дані БпЛА	дають просторове розміщення локальних відхилень	уточнюють маршрут і зони наземного підтвердження

Після виконання обстеження стратегія має уточнюватися. Якщо небезпечна зміна виявлена, ділянка переводиться до режиму уточнення меж і наземного підтвердження. Якщо небезпечна зміна не виявлена, апостеріорна ймовірність для цієї ділянки зменшується відповідно до формул (3.10)–(3.11), а ресурс може бути перерозподілений на інші ділянки.

Вихідними результатами постановки задачі моніторингу є: перелік ділянок першочергового обстеження, розподіл пошуково-вимірювального ресурсу між ними, очікувана ймовірність виявлення зони можливого радіоактивного забруднення, апостеріорна оцінка положення небезпечної зони після виконання обстеження, умови переходу до уточнення меж радіоактивного забруднення або повторного контролю.

Таблиця 3.4 Вихідні результати постановки задачі моніторингу

Результат	Позначення або форма подання	Подальше використання
Ділянки першочергового контролю	R_1	формування маршруту БпЛА
Розподіл ресурсу	U_k^{rec}	визначення часу і щільності вимірювань
Ймовірність виявлення	$P_D(T)$	оцінювання достатності моніторингу
Апостеріорна ймовірність	$P_k(T)$	коригування маршруту після невиявлення
Ознаки небезпечної зміни	$C(k) > 1, V(r, k) > 0,$ локальна аномалія	перехід до уточнення меж радіоактивного забруднення
Дані дистанційного обстеження	карта показників за маршрутом БпЛА	вибір ділянок наземного підтвердження

Таким чином, постановка задачі моніторингу зон можливого аварійного радіоактивного забруднення полягає у поданні зони екологічної небезпеки як об'єкта пошуку з невизначеним просторовим положенням. Для цього визначено область пошуку, апіорний розподіл імовірності між ділянками контролю, закон виявлення небезпечної зміни, обмеження на пошуково-вимірювальний ресурс і критерій вибору стратегії моніторингу. Отримана постановка є основою для подальшого розподілу пошуково-вимірювального ресурсу за пріоритетними зонами контролю.

3.3 Математичні закономірності розподілу пошуково-вимірювального ресурсу за пріоритетними зонами контролю

Розподіл пошуково-вимірювального ресурсу у зоні впливу сухого сховища ВЯП має ґрунтуватися на поєднанні імовірнісної оцінки можливого розташування зони аварійного радіоактивного забруднення, технічних можливостей засобів моніторингу та обмежень за часом виконання завдання. У попередньому підрозділі зона можливого аварійного забруднення була подана як об'єкт пошуку, а територія моніторингу – як сукупність ділянок контролю. Подальший етап полягає у визначенні закономірностей, за якими пошуково-вимірювальний ресурс розподіляється між цими ділянками.

На відміну від рівномірного огляду всієї території, що потребує значного часу і може бути неможливим в умовах аварії, спричиненої воєнними діями, пріоритетний розподіл ресурсу передбачає спрямування більшої частини пошуково-вимірювального ресурсу на ділянки з підвищеною ймовірністю забруднення, обмеженим доступом, більшою екологічною значущістю або меншою достовірністю первинних даних. Такий підхід відповідає задачі захисту навколишнього природного середовища, оскільки орієнтований не

лише на виявлення факту радіаційної аномалії, а й на своєчасне уточнення меж зони екологічної небезпеки.

У цьому підрозділі пошуково-вимірювальний ресурс розглядається як сукупність часу обстеження, кількості проходів безпілотного літального апарата, щільності вимірювань, площі фактичного покриття та можливості підтвердження результатів іншими засобами контролю. Математична постановка має забезпечити відповідь на три питання: які ділянки включати до першочергового маршруту, який обсяг ресурсу спрямовувати на кожну ділянку та як оновлювати стратегію після отримання результатів вимірювання.

У формулах цього підрозділу використано такі індекси: k – номер ділянки контролю; j – номер ділянки у сумі або порівнянні; l – номер кроку маршруту; q – номер ітерації пошуково-вимірювального циклу; n – кількість ділянок контролю; s – кількість ділянок у маршруті.

3.3.1 Імовірнісна постановка задачі виявлення зон можливого аварійного забруднення. Імовірнісна постановка задачі виявлення зон аварійного забруднення ґрунтується на припущенні, що після аварійного впливу місце формування радіаційної аномалії або зони екологічної небезпеки не є повністю відомим. Для кожної ділянки D_k задається апіорна ймовірність Π_k , яка відображає початкове припущення про можливість виникнення небезпечної зміни саме на цій ділянці. Після виконання пошуково-вимірювальних дій ця ймовірність уточнюється залежно від результату обстеження.

Загальна ймовірність виявлення зони можливого аварійного забруднення за умови розподілу пошуково-вимірювального ресурсу між ділянками може бути подана як функціонал:

$$P_D(U) = \sum_{k=1}^n \Pi_k [1 - \exp(-\eta_k U_k)], \quad (3.22)$$

де $P_D(U)$ – імовірність виявлення зони можливого аварійного забруднення в межах усієї області моніторингу; Π_k – апіорна ймовірність належності небезпечної зони до k -ї ділянки; η_k – коефіцієнт ефективності виявлення на цій ділянці; U_k – пошуково-вимірювальний ресурс, спрямований на k -ту ділянку.

Функціонал (3.22) має властивість насичення: зі збільшенням ресурсу U_k імовірність виявлення на відповідній ділянці зростає, але темп цього зростання поступово зменшується. Це означає, що надмірне зосередження всього ресурсу на одній ділянці не завжди є доцільним, особливо якщо існують інші ділянки з високою апіорною ймовірністю забруднення або значною екологічною чутливістю.

Імовірність невиявлення небезпечної зміни в межах усієї області моніторингу може бути записана як доповнення до (3.22):

$$P_N(U) = 1 - P_D(U), \quad (3.23)$$

де $P_N(U)$ – імовірність невиявлення зони можливого аварійного забруднення за заданого розподілу ресурсу. Мінімізація $P_N(U)$ є еквівалентною максимізації $P_D(U)$, однак у задачах екологічної безпеки доцільно додатково враховувати наслідки невиявлення забруднення на окремих ділянках.

Для цього вводиться коефіцієнт екологічної значущості ділянки G_k , який може враховувати близькість до шляхів поверхневого стоку, наявність ґрунтових або водних компонентів, доступність території, можливість вторинного пилового перенесення та результати оцінювання наслідків, отримані у підрозділі 2.4. Тоді ризик невиявлення небезпечної зміни на k -й ділянці можна подати у вигляді:

$$R_N(k) = G_k \Pi_k \exp(-\eta_k U_k), \quad (3.24)$$

де $R_N(k)$ – умовний ризик невиявлення небезпечної зміни на k -й ділянці; G_k – коефіцієнт екологічної значущості ділянки; Π_k – апіорна ймовірність забруднення; η_k – ефективність виявлення; U_k – ресурс, спрямований на ділянку.

Сумарний ризик невиявлення для всієї області моніторингу визначається як:

$$R_N^\Sigma = \sum_{k=1}^n G_k \Pi_k \exp(-\eta_k U_k), \quad (3.25)$$

де R_N^Σ – сумарний ризик невиявлення небезпечної зміни в межах області моніторингу. Мінімізація цього показника дає змогу врахувати не лише ймовірність формування зони забруднення, а й можливий екологічний наслідок її несвоєчасного виявлення.

Ключовим елементом розподілу ресурсу є граничний приріст імовірності виявлення на одиницю додаткового пошуково-вимірнювального ресурсу. Для функціонала (3.22) він визначається похідною:

$$\frac{\partial P_D}{\partial U_k} = \Pi_k \eta_k \exp(-\eta_k U_k), \quad (3.26)$$

де $\partial P_D / \partial U_k$ – приріст загальної імовірності виявлення за рахунок збільшення ресурсу на k -й ділянці. Найбільше значення цього показника означає, що додатковий ресурс на відповідній ділянці дає найбільший внесок у підвищення ймовірності виявлення.

Якщо враховується екологічна значущість ділянки, доцільно використовувати ризик-орієнтований граничний показник:

$$\frac{\partial R_N^\Sigma}{\partial U_k} = -G_k \Pi_k \eta_k \exp(-\eta_k U_k), \quad (3.27)$$

де від'ємний знак показує зменшення сумарного ризику невиявлення за рахунок додаткового ресурсу. За модулем цей показник характеризує ефективність спрямування додаткового часу обстеження на відповідну ділянку.

У таблиці 3.5 наведено зміст основних показників імовірнісної постановки задачі виявлення зон аварійного забруднення.

Таблиця 3.5 Показники імовірнісної постановки задачі виявлення зон аварійного забруднення

Показник	Зміст	Використання в задачі моніторингу
Π_k	апріорна ймовірність забруднення k -ї ділянки	визначає початкову увагу до ділянки
η_k	ефективність виявлення на ділянці	враховує чутливість сенсора та умови вимірювання
U_k	пошуково-вимірювальний ресурс	визначає ресурс, спрямований на ділянку
$P_D(U)$	імовірність виявлення в усій області	використовується як критерій достатності моніторингу
$R_N(k)$	ризик невиявлення на ділянці	враховує екологічну значущість ділянки
$\partial P_D / \partial U_k$	граничний приріст імовірності виявлення	використовується для перерозподілу ресурсу

Після завершення чергового етапу обстеження апріорний розподіл має оновлюватися. Якщо небезпечна зміна на k -й ділянці не виявлена, апостеріорна ймовірність для цієї ділянки зменшується пропорційно ймовірності невиявлення за наявного ресурсу. Для дискретної області це подається як:

$$\Pi_k^{(q+1)} = \frac{\Pi_k^{(q)} \exp(-\eta_k U_k^{(q)})}{\sum_{j=1}^n \Pi_j^{(q)} \exp(-\eta_j U_j^{(q)})}, \quad (3.28)$$

де $P_k^{(q+1)}$ – апостеріорна ймовірність для k -ї ділянки після q -го циклу обстеження; $P_k^{(q)}$ – ймовірність до початку цього циклу; $U_k^{(q)}$ – ресурс, спрямований на k -ту ділянку під час q -го циклу; j – номер ділянки у сумі нормування.

Якщо на ділянці зафіксовано радіаційну аномалію, вона переходить із режиму пошуку до режиму уточнення меж. У цьому випадку подальша стратегія має спрямовуватися не на зменшення апостеріорної ймовірності, а на збільшення просторової деталізації вимірювань у межах виявленої зони.

3.3.2 Процедура отримання раціональних стратегій пошуково-вимірювального контролю за пріоритетними зонами. Раціональна стратегія пошуково-вимірювального контролю в умовах аварії, спричиненої воєнними діями, не обов'язково є математично оптимальною для всіх можливих сценаріїв. Її призначення полягає у забезпеченні прийняттого рівня виявлення зон можливого радіоактивного забруднення за наявних обмежень часу, доступності території, технічних характеристик безпілотних літальних апаратів та неповноти первинної інформації.

Процедура отримання такої стратегії має бути поетапною. На першому етапі формується початковий набір ділянок контролю. На другому етапі для кожної ділянки визначаються апріорна ймовірність забруднення, коефіцієнт пріоритетності, ефективність виявлення та екологічна значущість. На третьому етапі розраховується початковий розподіл пошуково-вимірювального ресурсу. На четвертому етапі формується маршрут дистанційного обстеження. На п'ятому етапі стратегія уточнюється за результатами вимірювань.

Початковий ваговий показник ділянки можна визначити як поєднання апріорної ймовірності, пріоритетності та екологічної значущості:

$$B_k^{(0)} = P_k P_k G_k, \quad (3.29)$$

де $B_k^{(0)}$ – початковий ваговий показник k -ї ділянки; P_k – апріорна ймовірність формування зони забруднення; R_k – коефіцієнт пріоритетності ділянки; G_k – коефіцієнт екологічної значущості.

Оскільки високе значення $B_k^{(0)}$ може поєднуватися з низькою ефективністю виявлення, для розподілу ресурсу доцільно використовувати скоригований ваговий показник:

$$\Omega_k = \frac{B_k^{(0)}}{\eta_k + \varepsilon}, \quad (3.30)$$

де Ω_k – скоригований ваговий показник ділянки; η_k – ефективність виявлення; ε – малий додатний параметр, який запобігає діленню на нуль. Такий запис означає, що ділянки з високою небезпекою, але складними умовами виявлення, отримують більшу частку ресурсу.

Розподіл доступного ресурсу між ділянками може бути заданий пропорційно до скоригованих вагових показників:

$$U_k^{(0)} = U_\Sigma \frac{\Omega_k}{\sum_{j=1}^n \Omega_j}, \quad (3.31)$$

де $U_k^{(0)}$ – початковий ресурс, рекомендований для k -ї ділянки; U_Σ – сумарний пошуково-вимірювальний ресурс; Ω_j – скоригований ваговий показник j -ї ділянки.

На практиці до маршруту першочергового обстеження включаються не всі ділянки, а лише ті, для яких значення вагового показника, пріоритетності або критерію стану перевищує прийняті порогові значення. Умову включення можна подати так:

$$D_k \in R_1: \quad \Omega_k \geq \Omega_{cr} \vee P_k \geq P_{cr} \vee C(k) > 1, \quad (3.32)$$

де R_1 – множина ділянок першочергового обстеження; Ω_{cr} , P_{cr} – критичні значення скоригованого вагового показника та пріоритетності; $C(k)$ – граничний критерій стану ділянки; V – логічне «або».

Після визначення множини R_1 формується маршрут безпілотного літального апарата. Для маршруту $R = (D_{r_1}, D_{r_2}, \dots, D_{r_s})$ сумарний час виконання завдання має задовольняти умову:

$$T_R = \sum_{l=1}^s t_{r_l} + \sum_{l=1}^{s-1} \frac{d(r_l, r_{l+1})}{v_{tr}} \leq T_{max}, \quad (3.33)$$

де T_R – сумарний час маршруту; t_{r_l} – час обстеження l -ї ділянки маршруту; $d(r_l, r_{l+1})$ – відстань між сусідніми ділянками маршруту; v_{tr} – швидкість переміщення БпЛА між ділянками; T_{max} – максимально допустимий час виконання завдання.

Раціональність маршруту можна оцінити через відношення очікуваного ефекту обстеження до витраченого часу:

$$J_R = \frac{\sum_{D_k \in R} G_k \Pi_k [1 - \exp(-\eta_k U_k)]}{T_R}, \quad (3.34)$$

де J_R – показник ефективності маршруту; чисельник характеризує очікуваний екологічно значущий результат обстеження, а знаменник – час, необхідний для виконання маршруту.

У разі наявності кількох можливих маршрутів обирається той, для якого значення J_R є найбільшим за умови дотримання обмежень безпеки, часу і технічної придатності польоту:

$$R^{rat} = \operatorname{argmax}_R J_R, \quad T_R \leq T_{max}, \quad (3.35)$$

де R^{rat} – раціональний маршрут пошуково-вимірювального контролю.

Таблиця 3.6 Етапи отримання раціональної стратегії пошуково-вимірювального контролю

Етап	Зміст дії	Результат
1	поділ території на ділянки контролю	множина ділянок D_k
2	визначення P_k, R_k, G_k, η_k	набір вихідних параметрів для кожної ділянки
3	розрахунок Ω_k	ранжування ділянок за потребою в ресурсі
4	визначення $U_k^{(0)}$	початковий розподіл пошуково-вимірювального ресурсу
5	формування R_1	множина ділянок першочергового контролю
6	побудова маршруту R	послідовність обстеження ділянок БпЛА
7	обчислення J_R	оцінка раціональності маршруту
8	оновлення P_k після вимірювань	уточнення подальшої стратегії

Після виконання першого маршруту стратегія має уточнюватися за результатами вимірювань. Якщо на ділянці D_k зафіксовано перевищення контрольного рівня або локальну радіаційну аномалію, вона переводиться до множини ділянок уточнення меж:

$$D_k \in R_Z: C(k) > 1 \vee V(r, k) > 0 \vee A_{loc}(k) = 1, \quad (3.36)$$

де R_Z – множина ділянок, на яких необхідне уточнення меж радіоактивного забруднення; $V(r, k)$ – швидкість зміни контрольованого показника; $A_{loc}(k)$ – ознака локальної аномалії, що набуває значення 1 у разі її виявлення.

Для ділянок, де небезпечну зміну не виявлено, апостеріорна ймовірність зменшується за формулою (3.28), а невикористаний або повторно доступний ресурс перерозподіляється між іншими ділянками. Узагальнена ітераційна схема може бути записана так:

$$\{P_k^{(q)}, U_k^{(q)}, R^{(q)}\} \rightarrow \{P_k^{(q+1)}, U_k^{(q+1)}, R^{(q+1)}\}, \quad (3.37)$$

де q – номер циклу пошуково-вимірювального контролю;
 $R^{(q)}$ – маршрут на q -му циклі; $R^{(q+1)}$ – оновлений маршрут після врахування результатів вимірювань.

Для практичного застосування процедури доцільно виділити три режими обстеження: первинний пошук, уточнення меж і повторний контроль (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 Режими пошуково-вимірювального контролю

Режим	Умова переходу	Зміст дій	Очікуваний результат
Первинний пошук	високі P_k, R_k або Ω_k	дистанційне обстеження пріоритетних ділянок	виявлення або невиявлення аномалії
Уточнення меж	$C(k) > 1$, $V(r, k) > 0$, локальна аномалія	збільшення щільності вимірювань, додаткові проходи БпЛА, наземне підтвердження	визначення меж зони забруднення
Повторний контроль	невиявлення за високої невизначеності або після природоохоронних заходів	повторне обстеження, порівняння з попередніми даними	підтвердження стабілізації або потреби в додаткових заходах

Раціональна стратегія вважається достатньою, якщо після виконання запланованих маршрутів досягається встановлений рівень імовірності виявлення або зменшується сумарний ризик невиявлення до прийнятного рівня:

$$P_D(U) \geq P_{req} \quad \text{або} \quad R_N^\Sigma \leq R_{adm}, \quad (3.38)$$

де P_{req} – необхідний рівень імовірності виявлення; R_{adm} – прийнятний рівень сумарного ризику невиявлення.

Якщо умова (3.38) не виконується, необхідно збільшити ресурс обстеження, змінити маршрут, залучити додатковий засіб контролю або перейти до повторного циклу моніторингу після уточнення вихідних даних.

Таким чином, процедура отримання раціональних стратегій пошуково-вимірювального контролю передбачає імовірнісне ранжування ділянок, розрахунок початкового розподілу ресурсу, формування маршруту БпЛА, оцінювання його ефективності та подальше оновлення стратегії за результатами вимірювань.

3.3.3 Характеристики безпілотних літальних апаратів та їх вплив на результати дистанційного обстеження пріоритетних зон контролю. У задачі пошуково-вимірювального контролю безпілотний літальний апарат розглядається як мобільний носій вимірювального обладнання, який забезпечує дистанційне обстеження ділянок з обмеженим або небезпечним доступом. Його застосування дає змогу отримувати просторово прив'язані дані про радіаційні показники, виявляти локальні аномалії та уточнювати межі зон можливого аварійного радіоактивного забруднення.

На результати дистанційного обстеження впливають не лише характеристики сенсора, а й параметри польоту. До основних характеристик належать висота польоту, швидкість руху, тривалість роботи, ширина смуги

огляду, частота реєстрації даних, просторовий крок вимірювань, чутливість радіаційного датчика, точність геоприв'язки та можливість повторного проходу над ділянкою. У межах математичної моделі ці характеристики визначають пошуково-вимірювальний ресурс, імовірність виявлення радіаційної аномалії та точність просторового уточнення небезпечної зони.

Таблиця 3.8 Характеристики БпЛА, що впливають на результати дистанційного обстеження

Група характеристик	Показник	Вплив на результат обстеження
Льотні	висота польоту, швидкість, тривалість роботи	визначають площу покриття, час обстеження та просторовий крок вимірювань
Сенсорні	чутливість датчика, частота реєстрації, кут огляду	визначають імовірність фіксації радіаційної аномалії
Просторові	точність геоприв'язки, ширина смуги огляду, перекриття маршрутів	впливають на точність картування меж радіоактивного забруднення
Організаційні	можливість повторного проходу, безпечність маршруту, зв'язок з оператором	визначають стабільність отримання даних та коригування маршруту

Під час руху БпЛА вимірювання виконуються не безперервно в математичному сенсі, а з певною частотою реєстрації. Тому просторовий крок

між двома послідовними вимірюваннями вздовж маршруту залежить від швидкості польоту та інтервалу між вимірюваннями:

$$\Delta l_k = v_k \Delta t_s, \quad (3.39)$$

де Δl_k – просторовий крок вимірювань на k -й ділянці; v_k – швидкість польоту БПЛА під час обстеження цієї ділянки; Δt_s – інтервал між двома послідовними вимірюваннями або період дискретизації сенсора.

Зі зростанням швидкості польоту за незмінної частоти реєстрації збільшується відстань між вимірюваннями, що може зменшувати ймовірність фіксації локальної радіаційної аномалії. Тому для ділянок з високою пріоритетністю швидкість польоту має узгоджуватися з необхідною щільністю вимірювань.

Кількість вимірювань, які можуть бути отримані на k -й ділянці за час її обстеження, визначається співвідношенням:

$$N_k = \left\lfloor \frac{t_k}{\Delta t_s} \right\rfloor + 1, \quad (3.40)$$

де N_k – кількість вимірювань на k -й ділянці; t_k – час обстеження ділянки; Δt_s – інтервал між вимірюваннями; $\lfloor \cdot \rfloor$ – операція взяття цілої частини.

Для оцінювання деталізації обстеження використовується щільність вимірювань у межах ділянки:

$$\rho_k = \frac{N_k}{S_{d,k}}, \quad (3.41)$$

де ρ_k – щільність вимірювань на k -й ділянці; N_k – кількість вимірювань; $S_{d,k}$ – площа ділянки, фактично охоплена дистанційним обстеженням.

Показник ρ_k має практичне значення для оцінювання достатності даних. Якщо щільність вимірювань є низькою, локальна аномалія може залишитися між траєкторіями або між послідовними точками реєстрації. Якщо щільність вимірювань достатня, результати дистанційного обстеження можуть використовуватися для попереднього уточнення меж зони екологічної небезпеки.

Ширина смуги огляду або вимірювання визначає, яку частину поверхні охоплює БпЛА за один прохід. У подальших розрахунках вона позначається як B_k і враховується під час визначення площі дистанційного покриття. Якщо за час t_k БпЛА рухається зі швидкістю v_k , площа фактичного дистанційного обстеження може бути подана як:

$$S_{d,k} = \chi_k B_k v_k t_k, \quad (3.42)$$

де $S_{d,k}$ – площа k -ї ділянки, фактично охоплена дистанційним обстеженням; B_k – ширина смуги огляду або вимірювання; v_k – швидкість польоту; t_k – час обстеження; χ_k – коефіцієнт ефективного покриття, який враховує перекриття проходів, втрати даних і нерівномірність траєкторії.

Коефіцієнт χ_k набуває значень у межах від 0 до 1. Значення, близьке до 1, відповідає стабільному маршруту з мінімальними втратами даних. Зменшення χ_k свідчить про неповне або нерівномірне покриття, що потребує повторного проходу або коригування маршруту.

Для оцінювання можливості виявлення локальної аномалії доцільно враховувати співвідношення між просторовим кроком вимірювань і характерним розміром аномалії. Якщо характерний розмір аномалії на ділянці позначити a_k , то коефіцієнт просторової деталізації можна подати як:

$$D_k^{sp} = \frac{a_k}{\Delta l_k}, \quad (3.43)$$

де D_k^{sp} – коефіцієнт просторової деталізації обстеження;
 a_k – характерний лінійний розмір локальної радіаційної аномалії або мінімальної зони, яку потрібно виявити; Δl_k – просторовий крок вимірювань уздовж маршруту.

Якщо $D_k^{sp} < 1$, просторовий крок перевищує характерний розмір аномалії, тому ймовірність її пропуску зростає. Якщо $D_k^{sp} \geq 1$, кількість вимірювань уздовж траєкторії є достатньою для попередньої фіксації аномалії за умови достатньої чутливості сенсора.

Чутливість засобу контролю впливає на ефективність виявлення η_k , яка використовувалась у попередніх формулах. Для практичного застосування її доцільно пов'язати з контрастністю аномалії відносно фонового рівня та умовами польоту:

$$\eta_k = \eta_0 \frac{\Delta R_k}{R_{bg,k} + \varepsilon} \mu_k, \quad (3.44)$$

де η_k – ефективність виявлення на k -й ділянці; η_0 – базова ефективність сенсора; ΔR_k – перевищення радіаційного показника над фоновим рівнем; $R_{bg,k}$ – фоновий рівень на ділянці; ε – малий додатний параметр, що запобігає діленню на нуль; μ_k – коефіцієнт умов вимірювання, який враховує висоту польоту, швидкість руху, екранування, метеорологічні умови та стабільність геоприв'язки.

Показник η_k не є сталою величиною для всієї зони впливу сховища. Він може змінюватися між ділянками залежно від фону, характеристик покриття, висоти польоту, наявності перешкод і режиму роботи сенсора. Тому однакова тривалість обстеження на різних ділянках може давати різну ймовірність виявлення (табл. 3.9).

Таблиця 3.9 Вплив параметрів польоту БпЛА на якість дистанційного обстеження

Параметр	Збільшення параметра	Можливий позитивний ефект	Можливе обмеження
Висота польоту	збільшує ширину смуги огляду	охоплення більшої площі	зменшення просторової деталізації та чутливості
Швидкість польоту	скорочує час обстеження ділянки	швидке покриття території	збільшення кроку між вимірюваннями
Час обстеження	збільшує кількість вимірювань	підвищення достовірності даних	обмеження ресурсом БпЛА і часом реагування
Частота реєстрації	зменшує просторовий крок	краще виявлення локальних аномалій	збільшення обсягу даних і вимог до оброблення
Повторний прохід	підвищує підтвердження результату	уточнення меж і зменшення випадкової похибки	збільшення часу маршруту

Для оцінювання узгодженості режиму польоту з вимогами до обстеження пріоритетної ділянки можна використати коефіцієнт придатності режиму дистанційного обстеження:

$$L_k = \omega_1 H_k + \omega_2 D_k^{sp} + \omega_3 \eta_k + \omega_4 \mu_k, \quad (3.45)$$

де L_k – коефіцієнт придатності режиму дистанційного обстеження k -ї ділянки; H_k – коефіцієнт покриття ділянки дистанційним обстеженням;

D_k^{sp} – коефіцієнт просторової деталізації; η_k – ефективність виявлення; μ_k – коефіцієнт умов вимірювання; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – вагові коефіцієнти, для яких виконується умова:

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1, \quad (3.46)$$

Коефіцієнт L_k використовується для перевірки, чи відповідає обраний режим польоту вимогам до пріоритетної ділянки. Якщо L_k є недостатнім, необхідно змінити висоту, швидкість, частоту вимірювань, кількість проходів або залучити інший засіб контролю.

Якщо за результатами розрахунку коефіцієнт придатності L_k не досягає встановленого рівня L_{req} , ділянка має бути включена до повторного або уточнювального обстеження:

$$D_k \in R_{rep}, \quad \text{якщо} \quad L_k < L_{req} \vee H_k < 1 \vee D_k^{sp} < 1, \quad (3.47)$$

де R_{rep} – множина ділянок повторного обстеження; L_{req} – мінімально допустиме значення коефіцієнта придатності режиму; H_k – коефіцієнт покриття ділянки; D_k^{sp} – коефіцієнт просторової деталізації; \vee – логічне «або».

Результати дистанційного обстеження мають використовуватися не ізольовано, а разом із даними стаціонарних постів, мобільних вимірювань і лабораторного аналізу проб. БПЛА забезпечує оперативне просторове уточнення, але для підтвердження типу забруднення та його радіонуклідного складу необхідні інструментальні або лабораторні дані з пріоритетних ділянок.

Таблиця 3.10 Використання характеристик БпЛА у математичній моделі моніторингу

Характеристика	Математичне відображення	Використання в моделі
Швидкість польоту	$v_k, \Delta l_k$	визначення просторового кроку і часу маршруту
Час обстеження	t_k, T_R	розподіл пошуково-вимірювального ресурсу
Ширина смуги огляду	B_k	розрахунок площі покриття ділянки
Частота вимірювань	$\Delta t_s, N_k$	оцінювання кількості точок контролю
Ефективність сенсора	η_k	розрахунок імовірності виявлення аномалії
Умови вимірювання	μ_k	коригування ефективності виявлення
Повторні проходи	n_k, H_k	підвищення покриття і достовірності результатів

Таким чином, розроблено математичні закономірності розподілу пошуково-вимірювального ресурсу за пріоритетними зонами контролю. Встановлено зв'язок між апіорною ймовірністю формування зони можливого радіоактивного забруднення, коефіцієнтом пріоритетності ділянки, ефективністю виявлення, доступним ресурсом обстеження, параметрами маршруту та технічними характеристиками безпілотних літальних апаратів. Показано, що раціональна стратегія моніторингу має передбачати нерівномірний розподіл пошуково-вимірювального ресурсу з урахуванням

рівня небезпеки, інформаційної невизначеності, обмеження доступу, площі покриття та очікуваної імовірності виявлення небезпечної зміни.

3.4 Розроблення математичної моделі моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями

Математична модель моніторингу стану навколишнього природного середовища має забезпечити перехід від вихідної інформації про небезпечні чинники, критерії стану довкілля та можливі шляхи поширення радіоактивного забруднення до кількісного обґрунтування маршруту моніторингу. Її призначення полягає у визначенні ділянок першочергового контролю, розподілі пошуково-вимірального ресурсу, розрахунку імовірності виявлення зони аварійного забруднення, уточненні апостеріорної оцінки її положення та формуванні вихідних даних для подальшої методики управління екологічною безпекою.

У цьому підрозділі використано такі індекси: k – номер ділянки контролю; j – номер ділянки у сумі нормування; r – номер контрольованого показника; s – компонент навколишнього природного середовища; l – номер елемента маршруту; n – кількість ділянок контролю; m – кількість контрольованих показників або компонентів довкілля; T – час виконання моніторингового завдання.

Таблиця 3.11 Структурні елементи математичної моделі моніторингу

Елемент моделі	Позначення	Зміст у задачі моніторингу
Область моніторингу	D	зона впливу сухого сховища ВЯП
Ділянка контролю	D_k	частина території, для якої визначаються показники стану довкілля
Апріорна ймовірність	$P_k(0)$	початкова оцінка належності зони забруднення до k -ї ділянки
Пошуково-вимірювальний ресурс	$U_k(T)$	ресурс контролю, спрямований на k -ту ділянку за час T
Ефективність виявлення	η_k	здатність засобу контролю фіксувати небезпечну зміну на ділянці
Імовірність виявлення	$P_d(k, T)$	імовірність фіксації радіаційної аномалії на k -й ділянці
Апостеріорна ймовірність	$P_k(T)$	уточнена ймовірність після виконання обстеження
Маршрут контролю	R	послідовність ділянок, включених до обстеження
Результат моделі	$R_1, U_k^*, P_D(T)$	першочергові ділянки, розподіл ресурсу та очікувана ймовірність виявлення

Область моніторингу подається як скінченна сукупність ділянок контролю:

$$D = \bigcup_{k=1}^n D_k, \quad D_k \cap D_j = \emptyset, \quad k \neq j, \quad (3.48)$$

де D – область моніторингу; D_k і D_j – окремі ділянки контролю; n – кількість ділянок, на які поділено територію.

Для кожної ділянки задається початкова ймовірність формування або перебування зони можливого аварійного забруднення:

$$P_k(0) \geq 0, \quad \sum_{k=1}^n P_k(0) = 1, \quad (3.49)$$

де $P_k(0)$ – апіорна ймовірність для k -ї ділянки до початку пошуково-вимірювальних дій. Значення $P_k(0)$ формується на основі результатів розділу 2: небезпечних чинників, критеріїв стану довкілля, шляхів поширення забруднення та показників можливих екологічних наслідків.

Початковий стан кожної ділянки описується вектором характеристик:

$$Y_k(0) = \{P_k(0), P_k, C(k), Q_k, N(k), A_k, U_k^{info}, \eta_k, S_k\}, \quad (3.50)$$

де P_k – коефіцієнт пріоритетності ділянки; $C(k)$ – граничний критерій стану ділянки; Q_k – характеристика домінуючого шляху поширення забруднення; $N(k)$ – інтегральний показник можливих екологічних наслідків; A_k – рівень обмеження доступу; U_k^{info} – рівень інформаційної невизначеності; η_k – ефективність виявлення; S_k – площа ділянки.

Обсяг пошуково-вимірювальних дій на ділянці формується з урахуванням технічних характеристик безпілотного літального апарата, часу обстеження, ширини смуги вимірювання та кількості проходів:

$$U_k(T) = \beta_k B_k v_k t_k n_k, \quad (3.51)$$

де $U_k(T)$ – пошуково-вимірювальний ресурс на k -й ділянці;
 β_k – коефіцієнт вимірювальної ефективності; B_k – ширина смуги огляду або вимірювання; v_k – швидкість польоту; t_k – час обстеження ділянки;
 n_k – кількість проходів над ділянкою.

Ширина смуги огляду або вимірювання визначається через висоту польоту і кут огляду сенсора:

$$B_k = 2h_k \tan\left(\frac{\varphi_k}{2}\right), \quad (3.52)$$

де h_k – висота польоту безпілотного літального апарата над k -ю ділянкою; φ_k – кут огляду сенсора або зона ефективного вимірювання.

Імовірність виявлення небезпечної зміни на ділянці залежить від ефективності засобу контролю і накопиченого пошуково-вимірювального ресурсу:

$$P_d(k, T) = 1 - \exp[-\eta_k U_k(T)], \quad (3.53)$$

де $P_d(k, T)$ – імовірність виявлення радіаційної аномалії або зони екологічної небезпеки на k -й ділянці за час T .

Загальна імовірність виявлення зони можливого аварійного забруднення в межах усієї області моніторингу визначається як сума внесків окремих ділянок:

$$P_D(T) = \sum_{k=1}^n P_k(0) [1 - \exp(-\eta_k U_k(T))], \quad (3.54)$$

де $P_D(T)$ – загальна імовірність виявлення зони можливого аварійного забруднення протягом часу T .

Якщо після обстеження небезпечну зміну не виявлено, розподіл імовірності уточнюється. Апостеріорна ймовірність для кожної ділянки визначається за формулою:

$$P_k(T) = \frac{P_k(0)\exp[-\eta_k U_k(T)]}{\sum_{j=1}^n P_j(0)\exp[-\eta_j U_j(T)]} \quad (3.55)$$

де $P_k(T)$ – апостеріорна ймовірність належності зони можливого радіоактивного забруднення до k -ї ділянки після виконання обстеження; j – номер ділянки у сумі нормування.

Для вибору ділянок першочергового контролю використовується логічне правило, яке поєднує пріоритетність, результати контролю, інформаційну невизначеність і обмеження доступу:

$$D_k \in R_1, \quad \text{якщо} \quad P_k \geq P_{cr} \vee C(k) > 1 \vee U_k^{info} \geq U_{cr} \vee A_k \geq A_{cr}, \quad (3.56)$$

де R_1 – множина ділянок першочергового обстеження; P_{cr} , U_{cr} , A_{cr} – критичні значення відповідно для пріоритетності, інформаційної невизначеності та обмеження доступу; \vee – логічне «або».

Рекомендований розподіл пошуково-вимірювального ресурсу між ділянками першочергового контролю визначається через ваговий коефіцієнт:

$$W_k = \frac{P_k G_k}{\eta_k + \varepsilon}, \quad U_k^* = U_\Sigma \frac{W_k}{\sum_{j \in R_1} W_j}, \quad (3.57)$$

де W_k – ваговий коефіцієнт k -ї ділянки; G_k – екологічна значущість ділянки; ε – малий додатний параметр, що запобігає діленню на нуль; U_k^* – рекомендований обсяг ресурсу для k -ї ділянки; U_Σ – загальний пошуково-вимірювальний ресурс.

Оцінювання достатності обстеження виконується за коефіцієнтом покриття:

$$H(k) = \min \left\{ 1, \frac{S_{d,k}}{S_k} \right\}, \quad S_{d,k} = B_k v_k t_k n_k, \quad (3.58)$$

де $H(k)$ – коефіцієнт покриття k -ї ділянки дистанційним обстеженням; $S_{d,k}$ – площа, фактично охоплена дистанційним обстеженням; S_k – площа ділянки, що потребує контролю.

Ризик невиявлення небезпечної зміни в межах області моніторингу визначається як сума ризиків за ділянками з урахуванням їх екологічної значущості:

$$R_N^{\Sigma}(T) = \sum_{k=1}^n G_k P_k(0) \exp[-\eta_k U_k(T)], \quad (3.59)$$

де $R_N^{\Sigma}(T)$ – сумарний ризик невиявлення зони можливого аварійного забруднення; G_k – коефіцієнт екологічної значущості k -ї ділянки.

Оптимізаційна постановка моделі полягає у виборі такого розподілу ресурсу $U_k(T)$, який забезпечує максимальну імовірність виявлення або мінімальний ризик невиявлення за встановлених обмежень:

$$\max_{U_1, \dots, U_n} P_D(T) \quad \text{або} \quad \min_{U_1, \dots, U_n} R_N^{\Sigma}(T), \quad (3.60)$$

Граничні умови моделі пов'язані з часом виконання завдання, загальним пошуково-вимірвальним ресурсом, технічними характеристиками безпілотного літального апарата та можливістю покриття ділянок контролю:

$$0 \leq T \leq T_{max}, \quad \sum_{k=1}^n U_k(T) \leq U_{\Sigma}, \quad U_k(T) \geq 0, \quad (3.61)$$

$$h_{min} \leq h_k \leq h_{max}, \quad v_{min} \leq v_k \leq v_{max}, \quad 0 \leq H(k) \leq 1, \quad (3.62)$$

Для маршруту $R = (D_{r_1}, D_{r_2}, \dots, D_{r_s})$ додатково враховується обмеження на час переміщення між ділянками:

$$\sum_{l=1}^s t_{r_l} + \sum_{l=1}^{s-1} \frac{d(r_l, r_{l+1})}{v_{tr}} \leq T_{max}, \quad (3.63)$$

де t_{r_l} – час вимірювання над l -ю ділянкою маршруту;
 $d(r_l, r_{l+1})$ – відстань між сусідніми ділянками маршруту; v_{tr} – швидкість переміщення безпілотного літального апарата між ділянками; s – кількість ділянок, включених до маршруту.

Таблиця 3.12 Початкові та граничні умови математичної моделі

Група умов	Математичне подання	Зміст
Поділ області	$D = \cup D_k, D_k \cap D_j = \emptyset$	територія поділена на окремі ділянки контролю
Апріорна ймовірність	$P_k(0) \geq 0, \sum P_k(0) = 1$	початковий розподіл імовірності формування небезпечної зони
Початковий ресурс	$U_k(0) = 0$	до початку обстеження ресурс на ділянку не спрямовано
Часове обмеження	$0 \leq T \leq T_{max}$	тривалість моніторингового завдання обмежена
Ресурсне обмеження	$\sum U_k(T) \leq U_{\Sigma}$	сумарний пошуково-вимірювальний ресурс є скінченним
Технічні межі БПЛА	$h_{min} \leq h_k \leq h_{max},$ $v_{min} \leq v_k \leq v_{max}$	висота і швидкість польоту обмежені характеристиками апарата
Покриття ділянки	$0 \leq H(k) \leq 1$	обстеження може бути повним або частковим
Маршрутне обмеження	$\sum t_{r_l} + \sum d/v_{tr} \leq T_{max}$	враховано час вимірювання і переміщення між ділянками

Узагальнений вигляд математичної моделі моніторингу можна подати як систему співвідношень:

$$\mathcal{M} = \begin{cases} D = \bigcup_{k=1}^n D_k, & D_k \cap D_j = \emptyset, \quad k \neq j, \\ \Pi_k(0) \geq 0, & \sum_{k=1}^n \Pi_k(0) = 1, \\ Y_k(0) = \{ \Pi_k(0), P_k, C(k), Q_k, N(k), A_k, U_k^{info}, \eta_k, S_k \}, \\ U_k(T) = \beta_k B_k v_k t_k n_k, \\ B_k = 2h_k \tan\left(\frac{\varphi_k}{2}\right), \\ P_d(k, T) = 1 - \exp[-\eta_k U_k(T)], \\ P_D(T) = \sum_{k=1}^n \Pi_k(0) [1 - \exp[-\eta_k U_k(T)]], \\ \Pi_k(T) = \frac{\Pi_k(0) \exp[-\eta_k U_k(T)]}{\sum_{j=1}^n \Pi_j(0) \exp[-\eta_j U_j(T)]}, \\ D_k \in R_1, \quad \text{якщо } P_k \geq P_{cr} \vee C(k) > 1 \vee U_k^{info} \geq U_{cr} \vee A_k \geq A_{cr}, \\ H(k) = \min \left\{ 1, \frac{B_k v_k t_k n_k}{S_k} \right\}, \\ \max_{U_1, \dots, U_n} P_D(T) \quad \text{або} \quad \min_{U_1, \dots, U_n} R_N^\Sigma(T). \end{cases} \quad (3.64)$$

Таблиця 3.13 Вихідні результати математичної моделі моніторингу

Результат моделі	Позначення	Практичне використання
Перелік першочергових ділянок	R_1	побудова маршруту безпілотного літального апарата
Рекомендований розподіл ресурсу	U_k^*	визначення часу, кількості проходів і щільності вимірювань
Імовірність виявлення	$P_D(T)$	оцінювання достатності моніторингового завдання
Апостеріорний розподіл	$\Pi_k(T)$	коригування маршруту після отримання результатів
Покриття ділянки	$H(k)$	визначення потреби в повторному обстеженні
Ризик невиявлення	$R_N^\Sigma(T)$	вибір ділянок, де наслідки пропуску небезпечної зміни є найбільшими
Дані для методики управління	$R_1, U_k^*, \Pi_k(T), H(k)$	формування природоохоронних та контрольних заходів

Система (3.64) об'єднує просторову дискретизацію зони впливу, початкову імовірнісну оцінку, параметри ділянок контролю, пошуково-вимірjuвальний ресурс імовірність виявлення, апостеріорне уточнення положення небезпечної зони, правило вибору першочергових ділянок і критерій оптимізації. Вона є математичною основою для подальшого формування методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями.

Таким чином, розроблено математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями. У моделі зона можливого аварійного забруднення розглядається як об'єкт пошуку з невизначеним просторовим положенням, яке уточнюється на основі апріорної та апостеріорної ймовірностей, результатів дистанційного обстеження й інструментальних вимірювань, пошуково-вимірjuвального ресурсу та ефективності виявлення. Модель враховує пріоритетність ділянок контролю, обмеження доступу, інформаційну невизначеність, технічні характеристики безпілотних літальних апаратів і часові обмеження виконання моніторингового завдання. Це дає змогу обґрунтовувати черговість обстеження території, розподіляти пошуково-вимірjuвальний ресурс і уточнювати положення ділянок, на яких можливе формування зон екологічної безпеки.

Висновки до розділу 3

1. Просторово-часовий розвиток екологічної безпеки у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива доцільно розглядати через поділ території на ділянки контролю, у межах яких можливе виникнення, поширення або накопичення радіоактивного забруднення. Для кожної ділянки

враховуються показники стану довкілля, рівень потенційної небезпеки, доступність, інформаційна невизначеність і потреба в пошуково-вимірjuвальних діях.

2. Постановка задачі моніторингу зон можливого аварійного радіоактивного забруднення полягає у поданні зони екологічної небезпеки як об'єкта пошуку з невизначеним просторовим положенням. Для цього визначено область пошуку, апіорний розподіл імовірності між ділянками контролю, закон виявлення небезпечної зміни, обмеження на пошуково-вимірjuвальний ресурс і критерій вибору стратегії моніторингу. Отримана постановка є основою для подальшого розподілу пошуково-вимірjuвального ресурсу за пріоритетними зонами контролю.

3. Розроблено математичні закономірності розподілу пошуково-вимірjuвального ресурсу за пріоритетними зонами контролю. Встановлено зв'язок між апіорною ймовірністю формування зони можливого радіоактивного забруднення, коефіцієнтом пріоритетності ділянки, ефективністю виявлення, доступним ресурсом обстеження, параметрами маршруту та технічними характеристиками безпілотних літальних апаратів. Показано, що раціональна стратегія моніторингу має передбачати нерівномірний розподіл пошуково-вимірjuвального ресурсу з урахуванням рівня небезпеки, інформаційної невизначеності, обмеження доступу, площі покриття та очікуваної імовірності виявлення небезпечної зміни.

4. Розроблено математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями. У моделі зона можливого аварійного забруднення розглядається як об'єкт пошуку з невизначеним просторовим положенням, яке уточнюється на основі апіорної та апостеріорної ймовірностей, результатів дистанційного обстеження й інструментальних вимірjuвань, пошуково-вимірjuвального ресурсу та ефективності виявлення. Модель враховує пріоритетність ділянок контролю,

обмеження доступу, інформаційну невизначеність, технічні характеристики безпілотних літальних апаратів і часові обмеження виконання моніторингового завдання. Це дає змогу обґрунтовувати черговість обстеження території, розподіляти пошуково-вимірювальний ресурс і уточнювати положення ділянок, на яких можливе формування зон екологічної небезпеки.

РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ У РАЗІ АВАРІЇ НА СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ

Рішення четвертої наукової задачі дисертаційного дослідження щодо розроблення методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями, здійснено за такими напрямками. Спочатку визначено принципи формування методики, склад її вхідних даних і розрахункових показників. Далі сформовано структурну схему методики та встановлено взаємозв'язок її функціональних блоків. Після цього розглянуто процедури аналітично-розрахункового блоку, пов'язані з визначенням пріоритетних зон контролю. Окремо наведено опис процедур пошуково-вимірального блоку, спрямованих на уточнення стану можливого радіоактивного забруднення. Завершальним етапом розглянуто управлінський блок методики, у межах якого здійснюються класифікація стану ділянок за рівнем екологічної небезпеки, вибір контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів та повторний контроль їх результативності.

4.1 Принципи формування методики управління екологічною безпекою

Методика управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями, забезпечує перехід від результатів моніторингу та математичного моделювання до вибору контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів. Її застосування спрямоване на визначення ділянок, де можливе формування, поширення або

накопичення радіоактивного забруднення, уточнення їхнього стану та обґрунтування заходів для зменшення впливу на компоненти навколишнього природного середовища.

Управління екологічною безпекою доцільно розглядати як послідовний інформаційно-управлінський процес. Він охоплює отримання первинних даних про аварійний вплив, перевірку їх достовірності, інтерпретацію результатів контролю, розрахунок пріоритетності ділянок та вибір подальших дій. В умовах аварії воєнного походження такий процес має враховувати обмеження доступу до окремих ділянок, неповноту первинної інформації, потребу в дистанційному обстеженні та необхідність прийняття рішень у межах обмеженого часу.

Першим принципом методики є компонентна орієнтація оцінювання стану навколишнього природного середовища. Це означає, що рішення приймаються з урахуванням можливого впливу на повітряне середовище, ґрунтовий покрив, поверхневий стік, поверхневі й підземні води, технологічні покриття та прилеглі території.

Другим принципом є просторове ранжування території за рівнем потенційної небезпеки. У разі аварії неможливо одночасно і з однаковою деталізацією обстежити всю зону впливу сховища. Тому першочерговому контролю підлягають ділянки з вищою ймовірністю формування зони можливого радіоактивного забруднення, підвищеним рівнем потенційної екологічної небезпеки, обмеженим доступом, недостатньою кількістю первинних даних або значущим впливом на компоненти довкілля.

Третій принцип полягає у поєднанні дистанційного, інструментального та лабораторного контролю. Безпілотні літальні апарати доцільно застосовувати для первинного обстеження недоступних або небезпечних ділянок, виявлення локальних радіаційних аномалій і уточнення просторового розподілу показників. Наземні вимірювання та лабораторний аналіз проб використовуються для підтвердження результатів дистанційного контролю,

визначення радіонуклідного складу забруднення та обґрунтування подальших природоохоронних заходів.

Четвертим принципом є поетапне уточнення інформації. Початкові рішення в умовах аварії приймаються за неповної інформації, тому результати кожного циклу моніторингу мають використовуватися для коригування маршруту обстеження, зміни пріоритетності ділянок, уточнення положення зони можливого радіоактивного забруднення та вибору наступних дій.

П'ятий принцип передбачає використання результатів математичного моделювання для вибору управлінських рішень. Дані про небезпечні чинники, критерії стану довкілля, шляхи поширення радіоактивного забруднення, результати дистанційного обстеження та інструментальних вимірювань мають включатися до розрахункової схеми. На цій основі визначаються пріоритетні ділянки контролю, розподіляється пошуково-вимірювальний ресурс, оцінюється ймовірність виявлення зони можливого радіоактивного забруднення та формуються вихідні дані для вибору природоохоронних заходів.

Шостим принципом є урахування обмежень безпеки персоналу. Якщо окремі ділянки є небезпечними для перебування людей, наземне обстеження може бути замінене або відтерміноване дистанційним контролем. Наземне підтвердження результатів доцільно виконувати лише на тих ділянках, де це можливо без створення додаткового ризику для персоналу.

Сьомий принцип полягає у відповідності природоохоронних заходів установленому рівню екологічної небезпеки. Для кожної ділянки враховується не тільки факт наявності або відсутності перевищення контрольного рівня, а й характер можливих наслідків: локальне забруднення, поширення за межі первинної ділянки, накопичення у понижених частинах рельєфу, вторинне пилове підняття або потрапляння забруднення до водного середовища. Залежно від цього визначаються потреба в повторному контролі, локалізації, пилопригніченні, контролі поверхневого стоку, відборі проб, дезактивації або обмеженні доступу.

Таким чином, методика управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, ґрунтується на принципах компонентної орієнтації оцінювання стану навколишнього природного середовища, просторового ранжування території за рівнем потенційної небезпеки, поєднання дистанційного, інструментального та лабораторного контролю, поетапного оновлення інформації після кожного циклу моніторингу, використання результатів математичного моделювання, урахування обмежень безпеки персоналу та відповідності природоохоронних заходів установленому рівню екологічної небезпеки.

4.2 Структурна побудова розробленої методики управління екологічною безпекою

4.2.1 Вхідні дані та розрахункові показники методики. Вхідні дані методики охоплюють інформацію, необхідну для активації алгоритму, формування ділянок контролю, розрахунку їхньої пріоритетності, побудови маршруту обстеження та прийняття управлінського рішення. За змістом вони поділяються на дані про аварійний вплив, просторові характеристики території, радіаційно-екологічні показники, результати математичної моделі, технічні параметри засобів контролю та організаційні обмеження (табл. 4.1).

Ці дані не використовуються один раз. Після кожного циклу дистанційного, інструментального або лабораторного контролю вони уточнюються: оновлюється оцінка ймовірності належності небезпечної зони до окремих ділянок, змінюється рівень пріоритетності, визначається потреба у повторному обстеженні, наземному підтвердженні або коригуванні природоохоронних заходів.

Таблиця 4.1 Вхідні дані та розрахункові показники методики управління екологічною безпекою

Група даних	Зміст	Використання в методиці
Дані про аварійний вплив	характер події, ознаки пошкодження, можливе місце виникнення небезпечної зміни	активація методики, попередня ідентифікація небезпечних чинників
Просторові дані	межі зони впливу, розташування контейнерів, технологічних покриттів, дренажу, шляхів доступу	поділ території на ділянки контролю та просторове прив'язування результатів
Радіаційно-екологічні дані	фонові та контрольні рівні, потужність дози, ознаки забруднення поверхонь, ґрунту, повітря або водного середовища	оцінювання стану ділянок, виявлення відхилень і класифікація рівня безпеки
Розрахункові показники математичної моделі	пріоритетність ділянки, апріорна й апостеріорна ймовірність, імовірність виявлення, покриття ділянки, пошуково-вимірювальний ресурс	визначення першочергових зон контролю, побудова маршруту та оцінювання достатності обстеження
Технічні параметри засобів контролю	тип БпЛА, висота і швидкість польоту, час роботи, ширина смуги огляду, тип сенсора	формування маршруту дистанційного обстеження та вибір режиму контролю
Організаційні обмеження	доступність ділянок, безпека персоналу, час реагування, можливість наземного підтвердження	вибір дистанційного, наземного або комбінованого способу контролю

Вхідні дані та розрахункові показники формують інформаційну основу методики. Їх склад має бути достатнім для початкового визначення пріоритетних зон, але водночас відкритим для уточнення після отримання нових моніторингових результатів.

4.2.2 Функціональні блоки, структурно-логічна схема та взаємозв'язок процедур методики. Структурно розроблена методика управління екологічною безпекою складається з трьох функціональних блоків: аналітично-розрахункового, пошуково-вимірювального та управлінського. Такий поділ дає змогу розмежувати процедури підготовки й оброблення вихідних даних, отримання моніторингової інформації та прийняття управлінського рішення.

Аналітично-розрахунковий блок забезпечує перехід від первинної інформації про аварійний вплив до визначення ділянок першочергового контролю. У його межах ідентифікуються небезпечні чинники, формується множина ділянок контролю, обчислюється їхня пріоритетність і визначається множина першочергового обстеження R_1 . На цьому етапі результати математичного моделювання використовуються для просторового ранжування території та підготовки вихідних даних для подальшого обстеження.

Пошуково-вимірювальний блок спрямований на отримання фактичних даних про стан території. Він охоплює формування маршруту БпЛА, дистанційне обстеження, виявлення радіаційних аномалій або зон можливого радіоактивного забруднення, апостеріорне уточнення положення небезпечної зони, наземне підтвердження та лабораторний аналіз проб. Результатом цього блоку є уточнені дані про стан ділянок, які надалі використовуються для вибору управлінських рішень і природоохоронних заходів.

Управлінський блок завершує цикл методики. У ньому здійснюється класифікація стану ділянок за рівнем екологічної безпеки, вибір

контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів, а також повторний контроль після їх виконання. За результатами цього блоку приймається рішення про завершення циклу, продовження моніторингу, повторне уточнення даних або посилення природоохоронних заходів.

Структурно-логічна схема методики відображає послідовно-циклічний характер взаємодії її процедур (рис. 4.1). Послідовність проявляється у переході від вхідних даних до аналітично-розрахункового блоку, далі – до пошуково-вимірювального блоку, після чого результати моніторингу передаються до управлінського блоку для вибору дій. Циклічність полягає в тому, що після кожного етапу контролю отримані дані можуть змінювати попередні оцінки, уточнювати пріоритетність ділянок, коригувати маршрут обстеження або змінювати склад природоохоронних заходів.



Рис. 4.1 Структурно-логічна схема розробленої методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями.

Зворотний зв'язок у методиці реалізується у трьох випадках. Перший випадок виникає, коли на етапі дистанційного або інструментального обстеження отримано недостатньо даних для оцінювання стану ділянки. У

такій ситуації виконується повторне або уточнювальне обстеження. Другий випадок пов'язаний із виявленням радіаційної аномалії або ознак можливого радіоактивного забруднення, що потребує апостеріорного уточнення, наземного підтвердження або лабораторного аналізу проб. Третій випадок виникає після виконання заходів, якщо повторний контроль показує збереження підвищеного рівня небезпеки або невизначеність меж радіоактивного забруднення. У такому разі методика повертається до перерахунку пріоритетності та формування нового маршруту контролю.

Таким чином, структурна побудова методики включає три взаємопов'язані функціональні блоки. В аналітично-розрахунковому блоці первинні дані про аварійний вплив, небезпечні чинники, просторові характеристики території та результати математичного моделювання перетворюються на ранжований перелік ділянок першочергового контролю. У пошуково-вимірювальному блоці для цих ділянок формується маршрут БпЛА, виконується дистанційне обстеження, фіксуються радіаційні аномалії та уточнюється положення зони можливого радіоактивного забруднення. В управлінському блоці результати обстеження і підтверджувальних вимірювань використовуються для класифікації стану ділянок, вибору контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів та прийняття рішення про завершення циклу або повторне обстеження

4.3 Аналітично-розрахунковий блок методики: визначення пріоритетних зон контролю

Аналітично-розрахунковий блок є першим функціональним блоком розробленої методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями. Його призначення полягає у переході від первинної інформації про аварійний вплив та результатів математичного моделювання до виділення ділянок, які мають бути обстежені

в першочерговому порядку. Саме на цьому етапі формується просторово обґрунтована основа для подальшого дистанційного контролю, оскільки в умовах аварії, спричиненої воєнними діями, неможливо одночасно з однаковою деталізацією перевірити всю зону впливу сховища.

Логіка блоку охоплює послідовне виконання чотирьох взаємопов'язаних процедур: попередньої ідентифікації небезпечних чинників, формування ділянок контролю, розрахунку інтегрального показника пріоритетності та побудови маршруту пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА. Результатом є ранжований перелік ділянок контролю та маршрут первинного обстеження, який відповідає заданим часовим і організаційним обмеженням.

4.3.1 Попередня ідентифікація небезпечних чинників. Попередня ідентифікація небезпечних чинників виконується до початку фактичного обстеження і має на меті встановити, на яких ділянках зони впливу сховища існують найбільш імовірні передумови для виникнення або поширення радіоактивного забруднення. Для цього враховуються тип аварійного впливу, можливе місце пошкодження, результати прогнозованої моделі перенесення радіонуклідів, особливості рельєфу, напрямки поверхневого стоку, стан технологічних покриттів, наявність елементів, здатних акумулювати або повторно переносити забруднення, а також доступність окремих ділянок для обстеження.

На цьому етапі для кожної ділянки k визначається показник потенційної безпеки $H(k)$, який інтегрує вплив виявлених чинників. До його складу можуть входити індикатори ймовірного механічного пошкодження, ризику вторинного пилового перенесення, імовірності потрапляння забруднення до поверхневого стоку, близькості до очікуваної траєкторії повітряного перенесення та обмеження доступу для наземного контролю: $H(k) = \sum_{i=1}^m \alpha_i s_i(k)$, $i = 1, \dots, m$, де $s_i(k)$ – нормований індикатор i -го небезпечного чинника для ділянки k ; α_i – ваговий коефіцієнт значущості

чинника; m – кількість врахованих чинників. Показник $H(k)$ використовується не як остаточна оцінка стану ділянки, а як вихідна складова для подальшого розрахунку її пріоритетності.

4.3.2 Формування ділянок контролю у зоні впливу сухого сховища.

Після попередньої ідентифікації небезпечних чинників зона впливу сухого сховища ВЯП поділяється на ділянки контролю. Такий поділ потрібний для того, щоб перевести загальну зону впливу у дискретну форму, придатну для розрахунку пріоритетів і побудови маршруту обстеження. Формування ділянок виконується з урахуванням просторового розташування можливого джерела небезпеки, меж майданчика сховища, напрямків очікуваного перенесення забруднення, особливостей рельєфу, елементів дренажної мережі, дорожньої інфраструктури та потенційно чутливих до забруднення компонентів довкілля.

Зону впливу Ω подають у вигляді сукупності неперетинних ділянок контролю: $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$, $\Omega = z_1 \cup z_2 \cup \dots \cup z_n$, $z_i \cap z_j = \emptyset$, $i \neq j$

Для кожної ділянки z_k формується вектор параметрів $D(k)$, який містить значення показника потенційної небезпеки $H(k)$, прогнозований рівень забруднення $C(k)$, екологічну чутливість $N(k)$, показник обмеження доступу $A(k)$ та рівень інформаційної невизначеності $U_{\text{info}}(k)$: $D(k) = \{H(k), C(k), N(k), A(k), U_{\text{info}}(k)\}$.

Пріоритетність ділянки контролю визначається на основі інтегрального показника $P(k)$, який поєднує результати попередньої ідентифікації небезпечних чинників і дані математичного моделювання. Його введення дає змогу перейти від набору розрізнених характеристик до єдиного критерію, який використовується для ранжування ділянок. До складу показника входять п'ять основних компонентів: $H(k)$ – потенційна небезпека, $C(k)$ – прогнозована інтенсивність забруднення, $N(k)$ – екологічна значущість ділянки, $A(k)$ – складність або обмеження доступу, $U_{\text{info}}(k)$ – інформаційна

невизначеність: $P(k) = w_1 H(k) + w_2 C(k) + w_3 N(k) + w_4 A(k) + w_5 U_{\text{info}}(k)$, $\sum_{i=1}^5 w_i = 1$.

Коефіцієнти w_1 – w_5 відображають відносну вагу відповідних складових у межах конкретного сценарію аварії. Якщо пріоритет надається ймовірному масштабу забруднення, зростає роль $C(k)$; якщо основною проблемою є складність обстеження та дефіцит даних, більшу вагу мають $A(k)$ і $U_{\text{info}}(k)$. Після обчислення $P(k)$ усі ділянки ранжуються за спаданням цього показника.

Множина першочергових ділянок контролю R_1 формується або за правилом порогового значення, або шляхом відбору перших m ділянок із найбільшими значеннями $P(k)$: $R_1 = \{z_k \in Z: P(k) \geq P_{\text{кр}}\}$ або $R_1 = \{z_{(1)}, z_{(2)}, \dots, z_{(m)}\}$

Така процедура забезпечує концентрацію пошуково-вимірювального ресурсу на тих ділянках, де поєднуються вища ймовірність небезпечних змін, більша екологічна значущість та вища інформаційна невизначеність. Схему внутрішньої логіки аналітично-розрахункового блоку подано на рис. 4.2.



Рис. 4.2 Логіка аналітично-розрахункового блоку методики визначення пріоритетних зон контролю

4.3.3 Формування маршруту пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА. Після виділення множини R_1 виконується побудова маршруту пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА. Метою цієї процедури є визначення такої послідовності обльоту ділянок, яка забезпечує максимальне охоплення пріоритетних зон у межах доступного польотного ресурсу. На відміну від попереднього етапу, де встановлюються лише пріоритети, тут формується практичний план дій для дистанційного обстеження.

Маршрут будується з урахуванням значень $P(k)$, просторового розміщення ділянок, часу підльоту між ними, тривалості обстеження кожної ділянки та граничної тривалості одного вильоту БпЛА T_{\max} . У спрощеній постановці задача маршрутизації зводиться до максимізації сумарної пріоритетності охоплених ділянок за умови дотримання часового обмеження: $\max J = \sum_{k \in R_1} P(k) x_k$, за умови $\sum_{k \in R_1} t_k x_k + \sum_{i \in R_1} \sum_{\substack{j \in R_1 \\ j \neq i}} \tau_{ij} y_{ij} \leq T_{\max}$, $x_k \in \{0,1\}$, де x_k – бінарна змінна включення ділянки k до маршруту; t_k – час її безпосереднього обстеження; τ_{ij} – час переходу між ділянками i та j ; y_{ij} – змінна використання відповідного переходу. Якщо всі ділянки множини R_1 не можуть бути охоплені одним вильотом, маршрут формується ітераційно: спочатку для ділянок із найвищими значеннями $P(k)$, а решта переноситься до наступного циклу обстеження.

Кінцевим результатом процедури є впорядкований маршрут БпЛА та перелік ділянок, які мають бути обстежені в першочерговому порядку. Ці дані передаються до пошуково-вимірювального блоку методики, де виконується фактичне дистанційне обстеження, виявлення аномалій і подальше уточнення меж можливого радіоактивного забруднення.

4.3.4 Блок-схема визначення першочергових зон обстеження. Узагальнену послідовність переходу від первинної інформації про аварійний вплив до формування множини першочергових зон обстеження та маршруту БпЛА подано на рис. 4.3. Блок-схема відображає внутрішню логіку

аналітично-розрахункового блоку та дає змогу відокремити його функції від наступних процедур дистанційного й наземного контролю.

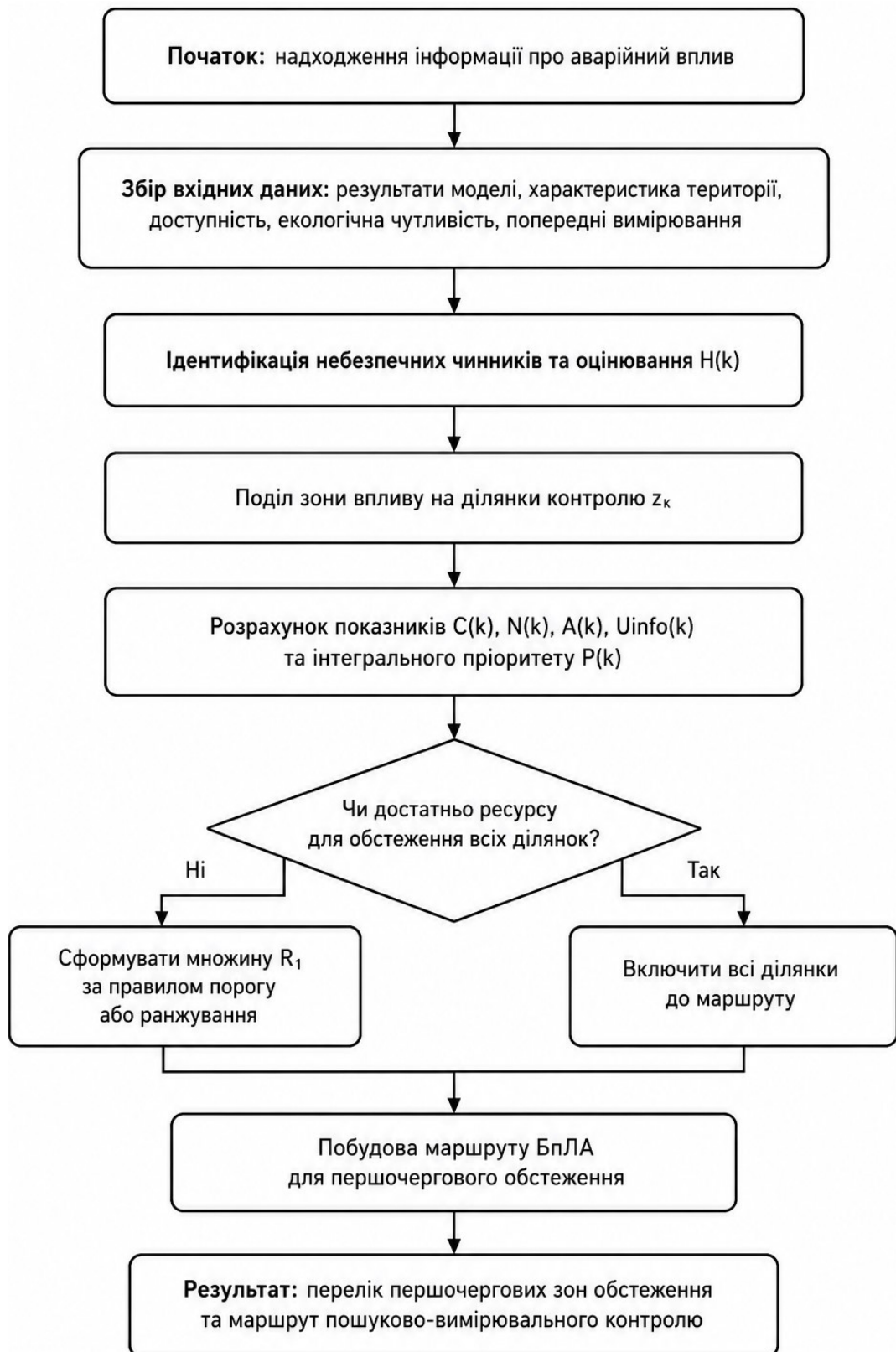


Рис. 4.3 Блок-схема визначення першочергових зон обстеження

Подана блок-схема показує, що результатом цього блоку є не підтвердження факту забруднення, а обґрунтований вибір ділянок, на яких пошуково-вимірювальні дії мають бути виконані насамперед. Це дає змогу цілеспрямовано використовувати обмежений часовий ресурс та уникати рівномірного, але неефективного розподілу пошуково-вимірювального ресурсу по всій зоні впливу сховища.

Таким чином, сформовано аналітично-розрахунковий блок методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, який складається з процедур попередньої ідентифікації небезпечних чинників, формування ділянок контролю у зоні впливу сховища, розрахунку показника потенційної небезпеки, формування вектора параметрів ділянки, обчислення інтегрального показника пріоритетності, виділення множини першочергових ділянок контролю та побудови маршруту пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА. Результатом цього блоку є ранжований перелік ділянок першочергового контролю та маршрут їх первинного дистанційного обстеження.

4.4 Пошуково-вимірювальний блок методики: уточнення стану можливого радіоактивного забруднення

Пошуково-вимірювальний блок є другим функціональним блоком розробленої методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями. Його призначення полягає у переході від розрахунково визначених пріоритетних зон контролю до фактичних даних про стан конкретних ділянок. На цьому етапі результати аналітично-розрахункового блоку використовуються як основа для організації дистанційного, інструментального та лабораторного контролю.

Основна мета блоку полягає у виявленні радіаційної аномалії або зони можливого радіоактивного забруднення, апостеріорному уточненні положення небезпечної зони, підтвердженні або спростуванні результатів дистанційного обстеження та підготовці даних для вибору управлінських рішень і природоохоронних заходів.

Пошуково-вимірювальний блок має ітераційний характер. Якщо даних недостатньо або їхня достовірність не дозволяє прийняти рішення щодо стану ділянки, методика передбачає повторний прохід БпЛА, коригування маршруту або розширення зони обстеження. Якщо аномалію підтверджено, ділянка переходить до наземного підтвердження, лабораторного аналізу та подальшої класифікації рівня екологічної небезпеки.

4.4.1 Первинне дистанційне обстеження. Первинне дистанційне обстеження виконується для ділянок, включених до множини першочергового контролю R_1 . Його метою є отримання просторово прив'язаних даних про контрольовані радіаційні показники, виявлення локальних відхилень від фонового або контрольного рівня, а також визначення ділянок, для яких необхідне повторне обстеження, наземне підтвердження або лабораторний аналіз проб.

Перед початком обстеження уточнюються маршрут БпЛА, висота і швидкість польоту, частота реєстрації даних, ширина смуги огляду, кількість проходів, допустимий час виконання завдання та умови безпеки. Вихідними даними є множина R_1 , розрахована пріоритетність ділянок, очікувана ефективність виявлення, метеорологічні умови та технічні характеристики засобів дистанційного контролю.

Під час обстеження для кожної точки або ділянки фіксуються координати, час вимірювання, значення контрольованого показника, умови реєстрації та ознака якості даних. Після завершення польоту перевіряються повнота покриття, наявність пропусків, стабільність траєкторії, відповідність

фактичного маршруту запланованому та достатність даних для переходу до процедури виявлення аномалії.

Результатом первинного дистанційного обстеження є карта просторового розподілу контрольованих показників у межах пріоритетних ділянок, перелік локальних відхилень і перелік ділянок, де даних недостатньо. Ці результати не є остаточним висновком про забруднення, а слугують підставою для наступної процедури виявлення радіаційної аномалії або зони можливого радіоактивного забруднення.

4.4.2 Виявлення радіаційної аномалії або зони можливого радіоактивного забруднення. Виявлення радіаційної аномалії виконується шляхом зіставлення результатів дистанційного та інструментального контролю з фоновими, контрольними або нормативними рівнями. У межах методики аномалією вважається локальна або просторово впорядкована зміна показника, яка відрізняється від фонового стану і може бути пов'язана з аварійним впливом на сховище.

Ознаками можливої аномалії є перевищення контрольного рівня, стійке зростання показника в часі, групування суміжних точок із підвищеними значеннями, збіг відхилень із напрямом можливого перенесення, а також розташування підвищених показників у понижених ділянках рельєфу або в зонах накопичення поверхневого стоку.

Виявлена аномалія не ототожнюється з підтвердженим забрудненням. На цьому етапі визначається ділянка, яка потребує додаткового уточнення. Для таких ділянок формується множина R_Z , до якої включаються зони з перевищенням контрольного рівня, локальними відхиленнями, нестійкими даними або недостатнім покриттям за умови високої пріоритетності: $R_Z = \{z_k \in R_1 : X(k) > X_{кр} \vee Q(k) < Q_{min}\}$, де $X(k)$ – контрольований показник для ділянки k ; $X_{кр}$ – контрольне або порогове значення; $Q(k)$ – показник якості даних; Q_{min} – мінімально допустимий рівень достовірності

даних. Якщо ділянка належить до R_Z , вона передається до процедури апостеріорного уточнення та, за потреби, до наземного підтвердження.

4.4.3 Апостеріорне уточнення положення небезпечної зони.

Апостеріорне уточнення положення небезпечної зони виконується після отримання результатів дистанційного або інструментального обстеження. Його зміст полягає в оновленні початкової оцінки ймовірності належності зони можливого радіоактивного забруднення до окремих ділянок з урахуванням факту виявлення або невиявлення небезпечної зміни.

Якщо на ділянці за достатнього покриття аномалію не виявлено, апостеріорна ймовірність для цієї ділянки зменшується, а пошуково-вимірювальний ресурс може бути перерозподілений на інші ділянки. Якщо аномалію зафіксовано, ділянка переходить до режиму уточнення меж, а пріоритет суміжних ділянок переглядається з урахуванням можливих шляхів поширення забруднення.

Узагальнено оновлення оцінки для ділянки може бути подане як перехід від початкової оцінки до апостеріорної оцінки: $P_k(0) \rightarrow P_k(T)$, де $P_k(0)$ – початкова оцінка ймовірності належності небезпечної зони до ділянки k ; $P_k(T)$ – апостеріорна оцінка після виконання обстеження за час T . Оновлення враховує результат обстеження, якість даних і повноту покриття ділянки. Це пов'язує математичну модель моніторингу з практичними процедурами уточнення стану території.

Результатом процедури є оновлений розподіл імовірності, уточнена множина ділянок контролю, перелік зон для повторного дистанційного обстеження та перелік ділянок, які потребують наземного або лабораторного підтвердження. У такому вигляді апостеріорне уточнення виконує роль проміжної процедури між дистанційним контролем і вибором подальших дій (рис. 4.4).

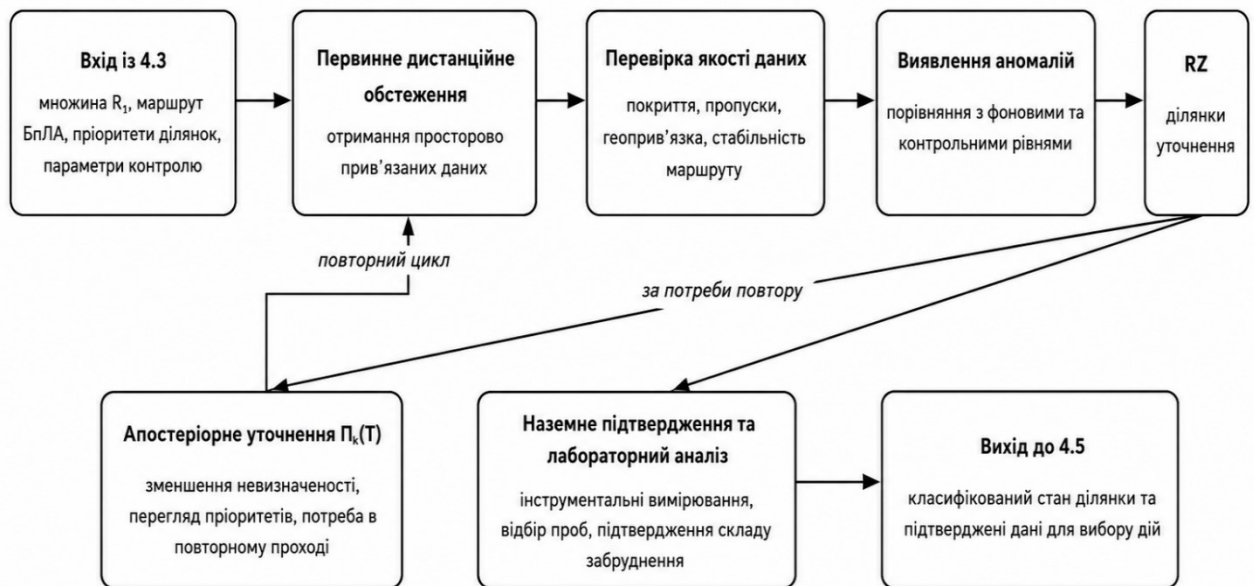


Рис. 4.4 Логіка пошуково-вимірального блоку методики уточнення стану можливого радіоактивного забруднення

4.4.4 Наземне підтвердження та лабораторний аналіз проб. Наземне підтвердження та лабораторний аналіз проб виконуються для ділянок, де дистанційне обстеження виявило ознаки радіаційної аномалії або де необхідно уточнити склад і характер можливого радіоактивного забруднення. Ця процедура застосовується лише за умови допустимого рівня безпеки для персоналу або після прийняття рішення про можливість короточасного контрольованого доступу до ділянки.

Наземне підтвердження передбачає інструментальні вимірювання потужності дози, контроль забруднення поверхонь, уточнення координат меж ділянки та перевірку результатів дистанційного обстеження. Лабораторний аналіз проб використовується для визначення радіонуклідного складу, оцінювання забруднення ґрунтового покриття, поверхневого стоку, змивів із технологічних покриттів або інших середовищ, що могли зазнати впливу.

Результати лабораторного аналізу мають бути прив'язані до конкретної ділянки контролю, часу відбору, типу середовища та результатів попереднього дистанційного обстеження. Це дає змогу підтвердити або спростувати

наявність забруднення, визначити його просторовий характер і підготувати достовірні дані для управлінського блоку методики.

Після підтвердження результатів ділянка класифікується як така, що не має ознак забруднення, має непідтверджену аномалію, має локальне забруднення або належить до зони екологічної небезпеки. Така класифікація є входом до процедури вибору контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів.

4.4.5 Блок-схема уточнення стану забруднення після отримання моніторингових даних. Блок-схема уточнення стану забруднення відображає послідовність переходу від результатів первинного дистанційного обстеження до підтвердження стану ділянки. Вона враховує достатність даних, наявність радіаційної аномалії, можливість безпечного наземного доступу та потребу в лабораторному підтвердженні.

За результатами блок-схеми формується один із варіантів подальших дій: зниження пріоритетності ділянки за відсутності ознак забруднення, повторне дистанційне обстеження через недостатність даних, уточнення меж аномалії за допомогою додаткового маршруту або підтвердження забруднення наземними і лабораторними методами з передачею даних до управлінського блоку методики.



Рис. 4.5 Блок-схема уточнення стану можливого радіоактивного забруднення після отримання моніторингових даних

Таким чином, сформовано пошуково-вимірювальний блок методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі

відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, який складається з процедур первинного дистанційного обстеження ділянок множини першочергового контролю, перевірки якості отриманих даних, виявлення радіаційної аномалії або зони можливого радіоактивного забруднення, формування множини ділянок уточнення, апостеріорного уточнення положення небезпечної зони, наземного підтвердження результатів дистанційного контролю та лабораторного аналізу проб. Результатом цього блоку є уточнені межі потенційно небезпечної зони, підтвержені або спростовані ділянки забруднення та дані для подальшої класифікації рівня екологічної безпеки.

4.5 Управлінський блок методики: вибір і перевірка природоохоронних заходів

Управлінський блок є завершальним функціональним блоком розробленої методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями. Його призначення полягає у переході від уточнених моніторингових даних і розрахункових показників до вибору конкретних контрольних, обмежувальних та природоохоронних заходів.

Вхідною інформацією для управлінського блоку є результати дистанційного обстеження, наземних вимірювань і лабораторного аналізу проб, а також показники $C(k)$, $N(k)$, $P_k(T)$, $H(k)$, $A(k)$ та $U_{\text{info}}(k)$, отримані або уточнені в попередніх процедурах методики. На їх основі визначається рівень екологічної безпеки ділянки, обирається тип дій і встановлюється порядок повторного контролю.

4.5.1 Класифікація стану ділянок за рівнем екологічної небезпеки. Класифікація стану ділянок є початковою процедурою управлінського блоку. Вона виконується після отримання результатів моніторингу та підтвердження або спростування ознак забруднення. Для кожної ділянки враховуються контрольований показник стану $C(k)$, інтегральний показник можливих екологічних наслідків $N(k)$, апостеріорна ймовірність належності небезпечної зони до ділянки $P_k(T)$, коефіцієнт покриття $H(k)$, рівень інформаційної невизначеності $U_{\text{info}}(k)$, доступність ділянки $A(k)$ та результати лабораторного аналізу проб.

У межах методики доцільно виділяти п'ять станів ділянки: прийнятний стан; стан, що потребує уточнення; ускладнений стан; небезпечний стан; стан, що потребує довгострокового спостереження.

Класифікація має циклічний характер. Після кожного повторного контролю стан ділянки може змінюватися залежно від нових вимірювань, уточнення меж радіоактивного забруднення, результатів лабораторного аналізу та ефективності виконаних заходів. Тому класифікація використовується як вихідна точка для вибору дій і як критерій перевірки їх результативності.

4.5.2 Вибір контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів. Вибір заходів здійснюється залежно від рівня екологічної небезпеки, домінуючого шляху поширення забруднення, доступності ділянки та достовірності отриманих даних. У межах методики дії поділяються на контрольні, обмежувальні, локалізаційні, природоохоронні та підтверджувальні.

Контрольні дії спрямовані на отримання, уточнення або підтвердження інформації про стан ділянки. До них належать повторний прохід БпЛА, збільшення щільності вимірювань, деталізоване картування, наземне

підтвердження результатів за умови безпеки персоналу та відбір проб ґрунту, води або інших середовищ.

Обмежувальні заходи застосовуються для недопущення перебування персоналу на небезпечних ділянках, зменшення ймовірності механічного перенесення забруднення та обмеження руху техніки. До таких заходів належать тимчасове зонування території, встановлення попереджувальних позначень, обмеження доступу до небезпечних зон, визначення безпечних маршрутів переміщення та заборона проведення робіт на ділянках із підвищеним рівнем безпеки без додаткового контролю.

Природоохоронні заходи спрямовані на зменшення ймовірності подальшого поширення небезпечних речовин у повітряному середовищі, ґрунтовому покриві, поверхневому стоці або водному середовищі. До них належать пилопригнічення забруднених поверхонь, тимчасове накриття або фіксація відкритих ділянок, локалізація забрудненого ґрунту, пилу, уламків чи відкладень, улаштування тимчасових земляних валів, сорбційних або фільтрувальних бар'єрів, недопущення потрапляння забрудненого матеріалу до дренажних елементів, лотків, понижених ділянок і водних об'єктів, а також дезактивація забруднених поверхонь, техніки або обладнання за потреби.

Якщо ділянка перебуває у прийнятному стані, додаткові природоохоронні заходи не застосовуються, а контроль здійснюється за плановою програмою. Якщо ділянка потребує уточнення, призначається повторний прохід БпЛА, збільшується щільність вимірювань або виконується наземне підтвердження за умови безпеки персоналу.

У разі ускладненого стану застосовуються тимчасове зонування, обмеження переміщення техніки, деталізоване картування, відбір проб і первинні природоохоронні заходи, спрямовані на недопущення вторинного перенесення забруднювачів. Для небезпечного стану передбачаються локалізація забруднених матеріалів, пилопригнічення, контроль поверхневого

стоку, обмеження доступу, ізоляція забруднених ділянок і дезактиваційні заходи за потреби.

Вибір заходів також залежить від домінуючого шляху поширення забруднення. Для атмосферного перенесення пріоритетними є контроль напрямку вітру, дистанційне картування, пилопригнічення, тимчасове накриття забруднених поверхонь і обмеження руху техніки, що може спричинити повторне пилове підняття. Для поверхневого стоку увага зосереджується на понижених ділянках, дренажних елементах, лотках і місцях можливого накопичення забрудненого матеріалу; у таких випадках застосовуються тимчасові бар'єри, локальне перекриття шляхів стоку та контроль місць накопичення води. Для ґрунтової або водної міграції необхідними є довгостроковий пробовідбір, контроль динаміки показників, ізоляція забруднених ділянок, недопущення перемішування забрудненого і незабрудненого ґрунту та періодичне уточнення меж зони впливу.



Рис. 4.6 Структура управлінського блоку методики вибору і перевірки природоохоронних заходів

4.5.3 Повторний контроль після виконання заходів. Повторний контроль є процедурою перевірки результативності виконаних контрольних, обмежувальних або природоохоронних заходів. Його мета полягає у встановленні, чи зменшився рівень екологічної небезпеки, чи стабілізувалися контрольовані показники, чи відсутнє подальше поширення забруднення та чи можна змінити режим контролю ділянки.

Процедура повторного контролю виконується після завершення первинних заходів або після встановленого інтервалу спостереження. Вона включає повторне дистанційне обстеження, порівняння результатів із попередніми даними, оцінювання динаміки показників, уточнення класифікації стану ділянки та прийняття рішення про завершення, продовження або посилення контрольних дій.

Якщо після повторного контролю показники не перевищують контрольних рівнів, просторове покриття ділянки є достатнім, а інформаційна невизначеність зменшена, ділянку можна перевести до режиму планового спостереження. Якщо відхилення зберігаються або положення забруднення залишається невизначеним, призначається новий цикл обстеження з уточненим маршрутом і збільшеною щільністю вимірювань. Якщо рівень небезпеки зростає, склад природоохоронних заходів коригується або посилюється.

4.5.4 Блок-схема прийняття управлінського рішення. Блок-схема прийняття управлінського рішення відображає перехід від отриманих моніторингових і розрахункових даних до вибору дії для конкретної ділянки. Вона застосовується після визначення пріоритетних зон, уточнення стану можливого радіоактивного забруднення та підтвердження результатів контролю.

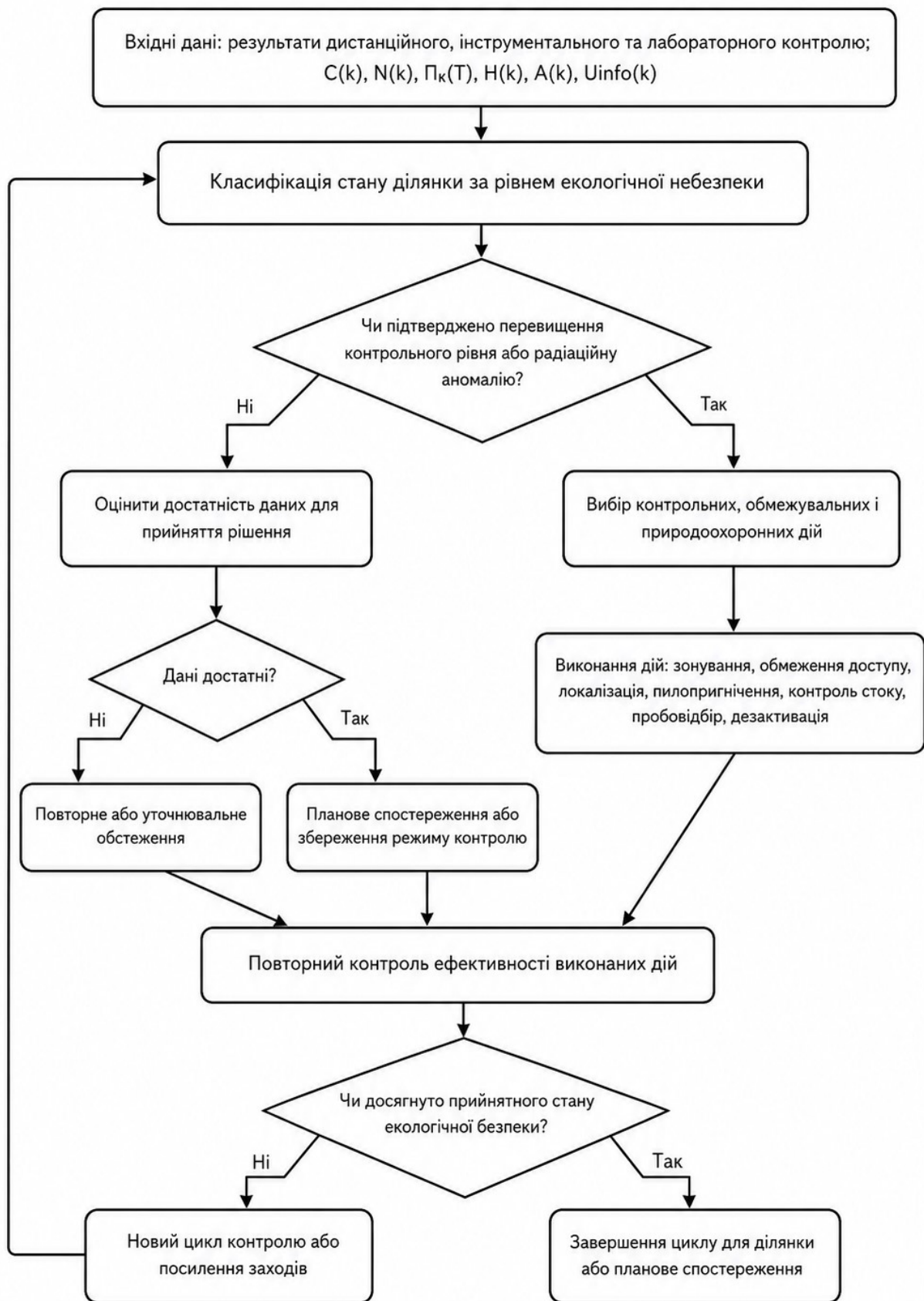


Рис. 4.7 Блок-схема прийняття управлінського рішення за результатами моніторингу та математичного моделювання

Управлінське рішення не приймається лише за одним показником. Для ділянки враховуються підтвердження небезпечної зміни, достатність даних, рівень екологічної небезпеки та результат повторного контролю. Якщо даних недостатньо, процедура повертається до уточнювального обстеження; якщо небезпеку підтверджено, обираються контрольні, обмежувальні або природоохоронні заходи. Якщо після виконання заходів досягнуто прийняттого стану, цикл управління для відповідної ділянки завершується або переводиться до режиму планового спостереження.

Таким чином, сформовано управлінський блок методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, який складається з процедур класифікації стану ділянок за рівнем екологічної небезпеки, вибору контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів, виконання заходів, повторного контролю їх результативності та прийняття рішення щодо подальшого режиму ділянки. До можливих рішень віднесено переведення ділянки до планового спостереження, призначення повторного або уточнювального обстеження, запуск нового циклу контролю, коригування маршруту БпЛА, локалізацію забруднення, пилопригнічення, контроль поверхневого стоку, пробовідбір, дезактивацію або посилення природоохоронних заходів.

4.6 Узагальнення розробленої методики управління екологічною безпекою

Розроблена методика призначена для умов аварії, спричиненої воєнними діями, коли інформація про стан сховища та прилеглої території є неповною, доступ до окремих ділянок може бути обмеженим, а рішення щодо контролю і захисту довкілля необхідно приймати в обмежений час. Методика полягає у

послідовному виконанні процедур виявлення, просторового ранжування, дистанційного обстеження, уточнення стану можливого радіоактивного забруднення, класифікації рівня екологічної небезпеки, вибору контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів та повторної перевірки їх результативності.

Зміст методики визначається поєднанням трьох функціональних блоків. Аналітично-розрахунковий блок забезпечує встановлення небезпечних чинників, формування ділянок контролю та визначення множини першочергового обстеження R_1 . Пошуково-вимірювальний блок забезпечує отримання фактичних даних за допомогою БПЛА, виявлення радіаційних аномалій, апостеріорне уточнення $P_k(T)$, наземне підтвердження і лабораторний аналіз проб. Управлінський блок забезпечує класифікацію стану ділянок, вибір заходів і повторний контроль їх результативності.

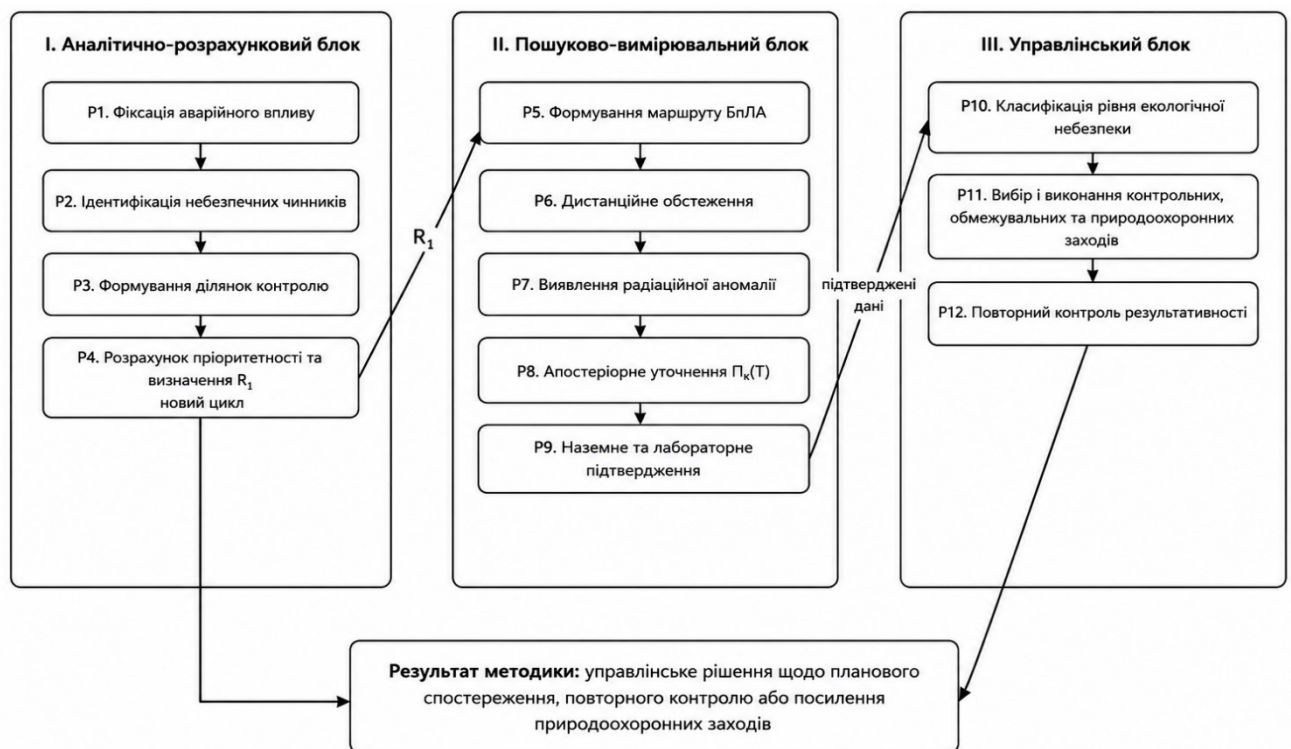


Рис. 4.8 Узагальнений алгоритм розробленої методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями

Послідовність процедур на рис. 4.8 відображає функціонування методики як єдиного управлінського циклу. На підготовчо-аналітичному етапі фіксується факт аварійного впливу, визначаються небезпечні чинники, виконується поділ зони впливу на ділянки контролю та розраховується їхня пріоритетність. Результатом цього етапу є множина ділянок першочергового обстеження R_1 , яка використовується для побудови маршруту пошуково-вимірювального контролю.

Пошуково-вимірювальний етап охоплює формування маршруту БпЛА, проведення дистанційного обстеження, виявлення радіаційної аномалії або зони можливого радіоактивного забруднення, апостеріорне уточнення $P_k(T)$, а також наземне і лабораторне підтвердження результатів. Саме цей етап забезпечує перехід від розрахункових припущень до фактичних даних про стан конкретних ділянок.

Управлінський етап передбачає класифікацію рівня екологічної небезпеки, вибір і виконання контрольних, обмежувальних та природоохоронних заходів, а також повторний контроль їх результативності. На цьому етапі результати моніторингу та математичного моделювання перетворюються на обґрунтоване управлінське рішення щодо подальшого режиму контролю і захисту компонентів довкілля.



Рис. 4.9 Блок-схема завершення циклу управління або переходу до нового циклу контролю

Після виконання контрольних, обмежувальних або природоохоронних заходів проводиться повторний контроль. Його результат визначає подальшу траєкторію методики. Якщо контрольовані показники стабілізуються, а інформаційна невизначеність зменшується до прийняттого рівня, відповідна ділянка переводиться до режиму планового спостереження. Якщо даних недостатньо або межі можливого радіоактивного забруднення залишаються неуточненими, методика передбачає повернення до етапу перерахунку пріоритетності та формування нового маршруту контролю. Якщо рівень екологічної безпеки зберігається, склад природоохоронних заходів коригується, після чого виконується новий цикл перевірки.

Таким чином, розроблено методику управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, яка побудована на поєднанні аналітично-розрахункового, пошуково-вимірювального та управлінського блоків і включає послідовний

цикл процедур від фіксації аварійного впливу, ідентифікації небезпечних чинників, формування та пріоритизації ділянок контролю, побудови маршруту БпЛА й дистанційного обстеження до апостеріорного уточнення небезпечної зони, наземного та лабораторного підтвердження, класифікації рівня екологічної безпеки, вибору природоохоронних заходів і повторного контролю їх результативності.

Висновки до розділу 4

1. Методика управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, ґрунтується на принципах компонентної орієнтації оцінювання стану навколишнього природного середовища, просторового ранжування території за рівнем потенційної безпеки, поєднання дистанційного, інструментального та лабораторного контролю, поетапного оновлення інформації після кожного циклу моніторингу, використання результатів математичного моделювання, урахування обмежень безпеки персоналу та відповідності природоохоронних заходів установленому рівню екологічної безпеки.

2. Визначено складові елементи та порядок реалізації методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями. Методика подана як послідовність трьох функціональних блоків: аналітично-розрахункового, пошуково-вимірювального та управлінського. Визначено, які вхідні дані використовуються на початку роботи методики, які розрахункові показники передаються між блоками, як результати аналітичного ранжування переходять у маршрут БпЛА, як дані дистанційного й наземного контролю переходять до класифікації стану ділянок та як за результатами моніторингу

приймається рішення про природоохоронні заходи або повторний цикл контролю. Зворотний зв'язок у методиці передбачає повторне уточнення даних, перерахунок пріоритетності ділянок, коригування маршруту БпЛА або зміну складу природоохоронних заходів за результатами кожного циклу моніторингу.

3. Сформовано аналітично-розрахунковий блок методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, який складається з процедур попередньої ідентифікації небезпечних чинників, формування ділянок контролю у зоні впливу сховища, розрахунку показника потенційної небезпеки, формування вектора параметрів ділянки, обчислення інтегрального показника пріоритетності, виділення множини першочергових ділянок контролю та побудови маршруту пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА. Результатом цього блоку є ранжований перелік ділянок першочергового контролю та маршрут їх первинного дистанційного обстеження.

4. Сформовано пошуково-вимірювальний блок методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, який складається з процедур первинного дистанційного обстеження ділянок множини першочергового контролю, перевірки якості отриманих даних, виявлення радіаційної аномалії або зони можливого радіоактивного забруднення, формування множини ділянок уточнення, апостеріорного уточнення положення небезпечної зони, наземного підтвердження результатів дистанційного контролю та лабораторного аналізу проб. Результатом цього блоку є уточнені межі потенційно небезпечної зони, підтвержені або спростовані ділянки забруднення та дані для подальшої класифікації рівня екологічної небезпеки.

5. Сформовано управлінський блок методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива,

спричиненої воєнними діями, який складається з процедур класифікації стану ділянок за рівнем екологічної небезпеки, вибору контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів, виконання заходів, повторного контролю їх результативності та прийняття рішення щодо подальшого режиму ділянки. До можливих рішень віднесено переведення ділянки до планового спостереження, призначення повторного або уточнювального обстеження, запуск нового циклу контролю, коригування маршруту БпЛА, локалізацію забруднення, пилопригнічення, контроль поверхневого стоку, пробовідбір, дезактивацію або посилення природоохоронних заходів.

6. Розроблено методикку управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, яка побудована на поєднанні аналітично-розрахункового, пошуково-вимірювального та управлінського блоків і включає послідовний цикл процедур: від фіксації аварійного впливу, ідентифікації небезпечних чинників, формування ділянок контролю, розрахунку їхньої пріоритетності та визначення множини першочергового обстеження до побудови маршруту БпЛА, проведення дистанційного контролю, виявлення радіаційної аномалії або зони можливого радіоактивного забруднення, апостеріорного уточнення положення небезпечної зони, наземного й лабораторного підтвердження, класифікації рівня екологічної небезпеки, вибору контрольних, обмежувальних і природоохоронних заходів та повторного контролю їх результативності з можливістю повернення до перерахунку пріоритетності, коригування маршруту обстеження або зміни складу природоохоронних заходів.

РОЗДІЛ 5 ПЕРЕВІРКА ДОСТОВІРНОСТІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИКИ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНОЮ БЕЗПЕКОЮ У РАЗІ АВАРІЇ НА СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ

Рішення п'ятої наукової задачі дисертаційного дослідження щодо перевірки достовірності математичної моделі моніторингу та методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями, здійснено за такими напрямками. Спочатку сформульовано постановку задачі перевірки достовірності математичної моделі та методики. Далі визначено показники, за якими оцінюється результативність моделювання, моніторингу та управлінських рішень. Після цього сформовано розрахункові сценарії аварійного впливу на сухе сховище ВЯП. Окремо перевірено ефективність визначення пріоритетних зон контролю та результативність пошуково-вимірального контролю із застосуванням БпЛА. Завершальним етапом перевірено обґрунтованість вибору управлінських рішень і природоохоронних заходів за результатами моніторингу та математичного моделювання.

5.1 Постановка задачі перевірки достовірності математичної моделі та методики управління екологічною безпекою

Перевірка достовірності математичної моделі моніторингу та методики управління екологічною безпекою виконується для встановлення їхньої придатності до використання в умовах аварії, спричиненої воєнними діями. Сутність перевірки полягає в оцінюванні узгодженості роботи розрахункових та процедурних складових під час визначення пріоритетних зон контролю, уточнення стану можливого радіоактивного забруднення та вибору управлінських рішень і природоохоронних заходів.

Об'єктом перевірки є послідовність переходу від вихідних даних про аварійний вплив до результату управління екологічною безпекою. У межах цієї послідовності оцінюється, чи зберігається логічний зв'язок між даними про небезпечні чинники, результатами математичного моделювання, результатами моніторингу та прийнятими управлінськими рішеннями.

Вихідними даними для перевірки є параметри аварійного впливу, характеристики ділянок контролю, значення показників потенційної небезпеки, доступності та інформаційної невизначеності, прогнозовані напрями поширення забруднення, технічні характеристики БпЛА, результати дистанційного та наземного контролю, а також дані лабораторного аналізу проб.

Постановка задачі перевірки передбачає порівняння результатів, отриманих за запропонованою моделлю і методикою, з очікуваними результатами розрахункових сценаріїв. Для цього необхідно встановити, чи потрапляють ділянки з підвищеною потенційною небезпекою до множини першочергового контролю, чи забезпечує маршрут БпЛА достатнє покриття таких ділянок, чи зменшується невизначеність після обстеження, чи уточнюються межі можливого радіоактивного забруднення та чи відповідають вибрані дії характеру встановленої екологічної небезпеки.

Задача перевірки математичної моделі полягає у встановленні того, наскільки розрахункові результати відображають зміну стану ділянок контролю в умовах аварійного впливу. При цьому увага зосереджується на правильності віднесення ділянок до першочергових зон контролю, достатності розподілу пошуково-вимірювального ресурсу та можливості уточнення положення небезпечної зони після отримання нових даних.

Задача перевірки методики полягає у встановленні того, чи перетворюються результати моделювання й моніторингу на обґрунтовані управлінські рішення. Для цього аналізується відповідність між рівнем екологічної небезпеки ділянки та обраним режимом дій: плановим

спостереженням, повторним або уточнювальним обстеженням, локалізацією забруднення, пилопригніченням, контролем поверхневого стоку, пробовідбором, дезактивацією або посиленням природоохоронних заходів.

Перевірку доцільно виконувати за трьома напрямками. Перший напрям пов'язаний з оцінюванням ефективності визначення пріоритетних зон контролю. Другий напрям стосується перевірки результативності пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА. Третій напрям спрямований на оцінювання обґрунтованості вибору управлінських рішень і природоохоронних заходів за результатами моніторингу та математичного моделювання.

Таким чином, постановка задачі перевірки достовірності полягає у встановленні працездатності математичної моделі та методики як єдиного інструменту переходу від вихідних даних про аварійний вплив до визначення пріоритетних зон контролю, уточнення стану можливого радіоактивного забруднення, вибору природоохоронних заходів і повторної перевірки їх результативності.

5.2 Показники оцінювання достовірності та результативності

Перевірка достовірності математичної моделі моніторингу та результативності методики управління екологічною безпекою має виконуватися за системою показників, які характеризують окремі етапи їх застосування. Такі показники відображають коректність переходу від вихідних даних і результатів математичного моделювання до визначення пріоритетних зон контролю, проведення пошуково-вимірювального обстеження та вибору управлінських рішень і природоохоронних заходів.

У межах дослідження показники оцінювання поділено на три групи: показники достовірності аналітично-розрахункового блоку, показники

результативності пошуково-вимірювального контролю та показники обґрунтованості управлінських і природоохоронних заходів. Такий поділ відповідає структурі розробленої методики та дає змогу перевірити її не загальною, а за окремими функціональними складовими.

До першої групи належать показники, що характеризують правильність визначення пріоритетних зон контролю. Основним є відповідність між розрахованою пріоритетністю ділянок і заданим у сценарії рівнем потенційної небезпеки. Якщо ділянки з підвищеним рівнем небезпеки потрапляють до множини першочергового контролю, аналітично-розрахунковий блок вважається таким, що працює коректно. З метою формалізації оцінювання результативності запропонованої методики у роботі введено систему розрахунково-оцінювальних показників, побудованих на основі відношення фактичного або досягнутого результату до початкового, граничного чи необхідного значення відповідного параметра. Такі показники мають безрозмірний характер і використовуються для порівняння різних ділянок контролю, сценаріїв розвитку аварійної ситуації та результатів виконання пошуково-вимірювальних, управлінських і природоохоронних заходів.

Для кількісного оцінювання цього етапу використано показник охоплення небезпечних ділянок множиною першочергового контролю:

$$K_{R1} = \frac{n_d(R_1)}{n_d}, \quad (5.1)$$

де K_{R1} – коефіцієнт охоплення небезпечних ділянок множиною першочергового контролю; $n_d(R_1)$ – кількість небезпечних ділянок, які потрапили до множини R_1 ; n_d – загальна кількість небезпечних ділянок у межах розрахункового сценарію.

Значення K_{R1} , близьке до 1, свідчить про те, що модель правильно виділяє ділянки, які потребують першочергового обстеження. Низьке

значення цього показника означає, що розрахунок пріоритетності потребує уточнення вагових коефіцієнтів або критеріїв відбору ділянок.

Окремо оцінюється результативність ранжування ділянок. Для цього порівнюється частка виявлених небезпечних ділянок за пріоритетного контролю з результатом умовного рівномірного обстеження. Такий підхід дає змогу встановити, чи забезпечує запропонована модель перевагу саме за рахунок пріоритетного розподілу пошуково-вимірювального ресурсу.

До другої групи належать показники, що характеризують якість пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БПЛА. Основними є імовірність виявлення радіаційної аномалії, коефіцієнт покриття ділянки, щільність вимірювань, достатність просторової деталізації та зменшення інформаційної невизначеності після обстеження.

Коефіцієнт покриття ділянки дистанційним обстеженням визначається як відношення фактично обстеженої площі до площі ділянки, що потребує контролю:

$$K_{cov}(k) = \frac{S_{obs}(k)}{S(k)}, \quad (5.2)$$

де $K_{cov}(k)$ – коефіцієнт покриття k -ї ділянки; $S_{obs}(k)$ – площа, фактично охоплена дистанційним обстеженням; $S(k)$ – площа k -ї ділянки контролю.

Якщо $K_{cov}(k)$ наближається до 1, ділянка вважається достатньо охопленою дистанційним контролем. Якщо значення показника є меншим за прийнятий мінімальний рівень, ділянка має бути включена до повторного або уточнювального маршруту обстеження.

Для оцінювання зменшення інформаційної невизначеності після виконання пошуково-вимірювального контролю використано показник:

$$K_U(k) = \frac{U_{info}^0(k) - U_{info}^T(k)}{U_{info}^0(k)}, \quad (5.3)$$

де $K_U(k)$ – коефіцієнт зменшення інформаційної невизначеності для k -ї ділянки; $U_{info}^0(k)$ – початковий рівень інформаційної невизначеності; $U_{info}^T(k)$ – рівень інформаційної невизначеності після виконання обстеження.

Зростання $K_U(k)$ характеризує підвищення інформативності контролю. Якщо після обстеження невизначеність залишається високою, необхідне повторне дистанційне обстеження, наземне підтвердження або лабораторний аналіз проб.

До третьої групи належать показники, що характеризують обґрунтованість вибору управлінських рішень і природоохоронних заходів. Вони мають показати, чи відповідають обрані заходи встановленому рівню екологічної безпеки та чи зменшується небезпечний стан після їх виконання. До таких показників належать зміна інтегрального показника екологічної безпеки, кількість ділянок, переведених до нижчого рівня безпеки, результативність повторного контролю та відповідність обраного рішення класу стану ділянки.

Зміна рівня екологічної безпеки після виконання заходів може бути подана як:

$$K_E(k) = \frac{E_0(k) - E_1(k)}{E_0(k)}, \quad (5.4)$$

де $K_E(k)$ – коефіцієнт зниження рівня екологічної безпеки на k -й ділянці; $E_0(k)$ – показник екологічної безпеки до виконання заходів; $E_1(k)$ – показник екологічної безпеки після виконання заходів і повторного контролю.

Додатне значення $K_E(k)$ характеризує зменшення рівня безпеки. Якщо значення є близьким до нуля або від'ємним, прийняті заходи не дали очікуваного результату, а ділянка має бути повернута до нового циклу контролю або до посилення природоохоронних заходів.

Узагальнена система показників перевірки наведена в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Показники оцінювання достовірності математичної моделі та результативності методики

Група показників	Показник	Що оцінює
Достовірність визначення пріоритетних зон	Коефіцієнт охоплення небезпечних ділянок K_{R1}	Частку небезпечних ділянок, включених до множини R_1
	Розподіл інтегрального показника пріоритетності $P(k)$	Відмінність між ділянками за рівнем першочерговості контролю
	Частка виявлених небезпечних ділянок	Результативність пріоритетного контролю порівняно з рівномірним
Результативність пошуково-вимірювального контролю	Імовірність виявлення радіаційної аномалії	Здатність БПЛА-контролю зафіксувати небезпечну зміну
	Коефіцієнт покриття ділянки $K_{cov}(k)$	Повноту дистанційного охоплення ділянки
	Коефіцієнт зменшення інформаційної невизначеності $K_U(k)$	Наскільки обстеження уточнює стан ділянки
	Просторовий крок вимірювань	Деталізацію радіаційного картування
Обґрунтованість управлінських рішень	Коефіцієнт зниження екологічної безпеки $K_E(k)$	Зміну стану ділянки після виконання заходів
	Відповідність дії рівню безпеки	Чи правильно обрано контрольні, обмежувальні або природоохоронні заходи
	Результат повторного контролю	Чи досягнуто прийнятного стану або потрібен новий цикл

Таким чином, система показників оцінювання достовірності та результативності охоплює три групи: показники визначення пріоритетних зон контролю, показники пошуково-вимірального контролю із застосуванням БПЛА та показники обґрунтованості управлінських і природоохоронних заходів. Такий поділ дає змогу окремо перевірити коректність аналітичного ранжування ділянок, достатність дистанційного обстеження, зменшення інформаційної невизначеності та результативність прийнятих рішень після повторного контролю.

5.3 Формування розрахункових сценаріїв аварійного впливу на сухе сховище відпрацьованого ядерного палива

Для перевірки достовірності математичної моделі та результативності методики управління екологічною безпекою необхідно сформувавши розрахункові сценарії аварійного впливу на сухе сховище ВЯП. Такі сценарії задають типові умови, за яких модель і методика мають бути перевірені на здатність визначати пріоритетні ділянки контролю, уточнювати стан можливого радіоактивного забруднення та формувати подальші управлінські рішення і природоохоронні заходи.

Розрахунковий сценарій у межах цього дослідження розглядається як умовно задана аварійна ситуація, що характеризується видом аварійного впливу, імовірним місцем виникнення небезпечної зміни, домінуючим шляхом поширення забруднення, доступністю ділянок для контролю, рівнем первинної інформаційної невизначеності та потребою у застосуванні дистанційного обстеження. Сценарії не замінюють реальну аварійну оцінку, але дають змогу перевірити логіку роботи розробленої математичної моделі та методики в різних умовах.

Доцільно розглянути чотири розрахункові сценарії, які відрізняються характером аварійного впливу та умовами проведення моніторингу (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 Розрахункові сценарії перевірки математичної моделі та методики управління екологічною безпекою

Номер сценарію	Характер аварійного впливу	Домінуючий шлях можливого поширення	Умови доступу до території	Призначення сценарію для перевірки
Сценарій 1	Локальне механічне пошкодження окремої ділянки сховища	Локальне поверхневе забруднення без значного поширення	Доступ частково збережений	Перевірка здатності моделі виділяти локальну пріоритетну ділянку контролю
Сценарій 2	Пошкодження з утворенням радіоактивного пилу або аерозолів	Атмосферне перенесення та осадження частинок	Доступ до зони пошкодження обмежений	Перевірка визначення пріоритетних ділянок за напрямом можливого перенесення
Сценарій 3	Забруднення технологічних покриттів після аварійного впливу	Поверхневий стік і накопичення в понижених ділянках	Доступ можливий після первинного дистанційного огляду	Перевірка врахування рельєфу, напрямів стоку та потреби в повторному контролі
Сценарій 4	Аварійний вплив за умов невизначеного місця пошкодження	Комбіноване поширення з переважанням невизначеності даних	Частина території недоступна для персоналу	Перевірка ролі БпЛА у зменшенні інформаційної невизначеності та уточненні зони контролю

Для кожного сценарію задається початкова сукупність ділянок контролю, серед яких частина має підвищену потенційну небезпеку, частина характеризується обмеженим доступом, а частина має недостатній обсяг первинних даних.

В таблиці 5.3 наведено використання розрахункових сценаріїв у подальшій перевірці моделі та методики.

Таблиця 5.3 – Використання розрахункових сценаріїв у подальшій перевірці моделі та методики

Номер сценарію	Перевіряється		
Сценарій 1	Правильність виділення локальної пріоритетної ділянки	Достатність обстеження локальної зони	Вибір режиму контролю або локальних заходів
Сценарій 2	Урахування наряду можливого атмосферного перенесення	Виявлення аномалії за маршрутом БПЛА	Вибір заходів щодо обмеження поширення пилу або аерозолів
Сценарій 3	Визначення ділянок можливого накопичення забруднення	Уточнення зон поверхневого стоку та місць відбору проб	Вибір заходів контролю стоку, локалізації або пробовідбору
Сценарій 4	Виділення пріоритетів за умов неповних даних	Зменшення інформаційної невизначеності після дистанційного контролю	Прийняття рішення щодо повторного циклу або посилення заходів

Таким чином, розрахунковими сценаріями аварійного впливу на сухе сховище відпрацьованого ядерного палива обрано: локальне механічне пошкодження окремої ділянки сховища; пошкодження з утворенням радіоактивного пилу або аерозолів; забруднення технологічних покриттів із подальшим перенесенням поверхневим стоком; аварійний вплив за умов невизначеного місця пошкодження та обмеженого доступу до частини території.

5.4 Оцінювання ефективності визначення пріоритетних зон контролю

Оцінювання ефективності визначення пріоритетних зон контролю виконується для перевірки аналітично-розрахункового блоку математичної моделі та методики управління екологічною безпекою. На цьому етапі встановлюється, наскільки коректно модель ранжує ділянки зони впливу сухого сховища ВЯП та чи включаються ділянки з підвищеним рівнем потенційної небезпеки до множини першочергового контролю.

У цьому підрозділі розрахункові сценарії, сформовані у підрозділі 5.3, застосовуються для перевірки задачі ранжування території. Основна увага приділяється зіставленню розрахованої пріоритетності ділянок із заданими умовами сценарію: рівнем потенційної небезпеки, доступністю, інформаційною невизначеністю та можливими шляхами поширення забруднення.

Для перевірки використовується множина ділянок контролю $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$, для кожної з яких обчислюється інтегральний показник пріоритетності $P(k)$. Ділянки ранжуються за спаданням значення $P(k)$, а до множини першочергового контролю R_1 включаються ділянки, що

перевищують задане порогове значення або належать до групи з найбільшими значеннями пріоритетності.

Логіка перевірки передбачає послідовне виконання таких дій: задання множини ділянок контролю для кожного сценарію; визначення складових, що впливають на пріоритетність; обчислення інтегрального показника пріоритетності; формування ранжованого переліку ділянок; виділення множини першочергового контролю та перевірку включення до неї ділянок із підвищеним рівнем потенційної небезпеки.

Кількісне оцінювання здійснюється за коефіцієнтом охоплення небезпечних ділянок множиною першочергового контролю K_{R1} , визначеним у підрозділі 5.2. Додатково порівнюється частка території, яку потрібно обстежити для виявлення основної частини небезпечних ділянок, що дає змогу зіставити пріоритетний підхід із рівномірним контролем.

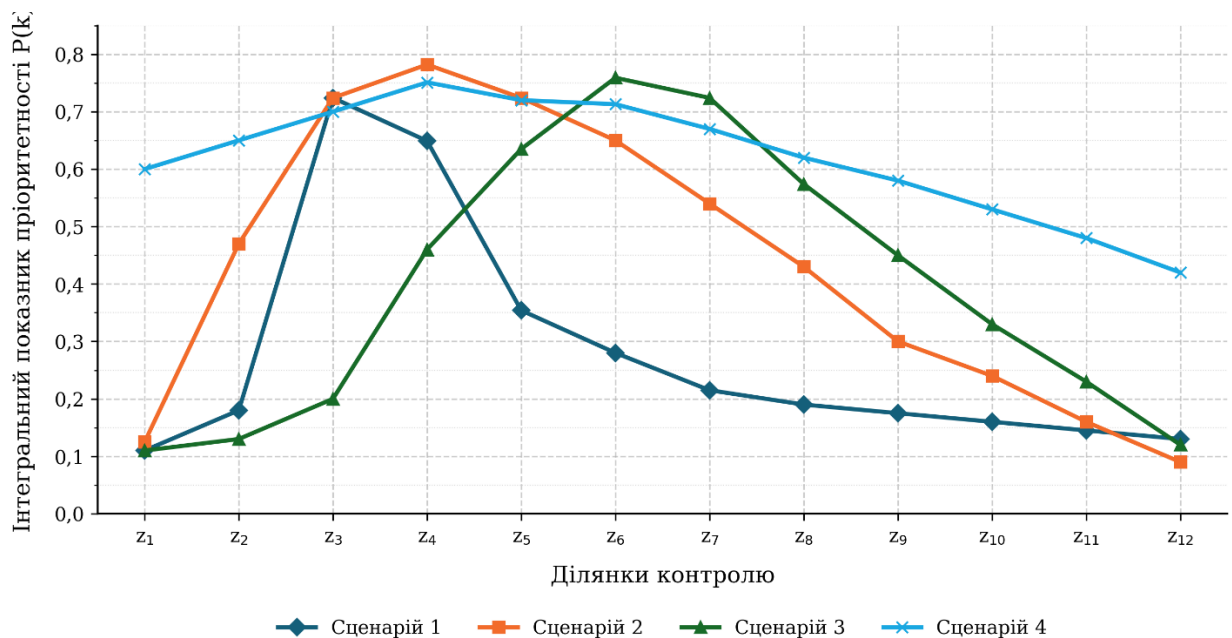


Рис. 5.1 Розподіл інтегрального показника пріоритетності ділянок контролю

На рисунку 5.1 наведено розподіл інтегрального показника пріоритетності $P(k)$ для 12 ділянок контролю за чотирма розрахунковими

сценаріями. У сценарії 1 найбільші значення отримано для ділянок z_3 та z_4 : відповідно 0,724 і 0,649; ділянка z_5 із $P(k) = 0,354$ може розглядатися як додаткова зона уточнення. У сценарії 2 групу першочергового контролю формують ділянки z_4, z_3, z_5, z_6 та z_7 , для яких $P(k)$ змінюється від 0,782 до 0,540. У сценарії 3 максимальні значення припадають на ділянки z_6, z_7, z_5 та z_8 у діапазоні від 0,759 до 0,574. У сценарії 4 найбільші значення мають ділянки z_4, z_5, z_6, z_3, z_7 та z_2 , де $P(k)$ становить від 0,751 до 0,650.

Такий розподіл відповідає логіці розрахункових сценаріїв: для локального пошкодження виділяються дві суміжні ділянки, для атмосферного перенесення пріоритетна зона розширюється у напрямі можливого перенесення, для поверхневого стоку максимум зміщується до ділянок можливого накопичення, а за умов невизначеного місця пошкодження і обмеженого доступу множина першочергового контролю охоплює більшу кількість ділянок.

За результатами узагальнення для сценаріїв 1–3 коефіцієнт K_{R_1} дорівнює 1,00, тобто всі ділянки з підвищеною потенційною небезпекою включаються до множини R_1 . Для сценарію 4 значення K_{R_1} становить 0,80 через невизначеність місця пошкодження та обмежений доступ до частини території; тому такий сценарій потребує подальшого уточнення даних за результатами дистанційного обстеження із застосуванням БпЛА.

На рисунку 5.2 подано порівняння пріоритетного та рівномірного контролю за часткою виявлених небезпечних ділянок. За обстеження 20 % території пріоритетний контроль забезпечує виявлення 45 % небезпечних ділянок, тоді як рівномірний контроль – 20 %, тобто різниця становить 25 відсоткових пунктів. За обстеження 40 % території отримано 70 % проти 40 %, а за обстеження 60 % території отримано 90 % проти 60 %, тобто перевага пріоритетного підходу в обох випадках становить 30 відсоткових пунктів. За обстеження 80 % території пріоритетний контроль досягає 100 %, тоді як

рівномірний контроль – 80 %. Однаковий результат для двох підходів отримується лише після обстеження всієї території.

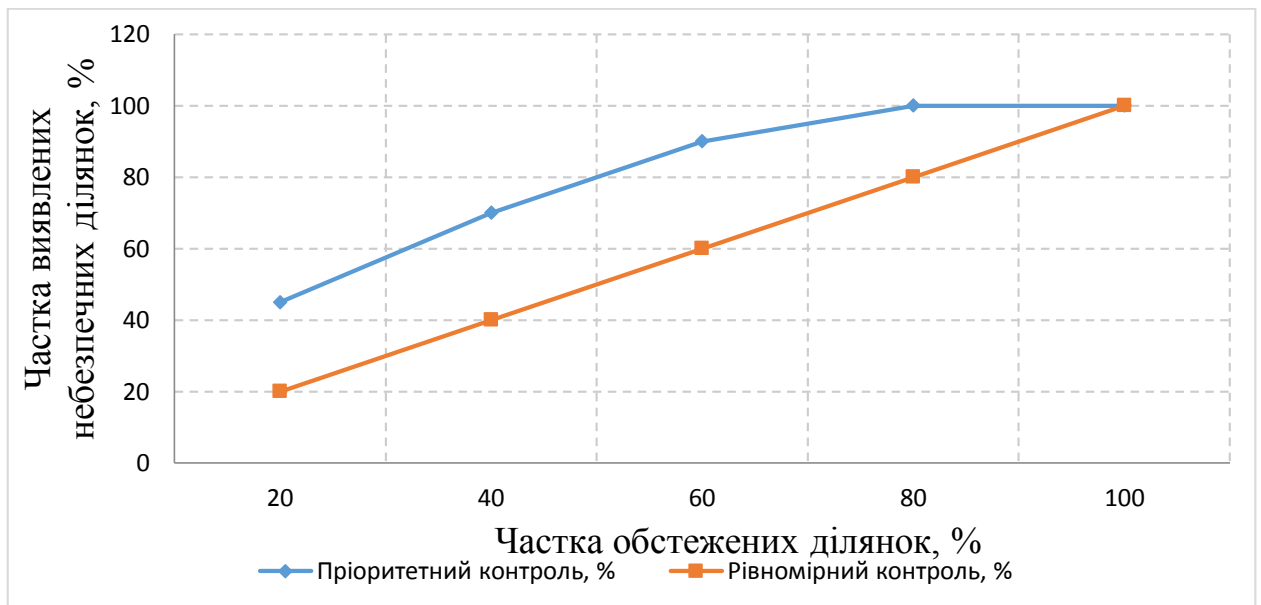


Рис. 5.2 Порівняння частки виявлених небезпечних ділянок за пріоритетного та рівномірного контролю

Отримані значення (рис. 5.2) демонструють практичну перевагу попереднього ранжування ділянок за показником $P(k)$: уже за обстеження 60 % території пріоритетний підхід виявляє 90 % небезпечних ділянок, тоді як рівномірний контроль за такого самого обсягу охоплення виявляє лише 60 %. Це є важливим, коли час, доступність території та ресурс обстеження обмежені.

На рисунку 5.3 показано, як змінюється кількість виявлених небезпечних ділянок залежно від частки обстежених пріоритетних зон. У сценарії 1 із двох небезпечних ділянок після обстеження 20 % пріоритетних зон виявляється одна ділянка, а після 40 % – обидві. У сценарії 2 із чотирьох небезпечних ділянок після 20 % обстеження виявляються дві, після 40 % – три, а після 60 % – усі чотири. У сценарії 3 із трьох небезпечних ділянок після 20 % обстеження виявляється одна, після 40 % – дві, після 60 % – усі три. У сценарії

4 повне виявлення чотирьох небезпечних ділянок досягається лише після обстеження 80 % пріоритетних зон.

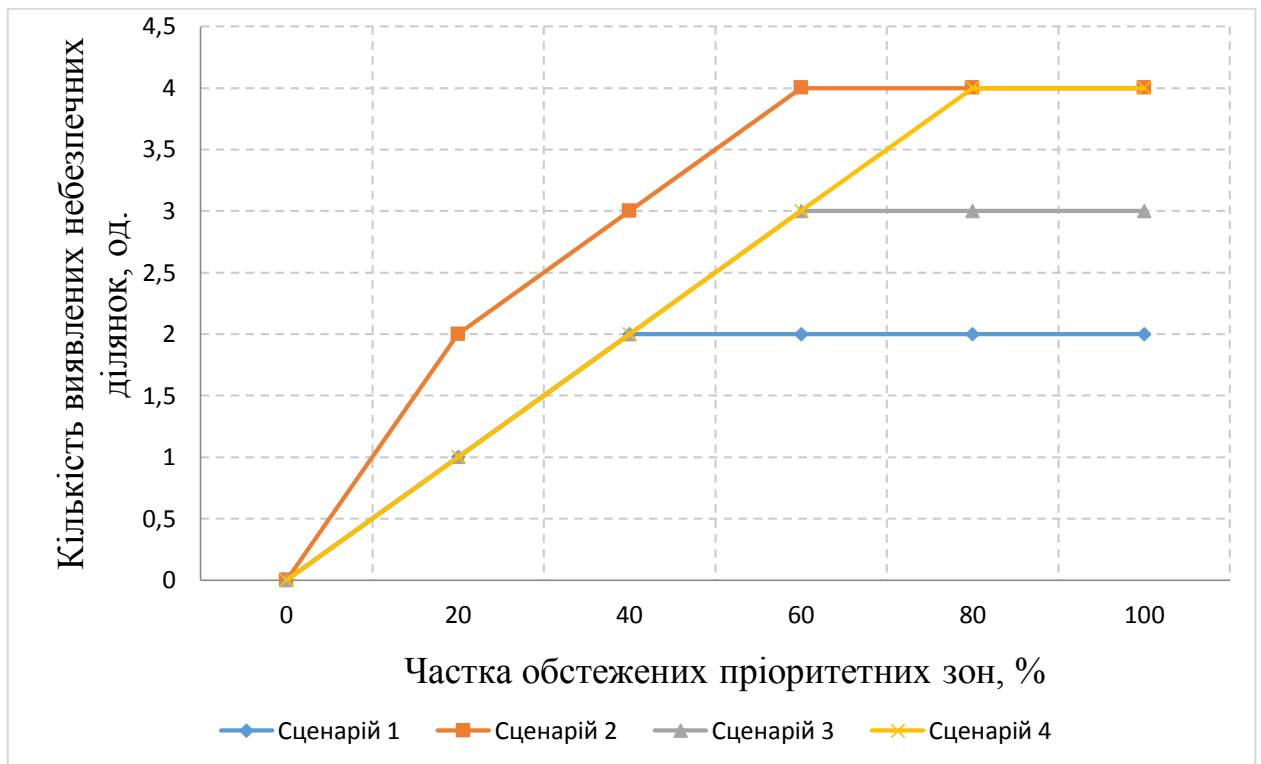


Рис. 5.3 Залежність кількості виявлених небезпечних ділянок від частки обстежених пріоритетних зон

Найбільший приріст результативності припадає на перші 40–60 % обстежених пріоритетних зон. Для сценаріїв 1–3 цього обсягу достатньо для повного або майже повного виявлення небезпечних ділянок. Сценарій 4 потребує ширшого охоплення, оскільки невизначеність місця пошкодження та обмеження доступу розширюють множину ділянок, які мають бути перевірені у першому циклі або під час повторного дистанційного контролю.

Таким чином, за результатами оцінювання встановлено, що аналітично-розрахунковий блок методики забезпечує виділення ділянок першочергового контролю відповідно до заданих розрахункових сценаріїв. У трьох сценаріях коефіцієнт охоплення небезпечних ділянок становить 1,00, тобто всі ділянки з підвищеною потенційною небезпекою віднесено до першочергового

контролю. У сценарії з невизначеним місцем пошкодження та обмеженим доступом цей показник становить 0,80, що вказує на потребу подальшого уточнення даних за результатами дистанційного обстеження. Порівняння пріоритетного та рівномірного контролю показало, що пріоритетний підхід дає змогу виявити основну частину небезпечних ділянок уже після обстеження 40–60 % території, тоді як за рівномірного контролю для досягнення такого результату потрібне ширше охоплення. Повне виявлення небезпечних ділянок за пріоритетного підходу досягається після обстеження 80 % території, що обґрунтовує його використання для подальшого формування маршруту пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА.

5.5 Перевірка результативності пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА

Пошуково-вимірювальний контроль із застосуванням БпЛА у запропонованій методиці розглядається як етап практичного уточнення пріоритетних ділянок, визначених за результатами попереднього аналізу. Його результативність доцільно оцінювати не за фактом виконання польоту, а за достатністю отриманих просторово прив'язаних даних для подальшого наземного підтвердження, лабораторного аналізу проб або переходу до управлінського блоку методики.

На результативність дистанційного обстеження впливають тривалість польоту, швидкість і висота руху БпЛА, ширина смуги огляду, кількість проходів, щільність вимірювань, якість геоприв'язки та здатність сенсорної системи фіксувати локальні відхилення від фонового рівня. Для кількісної перевірки використовуються чотири взаємопов'язані показники: імовірність виявлення радіаційної аномалії $P_{\text{виявл}}$, коефіцієнт покриття ділянки $K_{\text{покр}}(k)$, залишкова інформаційна невизначеність $U_{\text{info}}^T(k)$ та просторовий крок вимірювань Δs .

Ділянка вважається достатньо обстеженою, якщо одночасно виконуються такі умови: імовірність виявлення не нижча за прийнятий критерій, фактичне покриття маршрутом є достатнім, залишкова невизначеність не перевищує допустимого рівня, а просторовий крок вимірювань відповідає очікуваному розміру локальної аномалії: $P_{\text{виявл}} \geq P_{\text{кр}}$; $K_{\text{покр}}(k) \geq K_{\text{кр}}$; $U_{\text{info}}^T(k) \leq U_{\text{кр}}$; $\Delta s \leq \Delta s_{\text{доп}}$, де $P_{\text{кр}}$ – мінімально допустима імовірність виявлення; $K_{\text{кр}}$ – мінімально допустимий коефіцієнт покриття; $U_{\text{кр}}$ – граничне значення залишкової інформаційної невизначеності; $\Delta s_{\text{доп}}$ – допустимий просторовий крок між послідовними точками реєстрації даних.

Першим елементом перевірки є оцінювання залежності імовірності виявлення радіаційної аномалії від пошуково-вимірювального ресурсу. У цьому підрозділі під таким ресурсом розуміється поєднання тривалості обстеження пріоритетної ділянки, кількості проходів БпЛА та щільності вимірювань у межах маршруту. Зі збільшенням ресурсу імовірність виявлення зростає, однак після досягнення певного рівня додатковий приріст стає менш вираженим.

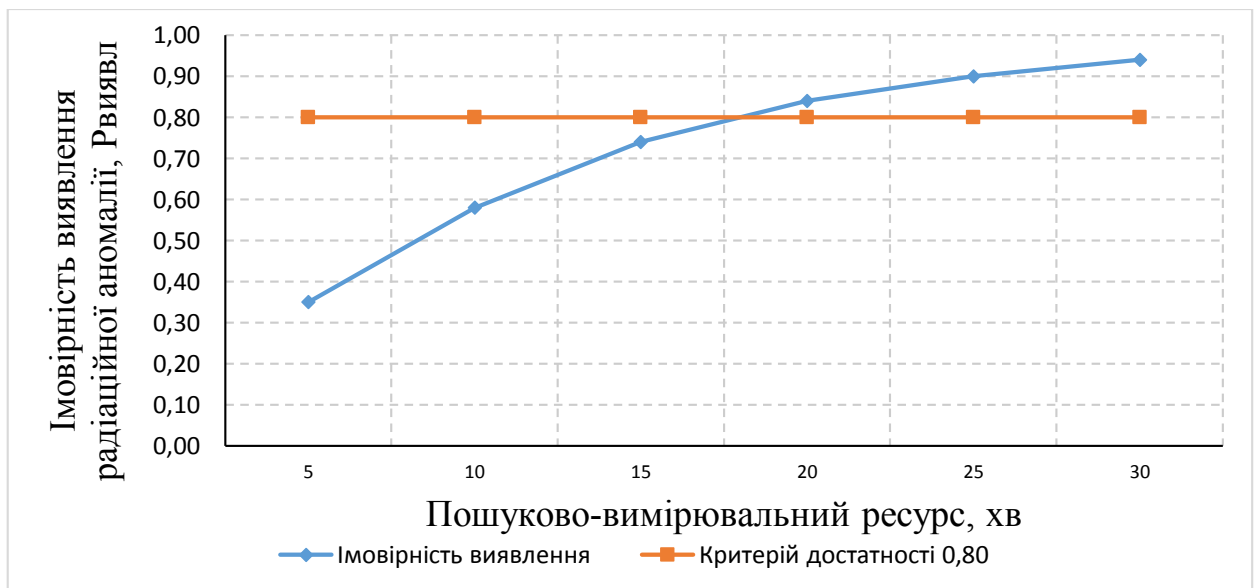


Рис. 5.4 Залежність імовірності виявлення радіаційної аномалії від пошуково-вимірювального ресурсу

На рисунку 5.4 показано, що зі збільшенням тривалості обстеження з 5 до 30 хв значення $P_{\text{виявл}}$ зростає від 0,35 до 0,94. Найбільший приріст спостерігається на початковому етапі: за 10 хв показник становить 0,58, а за 15 хв – 0,74. Критерій достатності 0,80 досягається приблизно після 20 хв обстеження, коли $P_{\text{виявл}}$ дорівнює 0,84. Подальше збільшення часу до 25–30 хв підвищує показник лише до 0,90–0,94, що свідчить про зменшення ефективності додаткового пошуково-вимірального ресурсу.

Отже, для наведеного розрахункового прикладу тривалість 20 хв може бути прийнята як орієнтовно мінімальна для первинного обстеження пріоритетної ділянки. Після досягнення цього рівня додатковий ресурс доцільно спрямовувати на уточнення меж аномалії, повторний прохід проблемної зони або контроль інших ділянок першочергового обстеження.

Другим елементом перевірки є оцінювання повноти охоплення ділянки дистанційним маршрутом. Коефіцієнт покриття $K_{\text{покp}}(k)$ відображає частку площі, фактично охоплену засобами БпЛА-контролю. Якщо цей показник є нижчим за встановлений критерій, отримані результати не можуть вважатися достатньо повними, а ділянка має бути включена до повторного або уточнювального маршруту.

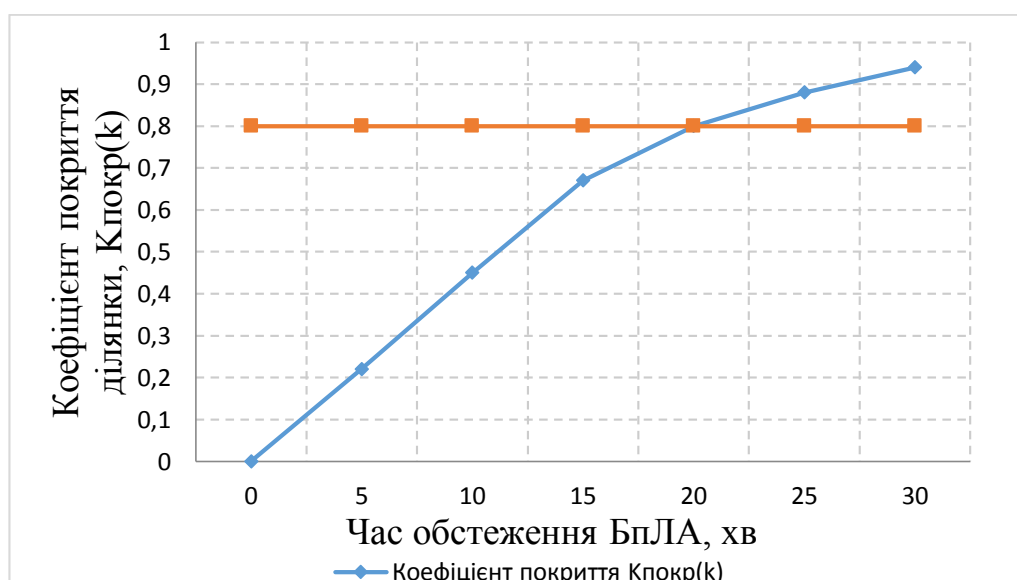


Рис. 5.5 Залежність коефіцієнта покриття ділянки від часу обстеження БпЛА

Залежність на рисунку 5.5 має подібний характер до попередньої: за 5 хв обстеження значення $K_{\text{покp}}(k)$ становить 0,22, за 10 хв – 0,45, за 15 хв – 0,67, а за 20 хв досягає 0,84. Це відповідає прийнятому критерію достатності покриття 0,80. Подальше збільшення тривалості до 25–30 хв підвищує коефіцієнт до 0,88–0,94, але приріст також стає менш інтенсивним.

Таким чином, за прийнятих розрахункових умов 20 хв забезпечують не лише необхідну імовірність виявлення, а й достатнє покриття контрольованої площі. Це узгоджує вимоги до результативності пошуку та просторової повноти отриманих даних.

Третім елементом перевірки є оцінювання зменшення інформаційної невизначеності після дистанційного обстеження. До початку польоту БПЛА частина пріоритетних ділянок може характеризуватися неповними або суперечливими даними щодо можливого радіоактивного забруднення. Після отримання просторово прив'язаних вимірювань рівень невизначеності має зменшуватися, а ділянки з підтвердженими ознаками аномалії передаються на наземне або лабораторне уточнення.

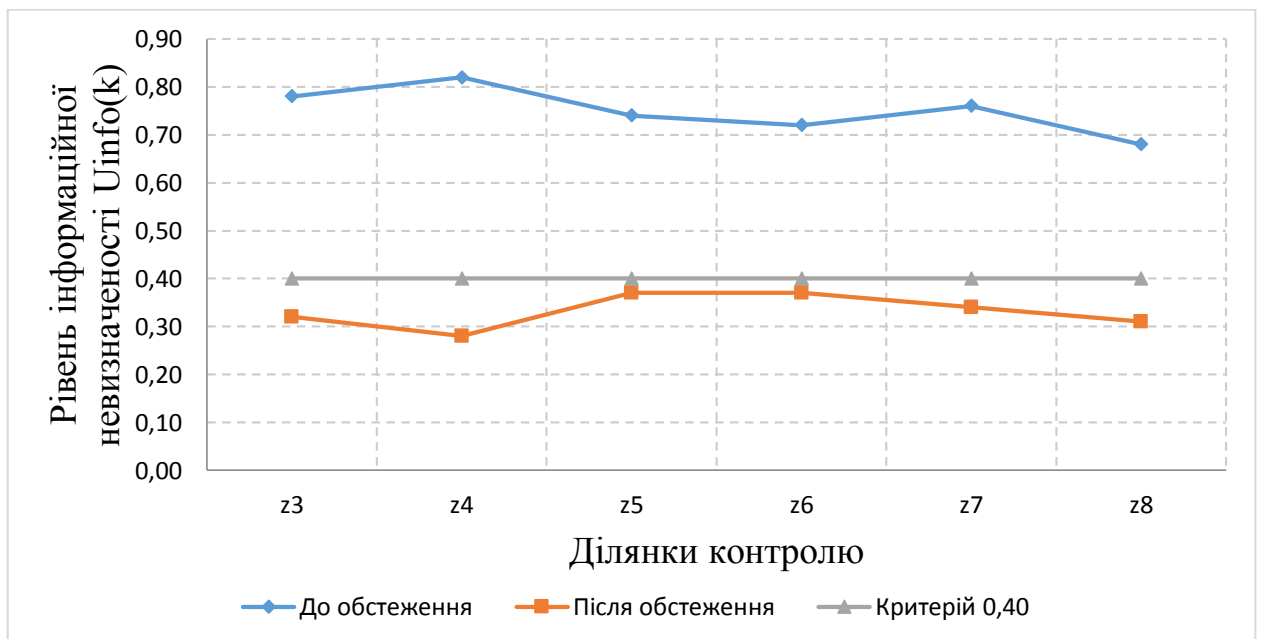


Рис. 5.6 Зміна інформаційної невизначеності після дистанційного обстеження

На рисунку 5.6 показано зміну інформаційної невизначеності для пріоритетних ділянок. По осі X подано ділянки контролю, по осі Y – значення показника $U_{\text{info}}(k)$, який характеризує ступінь неповноти даних про фактичний стан ділянки. Що більше значення цього показника, то вищою є потреба в уточнювальному контролі.

У розрахунковому прикладі граничне значення залишкової інформаційної невизначеності прийнято на рівні $U_{\text{кр}} = 0,40$. Це означає, що після дистанційного обстеження невизначеність щодо стану ділянки не повинна перевищувати 40 %. Якщо $U_{\text{info}}^T(k) \leq 0,40$, отримані дані вважаються достатніми для подальшого аналізу та планування наземного підтвердження. Якщо $U_{\text{info}}^T(k) > 0,40$, ділянка потребує повторного проходу БпЛА, додаткового інструментального контролю або лабораторного підтвердження.

До проведення дистанційного обстеження значення $U_{\text{info}}^0(k)$ для ділянок z_3 – z_8 перебували в межах 0,68–0,82. Найвищий рівень невизначеності зафіксовано для ділянки z_4 – 0,82, а також для ділянки z_3 – 0,78. Після виконання БпЛА-контролю значення $U_{\text{info}}^T(k)$ зменшилися до 0,28–0,38, тобто стали нижчими за встановлений граничний рівень.

Найбільше відносне зменшення інформаційної невизначеності отримано для ділянки z_4 : з 0,82 до 0,28, тобто на 65,9 %. Для ділянки z_3 показник зменшився з 0,78 до 0,32, що становить 59,0 %. Для ділянок z_5 , z_6 , z_7 та z_8 зниження становить відповідно 50,0 %, 48,6 %, 55,3 % і 54,4 %. У середньому рівень інформаційної невизначеності зменшився приблизно на 55,8 %.

Отримані значення підтверджують, що дистанційне обстеження із застосуванням БпЛА дає змогу перевести пріоритетні ділянки зі стану високої невизначеності до стану, придатного для подальшого прийняття рішень. У наведеному прикладі всі розглянуті ділянки після БпЛА-контролю мають $U_{\text{info}}^T(k) \leq 0,40$, тому результати можуть бути використані для уточнення меж можливого радіоактивного забруднення, вибору точок пробовідбору або переходу до управлінського блоку методики.

Четвертим елементом перевірки є оцінювання впливу швидкості польоту БПЛА на просторовий крок вимірювань. Збільшення швидкості скорочує час проходження маршруту, але водночас збільшує відстань між послідовними точками реєстрації даних. Це може знижувати імовірність фіксації локальної радіаційної аномалії, особливо якщо вона має малу площу або слабо виражений контраст відносно фонового рівня.

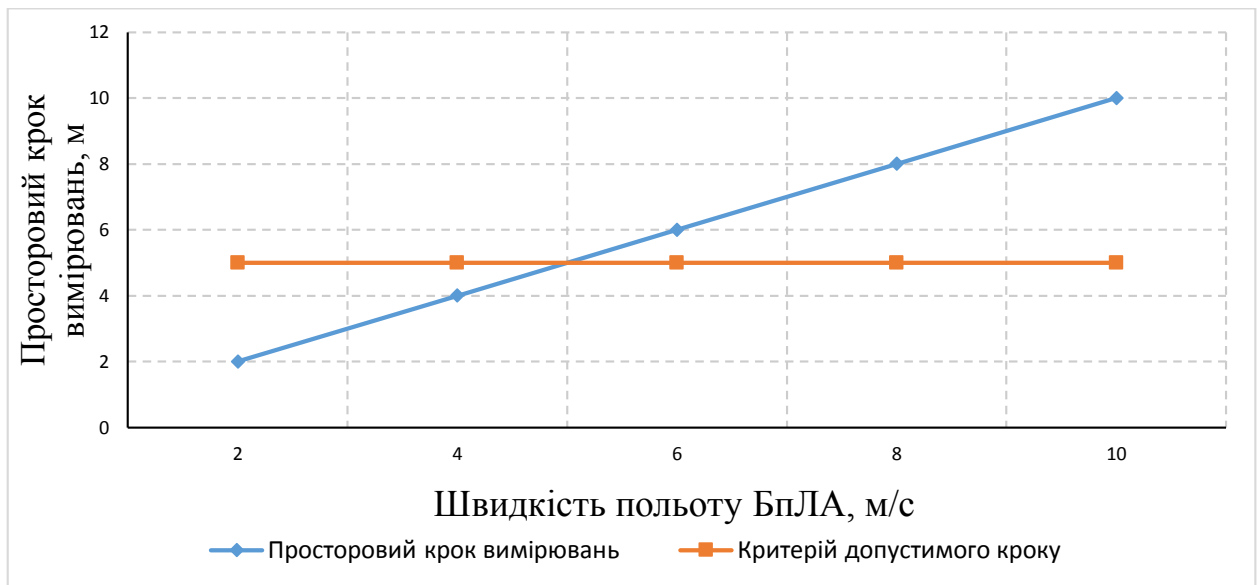


Рис. 5.7 Вплив швидкості польоту БПЛА на просторовий крок вимірювань

Просторовий крок вимірювань визначається як відстань між двома послідовними точками реєстрації даних під час руху БПЛА над ділянкою контролю. Він залежить від швидкості польоту v та інтервалу реєстрації даних Δt : $\Delta s = v \cdot \Delta t$.

За умови, що інтервал реєстрації становить 1 с, просторовий крок чисельно дорівнює швидкості польоту. Тому за швидкості 2, 4, 6, 8 і 10 м/с значення Δs становить відповідно 2, 4, 6, 8 і 10 м. У розрахунковому прикладі допустимий просторовий крок для виявлення локальної аномалії прийнято не більше 5 м. Отже, достатню деталізацію забезпечує швидкість до 4–5 м/с; за більшої швидкості зростає ризик пропуску локальних відхилень між точками вимірювання.

Узагальнення отриманих результатів показує, що результативність БпЛА-контролю визначається не окремим параметром, а узгодженням часу обстеження, повноти покриття, залишкової невизначеності та просторової деталізації. За прийнятих розрахункових умов достатній рівень імовірності виявлення та покриття ділянки досягається приблизно після 20 хв обстеження, а для фіксації локальних аномалій доцільно обмежувати швидкість польоту до 4–5 м/с або передбачати повторний прохід маршруту.

Таким чином, перевірка результативності пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА показала, що дистанційне обстеження забезпечує достатній обсяг просторово прив'язаних даних для уточнення стану можливого радіоактивного забруднення. За тривалості обстеження близько 20 хв і швидкості польоту до 4–5 м/с у розрахунковому прикладі досягаються імовірність виявлення аномалії на рівні 0,84, коефіцієнт покриття 0,84 та зменшення інформаційної невизначеності не менше ніж на 50 %. Це є підставою для переходу від дистанційного обстеження до наземного підтвердження, лабораторного аналізу проб або управлінського блоку методики.

5.6 Оцінювання обґрунтованості вибору управлінських та природоохоронних заходів

Оцінювання обґрунтованості вибору управлінських та природоохоронних заходів виконується на завершальному етапі перевірки математичної моделі та методики управління екологічною безпекою.

Вихідною інформацією є результати дистанційного обстеження, наземного інструментального контролю, лабораторного аналізу проб, уточнені значення показників забруднення, інформаційної невизначеності, доступності ділянок, а також результати класифікації території за рівнем

екологічної небезпеки. На основі цих даних перевіряється не лише факт призначення заходів, а їх відповідність характеру небезпечної зміни, просторовим умовам поширення забруднення та результатам повторного контролю.

У межах методики управлінське рішення вважається обґрунтованим за одночасного виконання трьох умов. По-перше, обраний захід має відповідати встановленому рівню екологічної небезпеки ділянки. По-друге, він має бути спрямований на домінуючий чинник небезпеки: локальне забруднення, пилове перенесення, поверхневий стік, недостатність даних або обмежений доступ. По-третє, після виконання заходу має бути зафіксовано зниження інтегрального показника екологічної небезпеки, зменшення кількості ділянок із підвищеним рівнем небезпеки або уточнення стану ділянки до рівня, достатнього для прийняття наступного рішення.

Кількісна перевірка виконується за коефіцієнтом зниження рівня екологічної небезпеки $K_{\text{зн}}(k)$, який у цьому підрозділі застосовується для порівняння стану ділянки до виконання природоохоронних заходів і після повторного контролю: $K_{\text{зн}}(k) = \frac{E^0(k) - E^T(k)}{E^0(k)} \cdot 100\%$, де $E^0(k)$ – значення інтегрального показника екологічної небезпеки до виконання заходів; $E^T(k)$ – значення цього показника після виконання заходів і повторного контролю; $K_{\text{зн}}(k)$ – відносне зниження рівня екологічної небезпеки для ділянки $E(k)$. Рішення вважається результативним, якщо після реалізації заходів виконується умова $E^T(k) < E^0(k)$ і досягається прийнятий критерій достатності $K_{\text{зн}}(k) \geq K_{\text{кр}}$. Якщо зменшення не відбувається або є недостатнім, ділянка повертається до нового циклу контролю або для неї посилюється склад природоохоронних заходів.

У розрахунковому прикладі розглянуто шість ділянок контролю, для яких за результатами пошуково-вимірювального обстеження було встановлено потребу у виконанні управлінських та природоохоронних заходів. До реалізації таких дій інтегральний показник екологічної небезпеки

перебував у межах від 0,52 до 0,78. Комплекс заходів включав уточнення меж зони впливу, пріоритетне обстеження найбільш небезпечних ділянок, обмеження доступу до них, локалізацію можливих шляхів поширення радіоактивного забруднення і проведення повторного контролю. Після їх виконання значення інтегрального показника зменшилося до 0,34–0,41, що свідчить про зниження рівня екологічної небезпеки.

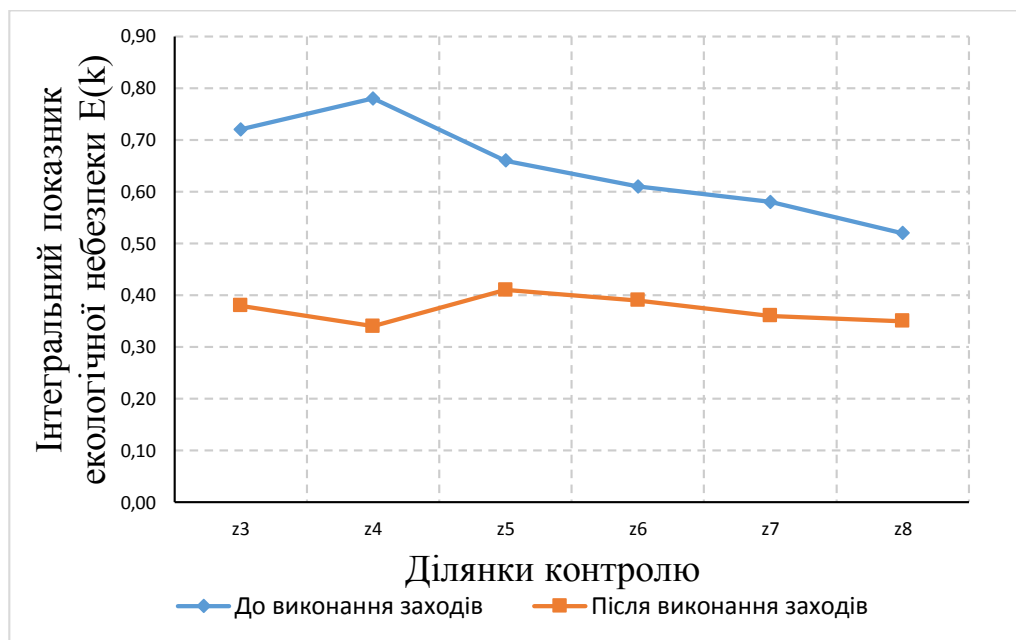


Рис. 5.8 Зміна інтегрального показника екологічної небезпеки до і після виконання природоохоронних заходів

На рис. 5.8 показано зміну інтегрального показника екологічної небезпеки $E(k)$ для ділянок z_3 – z_8 до та після виконання природоохоронних заходів. Цей показник відображає узагальнений рівень небезпеки: що більшим є його значення, то вищим є рівень екологічного ризику для відповідної ділянки.

До виконання заходів найбільші значення $E(k)$ мали ділянки z_4 та z_3 , для яких показник становив відповідно 0,78 та 0,72. Після реалізації заходів значення показника для всіх розглянутих ділянок зменшилися до діапазону 0,34–0,41. Найбільше зниження отримано для ділянки z_4 – з 0,78 до 0,34, тобто на 56,4 %. Для ділянки z_3 показник зменшився з 0,72 до 0,38, що становить

47,2 %. Для ділянок z_5 , z_6 , z_7 та z_8 зниження становить відповідно 37,9 %, 36,1 %, 37,9 % та 32,7 %.

За середніми значеннями інтегральний показник екологічної небезпеки зменшився з 0,65 до 0,37, тобто приблизно на 43 %. Це підтверджує результативність обраних дій, оскільки після повторного контролю значення $E(k)$ знизилися на всіх розглянутих ділянках. Найбільший ефект отримано для ділянок із найвищим початковим рівнем небезпеки, що свідчить про правильність їх віднесення до пріоритетних об'єктів управлінського реагування.

Наступним елементом перевірки є порівняння результативності окремих управлінських рішень і природоохоронних заходів. У розрахунковому прикладі розглянуто локалізацію забруднення, пилопригнічення, контроль поверхневого стоку, дезактивацію, повторне дистанційне обстеження та комбіноване застосування кількох заходів. Для кожного варіанта визначено середнє зниження інтегрального показника екологічної небезпеки.



Рис. 5.9 Порівняння результативності різних управлінських рішень і природоохоронних заходів

На рис. 5.9 наведено порівняння результативності різних дій за середнім зниженням інтегрального показника екологічної небезпеки $\Delta E(k)$. Чим більшим є значення $\Delta E(k)$, тим більшою є результативність відповідного заходу щодо зниження рівня небезпеки.

У розрахунковому прикладі критерієм достатньої результативності прийнято $\Delta E_{\min} = 0,30$. Найбільший ефект отримано для комбінованих заходів, для яких $\Delta E(k) = 0,48$. Такий результат пояснюється поєднанням локалізації забруднення, обмеження його поширення, уточнення стану ділянки та повторного контролю. Дезактивація забезпечує зниження показника на 0,41, пилопригнічення – на 0,36, локалізація забруднення – на 0,30.

Контроль поверхневого стоку має значення $\Delta E(k) = 0,28$, тобто є близьким до прийнятого критерію, але потребує поєднання з додатковим пробовідбором, локалізаційними заходами або подальшим моніторингом. Повторне дистанційне обстеження забезпечує найменше зниження – $\Delta E(k) = 0,22$, оскільки воно переважно зменшує інформаційну невизначеність, а не усуває небезпечний чинник. Тому таке обстеження доцільно розглядати як підготовчий або уточнювальний етап перед вибором основних природоохоронних заходів.

Отже, вибір заходів має залежати від характеру небезпечної зміни. Якщо підтверджено локальне забруднення, пріоритетними є локалізація, дезактивація або комбіновані заходи. Якщо домінує пилове перенесення, доцільним є пилопригнічення. Якщо небезпека пов'язана з міграцією забруднення водним шляхом, першочерговим є контроль поверхневого стоку. Якщо основною проблемою є недостатність даних, повторне дистанційне обстеження застосовується для уточнення стану ділянки та підготовки рішення щодо подальших дій.

Для узагальненої перевірки результативності управлінського блоку доцільно оцінювати не лише зміну окремих числових показників, а й

перерозподіл ділянок за рівнями екологічної небезпеки. Такий підхід дає змогу встановити, чи призводять обрані дії до покращення загального стану території після їх виконання.

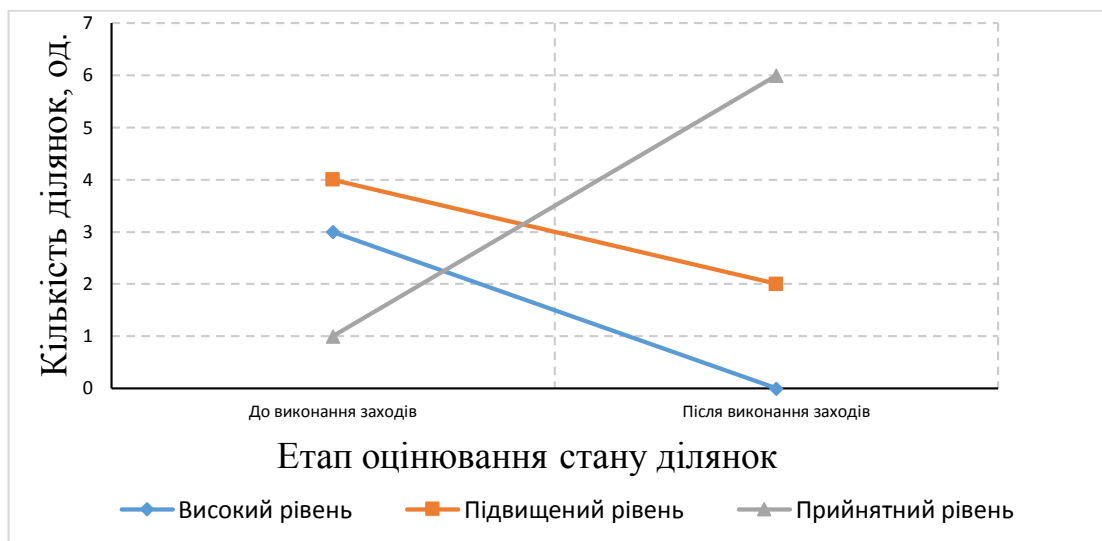


Рис. 5.10 Динаміка зміни кількості ділянок із різним рівнем екологічної небезпеки

На рис. 5.10 наведено зміну кількості ділянок із різним рівнем екологічної небезпеки до та після виконання управлінських і природоохоронних заходів. До реалізації заходів із восьми розглянутих ділянок три мали високий рівень екологічної небезпеки, чотири – підвищений рівень і лише одна перебувала в прийнятному стані. Після виконання заходів і повторного контролю кількість ділянок із високим рівнем небезпеки зменшилася з трьох до нуля, кількість ділянок із підвищеним рівнем – з чотирьох до двох, а кількість ділянок із прийнятним рівнем збільшилася з однієї до шести.

Такий перерозподіл підтверджує, що управлінські рішення сприяють зниженню екологічної небезпеки на пріоритетних ділянках. Водночас наявність двох ділянок із підвищеним рівнем після повторного контролю вказує на потребу продовження спостереження, уточнення меж можливого

радіоактивного забруднення або виконання додаткових природоохоронних заходів саме для цих зон.

Завершальним елементом оцінювання є прийняття рішення за результатами повторного контролю. Рішення має бути пов'язане з фактичним станом ділянки після реалізації заходів, залишковою інформаційною невизначеністю та динамікою інтегрального показника екологічної небезпеки.



Рис. 5.11 Схема прийняття рішення за результатами повторного контролю

На рис. 5.11 доцільно подати блок-схему переходу від повторного контролю до одного з трьох рішень. Якщо виконується умова $E^T(k) \leq E_{\text{доп}}$, інформаційна невизначеність не перевищує допустимого рівня $U_{\text{info}}^T(k) \leq U_{\text{доп}}$, а показники мають стабільну або спадну динаміку, ділянка переводиться до режиму планового спостереження. Якщо даних недостатньо, межі можливого радіоактивного забруднення не уточнені або виконується умова $U_{\text{info}}^T(k) > U_{\text{доп}}$, призначається новий цикл контролю. Якщо після повторного контролю рівень небезпеки залишається підвищеним або

зниження $E(k)$ є недостатнім, склад природоохоронних заходів коригується або посилюється.

Таким чином, оцінювання обґрунтованості вибору управлінських рішень і природоохоронних заходів показало, що управлінський блок методики забезпечує перехід від результатів контролю до конкретного рішення щодо подальшого стану ділянки. У розрахунковому прикладі середнє значення інтегрального показника екологічної небезпеки зменшилося з 0,65 до 0,37, тобто приблизно на 43 %. Кількість ділянок із високим рівнем небезпеки зменшилася з трьох до нуля, а кількість ділянок із прийнятним станом збільшилася з однієї до шести. Найбільше зниження небезпеки забезпечують комбіновані заходи, для яких середнє зменшення інтегрального показника становить 0,48. Отримані результати підтверджують, що вибір заходів відповідає встановленому рівню екологічної небезпеки, домінуючому чиннику небезпеки та результатам повторного контролю.

Висновки до розділу 5

1. Постановка задачі перевірки достовірності полягає у встановленні працездатності математичної моделі та методики як єдиного інструменту переходу від вихідних даних про аварійний вплив до визначення пріоритетних зон контролю, уточнення стану можливого радіоактивного забруднення, вибору природоохоронних заходів і повторної перевірки їх результативності.

2. Система показників оцінювання достовірності та результативності охоплює три групи: показники визначення пріоритетних зон контролю, показники пошуково-вимірального контролю із застосуванням БПЛА та показники обґрунтованості управлінських рішень і природоохоронних заходів. Такий поділ дає змогу окремо перевірити коректність аналітичного ранжування ділянок, достатність дистанційного обстеження, зменшення

інформаційної невизначеності та результативність прийнятих рішень після повторного контролю.

3. Розрахунковими сценаріями аварійного впливу на сухе сховище відпрацьованого ядерного палива обрано: локальне механічне пошкодження окремої ділянки сховища; пошкодження з утворенням радіоактивного пилу або аерозолів; забруднення технологічних покриттів із подальшим перенесенням поверхневим стоком; аварійний вплив за умов невизначеного місця пошкодження та обмеженого доступу до частини території.

4. За результатами оцінювання встановлено, що аналітично-розрахунковий блок методики забезпечує виділення ділянок першочергового контролю відповідно до заданих розрахункових сценаріїв. У трьох сценаріях коефіцієнт охоплення небезпечних ділянок становить 1,00, тобто всі ділянки з підвищеною потенційною небезпекою віднесено до першочергового контролю. У сценарії з невизначеним місцем пошкодження та обмеженим доступом цей показник становить 0,80, що вказує на потребу подальшого уточнення даних за результатами дистанційного обстеження. Порівняння пріоритетного та рівномірного контролю показало, що пріоритетний підхід дає змогу виявити основну частину небезпечних ділянок уже після обстеження 40–60 % території, тоді як за рівномірного контролю для досягнення такого результату потрібне ширше охоплення. Повне виявлення небезпечних ділянок за пріоритетного підходу досягається після обстеження 80 % території, що обґрунтовує його використання для подальшого формування маршруту пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА.

5. Перевірка результативності пошуково-вимірювального контролю із застосуванням БпЛА показала, що дистанційне обстеження забезпечує достатній обсяг просторово прив'язаних даних для уточнення стану можливого радіоактивного забруднення. За тривалості обстеження близько 20 хв і швидкості польоту до 4–5 м/с у розрахунковому прикладі досягаються імовірність виявлення аномалії на рівні 0,84, коефіцієнт покриття 0,84 та

зменшення інформаційної невизначеності не менше ніж на 50 %. Це є підставою для переходу від дистанційного обстеження до наземного підтвердження, лабораторного аналізу проб або управлінського блоку методики.

6. Оцінювання обґрунтованості вибору управлінських рішень і природоохоронних заходів показало, що управлінський блок методики забезпечує перехід від результатів контролю до конкретного рішення щодо подальшого стану ділянки. У розрахунковому прикладі середнє значення інтегрального показника екологічної небезпеки зменшилося з 0,65 до 0,37, тобто приблизно на 43 %. Кількість ділянок із високим рівнем небезпеки зменшилася з трьох до нуля, а кількість ділянок із прийнятним станом збільшилася з однієї до шести. Найбільше зниження небезпеки забезпечують комбіновані заходи, для яких середнє зменшення інтегрального показника становить 0,48. Отримані результати підтверджують, що вибір заходів відповідає встановленому рівню екологічної небезпеки, домінуючому чиннику небезпеки та результатам повторного контролю.

РОЗДІЛ 6 ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ У РАЗІ АВАРІЇ НА СУХОМУ СХОВИЩІ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА, СПРИЧИНЕНОЇ ВОЄННИМИ ДІЯМИ

Рішення шостої наукової задачі дисертаційного дослідження щодо розроблення практичних рекомендацій із застосування методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі ВЯП, спричиненої воєнними діями, здійснено за такими напрямками. Спочатку розглянуто організацію екологічного та радіаційного моніторингу у зоні впливу сухого сховища ВЯП у разі аварії. Далі визначено порядок застосування стаціонарних, мобільних і дистанційних засобів контролю для отримання, уточнення та підтвердження даних про стан території. Після цього сформовано рекомендації щодо визначення пріоритетних ділянок обстеження та уточнення меж можливого радіоактивного забруднення. Окремо обґрунтовано використання результатів математичного моделювання для вибору природоохоронних заходів. Завершальним етапом визначено очікувані екологічні та управлінські результати застосування запропонованої методики.

6.1 Організація екологічного та радіаційного моніторингу у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями

Організація екологічного та радіаційного моніторингу у зоні впливу сухого сховища ВЯП у разі аварії має забезпечувати отримання достовірних даних про стан території, виявлення радіаційних аномалій, уточнення меж радіоактивного забруднення та підготовку рішень щодо подальшого контролю або природоохоронного реагування. В умовах аварії, спричиненої воєнними

діями, моніторинг виконується за наявності обмеженого доступу до окремих ділянок, неповноти первинної інформації, пошкодження інфраструктури та потреби в оперативному дистанційному контролі.

Метою моніторингу є встановлення фактичного стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сховища та формування інформаційної основи для управління екологічною безпекою. Для цього моніторинг будується як єдиний цикл: первинне спостереження, пошуково-вимірвальне уточнення, підтвердження результатів і прийняття рішення.

Перший рівень – первинний оперативний контроль. Він виконується після фіксації аварійного впливу та спрямований на отримання початкових даних про зміну радіаційного стану. На цьому рівні враховуються показники стаціонарних постів, метеорологічні умови, повідомлення про характер пошкодження, інформація про доступність території та результати первинного дистанційного огляду.

Другий рівень – пошуково-вимірвальний контроль. Він застосовується для ділянок, які за первинними даними або результатами моделювання потребують уточнення. Завданням цього рівня є виявлення локальних аномалій, звуження зони невизначеності, уточнення положення потенційно небезпечних ділянок і визначення потреби в наземному підтвердженні.

Третій рівень – моніторинг направлений на підтвердження та контроль. Він передбачає наземні інструментальні вимірювання, відбір проб ґрунту, пилу, води, рослинності або змивів із технологічних поверхонь, лабораторний аналіз і повторний контроль після виконання природоохоронних заходів. Його результати використовуються для остаточного визначення стану ділянки.

Організаційна схема моніторингу має включати: визначення меж зони впливу; поділ території на ділянки контролю; встановлення пріоритетності ділянок; формування маршрутів дистанційного обстеження; проведення наземного і лабораторного підтвердження; узагальнення даних; вибір подальшого режиму для кожної ділянки.

До радіаційних параметрів контролю належать потужність еквівалентної дози гамма-випромінювання, наявність локальних радіаційних аномалій, рівень радіоактивного забруднення поверхонь, вміст радіонуклідів у пробах ґрунту, води, пилу, рослинності та змивах із технологічних покриттів. До екологічних параметрів належать стан ґрунтового покриву, напрямки поверхневого стоку, місця накопичення частинок, стан дренажних елементів, метеорологічні умови та шляхи вторинного перенесення забруднення.

Результати моніторингу узагальнюються в єдиному інформаційному контурі. До нього включаються дані стаціонарних постів, БПЛА-обстеження, наземних вимірювань, лабораторного аналізу, метеорологічна інформація та результати математичного моделювання. Узгодження цих даних дає змогу визначити фактичний стан ділянок, скоригувати їх пріоритетність і підготувати рішення щодо подальших дій.

Для кожної ділянки за результатами моніторингу встановлюється один із режимів: планове спостереження, повторне обстеження, наземне підтвердження, лабораторний аналіз проб, виконання природоохоронних заходів або посилений контроль. Якщо показники залишаються в межах прийняттого рівня, а даних достатньо для рішення, ділянка переводиться до планового спостереження. Якщо межі забруднення не уточнені або якість даних недостатня, призначається новий цикл контролю. Якщо перевищення підтвержене, виконуються обмежувальні, контрольні або природоохоронні заходи.

Таким чином, запропоновано практичний порядок організації екологічного та радіаційного моніторингу у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями. Його основу становить поетапне отримання, уточнення та підтвердження даних про стан території з урахуванням обмеженого доступу, пошкодження інфраструктури та неповноти первинної інформації.

6.2 Застосування стаціонарних, мобільних і дистанційних засобів контролю

Стаціонарні пости контролю призначені для безперервного або періодичного спостереження в контрольних точках зони впливу сховища. Їхні функції полягають у фіксації змін потужності еквівалентної дози, виявленні відхилень від фоновому рівня, накопиченні часових рядів даних і передачі інформації до відповідальних підрозділів. Дані стаціонарного контролю формують початковий сигнал для подальшого уточнення стану території.

Дистанційні засоби контролю, насамперед БпЛА, застосовуються для обстеження важкодоступних, небезпечних або інформаційно невизначених ділянок. Вони забезпечують просторово прив'язані дані про стан поверхні, положення можливих аномалій, межі зони уточнення та умови для побудови маршруту наземного контролю. Маршрут БпЛА формується з урахуванням пріоритетності ділянки, часу польоту, швидкості руху, висоти, просторового кроку вимірювань і потреби в повторному проході.

Мобільні групи інструментального контролю виконують наземне уточнення після дистанційного або розрахункового визначення ділянок, що потребують перевірки. Їхні завдання – підтвердження або спростування результатів БпЛА-контролю, уточнення меж радіоактивного забруднення, визначення точок пробовідбору, оцінювання стану технологічних покриттів, ґрунтового покриття, дренажних елементів і місць накопичення частинок.

Лабораторний аналіз проб застосовується для встановлення складу і рівня забруднення. Він призначається після виявлення аномалії, нестійких показників або недостатності польових даних. Проби відбираються на ділянках із підтвердженим відхиленням, у місцях можливого накопичення забруднення, за напрямками поверхневого стоку та в контрольних точках за межами основної зони впливу.

Таблиця 6.1 Функціональне призначення засобів контролю у зоні впливу сухого сховища ВЯП

Засіб контролю	Функція в системі моніторингу	Дані, що отримуються	Рішення, яке забезпечується
Стаціонарні пости	Первинне спостереження у контрольних точках	Потужність еквівалентної дози, часові ряди, відхилення від фону	Початок уточнювального контролю або підтвердження стабільного стану
БПЛА-контроль	Дистанційне уточнення важкодоступних і пріоритетних ділянок	Просторово прив'язані вимірювання, положення аномалій, межі зони уточнення	Формування маршруту наземного контролю або повторного польоту
Мобільні групи	Наземне підтвердження результатів дистанційного контролю	Локальні дозиметричні, радіометричні та спектрометричні показники	Підтвердження або спростування забруднення, вибір точок пробовідбору
Лабораторний аналіз	Встановлення складу і рівня забруднення	Радіонуклідний склад, активність у пробах, характеристики забруднення	Остаточна класифікація стану ділянки та вибір подальших дій

Схема застосування засобів контролю має бути послідовною. Стаціонарні пости фіксують зміну стану. БПЛА уточнює просторове

положення ділянок. Мобільні групи виконують наземне підтвердження. Лабораторний аналіз встановлює фактичний склад і рівень забруднення. Після цього результати передаються до блоку прийняття рішень.

Застосування засобів контролю завершується визначенням режиму ділянки. За прийнятних показників і достатньої інформації встановлюється планове спостереження. За недостатньої інформації призначається повторний дистанційний або наземний контроль. За підтвердженого перевищення ділянка передається до блоку вибору природоохоронних заходів.

Таким чином, обґрунтовано застосування стаціонарних, мобільних, дистанційних і лабораторних засобів контролю як єдиної системи моніторингу. Стаціонарні пости забезпечують первинну фіксацію змін радіаційного стану, БПЛА дають змогу обстежувати пріоритетні та важкодоступні ділянки, мобільні групи виконують наземне підтвердження, а лабораторний аналіз встановлює фактичний склад і рівень забруднення.

6.3 Рекомендації щодо уточнення меж радіоактивного забруднення

Пріоритетною є ділянка, для якої одночасно наявні одна або кілька таких ознак: близькість до можливого місця пошкодження; розташування за напрямом атмосферного перенесення; належність до понижених елементів рельєфу; наявність дренажних каналів, водозбірних точок або технологічних лотків; обмежений доступ; недостатність або суперечливість первинної інформації; ознаки локальної радіаційної аномалії.

Визначення пріоритетних ділянок виконується послідовно. Спочатку збираються дані про характер аварійного впливу, можливе місце пошкодження, метеорологічні умови, стан інфраструктури та доступність території. Далі зона впливу поділяється на ділянки контролю. Для кожної ділянки встановлюються показники потенційної небезпеки, прогнозованого поширення, екологічної чутливості, доступності та інформаційної

невизначеності. Після цього формується перелік ділянок для першого циклу обстеження.

За сценарію пилового або аерозольного перенесення до першого циклу включаються ділянки за напрямом вітру та можливого осадження частинок. За сценарію поверхневого стоку обстежуються понижені елементи рельєфу, дренажні канали, водозбірні точки й технологічні лотки. За обмеженого доступу пріоритет отримують ділянки, де наземний контроль потребує попереднього дистанційного уточнення.

Уточнення меж радіоактивного забруднення виконується як послідовне звуження зони невизначеності. На початковому етапі за результатами моделювання, стаціонарного контролю та первинної інформації задається попередня зона можливого радіоактивного забруднення. Після БпЛА-обстеження межі коригуються за фактичними просторово прив'язаними даними. Ділянки з підтвердженими або сумнівними результатами передаються до наземного контролю та пробовідбору. Остаточні межі встановлюються після лабораторного підтвердження.

Ділянки, на яких дистанційне обстеження не зафіксувало перевищень, але якість даних є недостатньою, не переводяться одразу до планового спостереження. Вони включаються до повторного маршруту БпЛА або до вибіркового наземного контролю. Підставами для такого рішення є недостатнє покриття, завеликий крок вимірювань, короткий час обстеження, складні метеорологічні умови або наявність умов для прихованого накопичення забруднення.

У разі виявлення локальної аномалії зона уточнення охоплює точку максимального значення, суміжні ділянки за напрямом можливого поширення, дренажні елементи, понижені місця та контрольні точки за межами очікуваного впливу. Такий порядок дає змогу встановити не лише центр аномалії, а й межі можливого поширення забруднених частинок.

Таблиця 6.2 Порядок визначення пріоритетних ділянок обстеження та уточнення меж радіоактивного забруднення

Етап	Зміст дій	Джерело даних	Результат
1	Фіксація характеру аварійного впливу та початкових умов	Повідомлення про аварію, стаціонарний контроль, метеорологічні дані	Попередня зона можливого впливу
2	Поділ території на ділянки контролю	План території, просторові дані, результати моделювання	Множина ділянок для оцінювання
3	Оцінювання небезпеки, доступу та невизначеності	Моделювання, дані про інфраструктуру, умови доступу	Рівень пріоритетності кожної ділянки
4	Формування першого циклу обстеження	Результати ранжування ділянок	Маршрут БпЛА або мобільної групи
5	Дистанційне обстеження	БпЛА, просторово прив'язані вимірювання	Аномалії, зони уточнення, ділянки для наземного контролю
6	Наземне підтвердження та пробовідбір	Мобільні групи, дозиметричні й радіометричні прилади	Підтвердження або спростування забруднення
7	Коригування меж	Дані БпЛА, наземного контролю, лабораторного аналізу	Уточнені межі небезпечної ділянки
8	Встановлення режиму ділянки	Класифікація стану, результати повторного контролю	Планове спостереження, новий цикл контролю або природоохоронні заходи

Для практичного застосування встановлюються три рівні пріоритетності. Перший рівень охоплює ділянки з підтвердженими ознаками забруднення, високою потенційною небезпекою або обмеженим доступом. Другий рівень охоплює ділянки, де забруднення не підтверджене, але наявні умови для його перенесення або накопичення. Третій рівень охоплює ділянки з прийнятними показниками та достатньою інформаційною визначеністю.

Для кожної ділянки фіксуються координати точок вимірювання, час контролю, тип засобу вимірювання, радіаційні показники, умови обстеження, якість даних, результати пробовідбору та прийняте рішення. Таке документування забезпечує відтворюваність оцінювання і формує основу для повторного контролю.

Таким чином, визначено порядок встановлення пріоритетних ділянок обстеження та уточнення меж можливого радіоактивного забруднення. До першочергового контролю віднесено ділянки поблизу джерела аварійного впливу, території за напрямом перенесення забруднення, понижені елементи рельєфу, дренажні зони, місця накопичення забруднених частинок і ділянки з недостатньою або суперечливою інформацією.

6.4 Використання результатів математичного моделювання для вибору природоохоронних заходів

Вихідними результатами математичного моделювання є прогнозовані зони можливого радіоактивного забруднення, інтегральний показник пріоритетності ділянок, напрямки атмосферного перенесення, можливі шляхи поверхневого стоку, місця накопичення частинок, рівень інформаційної невизначеності та результати уточнення після дистанційного обстеження. Ці дані визначають, чи потребує ділянка спостереження, повторного контролю або природоохоронного втручання.

Вибір заходів залежить від домінуючого механізму формування небезпеки. За локального характеру забруднення застосовуються встановлення меж контрольованої зони, обмеження доступу, пробовідбір, наземне підтвердження, локалізація забруднених матеріалів і дезактивація після підтвердження забруднення. Якщо модель указує на пилове або аерозольне перенесення, застосовуються пилопригнічення, обмеження руху транспорту, контроль відкритих поверхонь, дистанційне спостереження за напрямом перенесення та повторне обстеження ділянок осадження.

За сценарію поверхневого стоку природоохоронні заходи спрямовуються на запобігання винесенню забруднення за межі контрольованої території. До таких дій належать контроль понижених ділянок, перевірка дренажних каналів, локалізація стоку, пробовідбір води й ґрунту, контроль технологічних лотків і повторне обстеження після опадів або зміни гідрологічної обстановки.

Для ділянок із високою інформаційною невизначеністю першим рішенням є уточнення даних, а не безпосереднє втручання. Призначається повторне БПЛА-обстеження, ущільнення маршруту, наземне підтвердження або лабораторний аналіз проб. Після отримання уточнених даних виконується перерахунок пріоритетності та визначається подальший режим.

Прийняття рішень має спиратися на порогові умови. Якщо рівень небезпеки перебуває у прийнятних межах, а інформації достатньо, ділянка переводиться до планового спостереження. Якщо рівень небезпеки підвищений або межі можливого радіоактивного забруднення не встановлені, призначається новий цикл контролю. Якщо перевищення підтверджене, застосовуються обмежувальні та природоохоронні заходи з подальшим повторним контролем.

Таблиця 6.3 Зв'язок результатів математичного моделювання з природоохоронними діями

Результат моделювання	Інтерпретація	Природоохоронні заходи	Подальший контроль
Висока пріоритетність ділянки	Імовірна концентрація небезпеки в локальній зоні	Локалізація, обмеження доступу, пробовідбір	Повторний наземний контроль
Прогноз атмосферного перенесення	Імовірне осадження частинок за напрямом вітру	Пилопригнічення, контроль відкритих поверхонь, обмеження руху техніки	БПЛА-контроль за напрямом перенесення
Прогноз поверхневого стоку	Імовірне переміщення забруднення до понижених зон	Локалізація стоку, контроль дренажу, пробовідбір води й ґрунту	Контроль водозбірних і дренажних елементів
Висока інформаційна невизначеність	Даних недостатньо для остаточного рішення	Повторне БПЛА-обстеження, ущільнення маршруту, наземне підтвердження	Перерахунок пріоритетності після уточнення
Підтверджене перевищення контрольних рівнів	Небезпечна зміна стану ділянки підтверджена	Деактивація, локалізація, обмеження доступу, природоохоронні заходи	Повторний контроль результативності
Стабілізація показників після виконання заходів	Рівень небезпеки відповідає прийнятому режиму	Переведення до планового або посиленого спостереження	Періодичний контроль

Математичне моделювання використовується також для сценарного обґрунтування складу заходів. Для кожної ділянки оцінюється, як обрані дії впливають на площу зони можливого радіоактивного забруднення, кількість ділянок із підвищеним рівнем небезпеки, умови вторинного перенесення та залишкову невизначеність. Рішення приймається за тим набором дій, який забезпечує досягнення контрольного стану за наявних організаційних і технічних умов.

Після виконання природоохоронних заходів результати моделювання зіставляються з даними повторного контролю. Якщо фактичні показники відповідають очікуваному режиму, ділянка переводиться до планового або посиленого спостереження. Якщо показники залишаються підвищеними, уточнюються вихідні припущення, коригуються межі забруднення, перераховується пріоритетність і призначається новий цикл дій.

Таким чином, розроблено підхід до використання результатів математичного моделювання для вибору природоохоронних заходів. За результатами моделювання визначаються домінуючі механізми радіоактивного забруднення, зокрема пилове перенесення, поверхневий стік або локальне накопичення, після чого обираються відповідні дії: локалізація, пилопригнічення, контроль дренажних елементів, пробовідбір, дезактивація або повторне обстеження.

6.5 Очікувані екологічні та управлінські результати застосування розробленої методики

Екологічні результати пов'язані зі станом території, межами забруднення, вторинним перенесенням і підтвердженням результативності природоохоронних заходів. Управлінські результати пов'язані з алгоритмом

прийняття рішень, розподілом ресурсів, безпекою персоналу та документуванням дій.

Першим екологічним результатом є скорочення часу між фіксацією аварійного впливу та початком цільового контролю. Попереднє ранжування території спрямовує пошуково-вимірювальний ресурс на ділянки з підвищеною потенційною небезпекою, обмеженим доступом, умовами поширення забруднення або високою інформаційною невизначеністю.

Другим екологічним результатом є уточнення меж можливого радіоактивного забруднення. Методика передбачає перехід від попередньої розрахункової зони до меж, підтверджених дистанційними, наземними та лабораторними даними. Це дає змогу відокремити ділянки з підтвердженим або ймовірним забрудненням від територій, для яких встановлено прийнятний режим спостереження.

Третім екологічним результатом є обмеження вторинного поширення забруднення. За результатами моделювання та контролю визначаються ділянки з ризиком пилового перенесення, поверхневого стоку, накопичення частинок або винесення забруднення за межі контрольованої території. Для них призначаються локалізація, пилопригнічення, контроль дренажних елементів, пробовідбір, дезактивація або повторне обстеження.

Четвертим екологічним результатом є підвищення достовірності оцінки стану довкілля. Якщо результати дистанційного контролю є недостатніми або суперечливими, ділянка включається до повторного маршруту БпЛА, наземного підтвердження або лабораторного аналізу. Це зменшує ризик рішення на основі неповної інформації.

Першим управлінським результатом є формування послідовності прийняття рішень для кожної ділянки: планове спостереження, повторне обстеження, наземне підтвердження, лабораторний аналіз, природоохоронні заходи або посилений контроль. Такий порядок забезпечує зв'язок між результатами вимірювань і практичними діями відповідальних підрозділів.

Другим управлінським результатом є раціональний розподіл ресурсів контролю. В умовах обмеженого доступу, дефіциту часу, небезпеки для персоналу та обмеженої кількості технічних засобів методика спрямовує БпЛА, мобільні групи та лабораторний аналіз на ділянки, де дані потрібні для прийняття рішення.

Третім управлінським результатом є можливість коригування рішень у часі. Після виконання природоохоронних заходів проводиться повторний контроль. За його результатами ділянка переводиться до планового спостереження, повертається до нового циклу контролю або передається на посилення природоохоронних заходів.

Четвертим управлінським результатом є документування процесу. Для кожної ділянки фіксуються вихідні дані, результати моделювання, рівень пріоритетності, дані дистанційного й наземного контролю, лабораторні результати, прийняте рішення та результати повторної перевірки. Це створює основу для звітності, аналізу динаміки та обґрунтування виконаних дій.

Таким чином, очікуваними результатами застосування запропонованої методики є своєчасне виявлення небезпечних ділянок, уточнення меж радіоактивного забруднення, зменшення інформаційної невизначеності, раціональний розподіл сил і засобів контролю, зниження ризику для персоналу та прийняття обґрунтованих рішень щодо подальшого режиму кожної ділянки.

Висновки до розділу 6

1. Запропоновано практичний порядок організації екологічного та радіаційного моніторингу у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями. Його основу становить поетапне отримання, уточнення та підтвердження даних про стан

території з урахуванням обмеженого доступу, пошкодження інфраструктури та неповноти первинної інформації.

2. Обґрунтовано застосування стаціонарних, мобільних, дистанційних і лабораторних засобів контролю як єдиної системи моніторингу. Стаціонарні пости забезпечують первинну фіксацію змін радіаційного стану, БпЛА дають змогу обстежувати пріоритетні та важкодоступні ділянки, мобільні групи виконують наземне підтвердження, а лабораторний аналіз встановлює фактичний склад і рівень радіоактивного забруднення.

3. Визначено порядок встановлення пріоритетних ділянок обстеження та уточнення меж можливого радіоактивного забруднення. До першочергового контролю віднесено ділянки поблизу джерела аварійного впливу, території за напрямом перенесення забруднення, понижені елементи рельєфу, дренажні зони, місця накопичення забруднених частинок і ділянки з недостатньою або суперечливою інформацією.

4. Розроблено підхід до використання результатів математичного моделювання для вибору природоохоронних заходів. За результатами моделювання визначаються домінуючі механізми поширення радіоактивного забруднення, зокрема пилове перенесення, поверхневий стік або локальне накопичення, після чого обираються відповідні дії: локалізація, пилопригнічення, контроль дренажних елементів, пробовідбір, дезактивація або повторне обстеження.

5. Очікуваними результатами застосування запропонованої методики є своєчасне виявлення небезпечних ділянок, уточнення меж радіоактивного забруднення, зменшення інформаційної невизначеності, раціональний розподіл сил і засобів контролю, зниження ризику для персоналу та прийняття обґрунтованих рішень щодо подальшого режиму кожної ділянки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційного дослідження вирішено актуальне науково-практичне завдання у галузі знань 18 «Виробництво та технології» за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища», а саме розроблено методику управління екологічною безпекою у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями, на основі розподілу пошуково-вимірювального ресурсу за пріоритетними зонами контролю, результатів дистанційного та інструментального моніторингу, математичного моделювання поширення небезпечних чинників і оцінювання екологічного ризику як складових технології захисту навколишнього природного середовища.

1. Встановлено, що сухе контейнерне зберігання є одним з основних підходів до проміжного та довгострокового поводження з відпрацьованим ядерним паливом після зниження його залишкового тепловиділення. В Україні сформовано відповідну інфраструктуру, що включає сухі сховища на майданчиках ядерних об'єктів і централізоване сховище у зоні відчуження. Чинна нормативно-правова база регламентує вимоги до ядерної та радіаційної безпеки, фізичного захисту, поводження з ядерним паливом, оцінювання впливу на навколишнє природне середовище і радіаційного контролю, однак переважно орієнтована на штатну експлуатацію, проєктні аварії, природні й техногенні впливи мирного часу. Аварія, спричинена воєнними діями, потребує врахування механічного пошкодження об'єкта, обмеженого доступу, ускладненого інструментального контролю та неповноти первинної інформації. Визначення зон екологічної небезпеки потребує поєднання заходів захисту сухих сховищ відпрацьованого ядерного палива з екологічним і радіаційним моніторингом, математичним моделюванням та дистанційним обстеженням із застосуванням безпілотних літальних апаратів.

2. Удосконалено систему оцінювання стану екологічної безпеки у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями, шляхом поєднання небезпечних чинників, критеріїв стану компонентів довкілля, шляхів поширення радіоактивного забруднення та показників інформаційної невизначеності. На відміну від підходів, орієнтованих переважно на радіаційний контроль і технічний стан об'єкта, запропонована система дає змогу визначати пріоритетні зони пошуково-вимірювального контролю, уточнювати кількісні та якісні характеристики географічних меж екологічної безпеки та обґрунтовувати подальші природоохоронні заходи.

3. Розроблено математичну модель моніторингу стану навколишнього природного середовища у зоні впливу сухого сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії, спричиненої воєнними діями. У моделі зона можливого аварійного забруднення розглядається як об'єкт пошуку з невизначеним просторовим положенням, що уточнюється на основі апріорних і апостеріорних ймовірностей, результатів дистанційного обстеження, інструментальних вимірювань, пошуково-вимірювальних ресурсів та ефективності виявлення. Модель враховує пріоритетність ділянок контролю, обмеження доступу, інформаційну невизначеність, технічні характеристики БпЛА і часові обмеження, що дає змогу обґрунтовувати черговість обстеження території, розподіляти ресурс і уточнювати положення потенційно небезпечних зон.

4. Розроблено методику управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями, яка поєднує аналітично-розрахунковий, пошуково-вимірювальний та управлінський блоки. Методика охоплює послідовний цикл процедур: фіксацію аварійного впливу, ідентифікацію небезпечних чинників, формування ділянок контролю, розрахунок їхньої пріоритетності, визначення першочергових зон обстеження, побудову маршруту БпЛА, дистанційний

контроль, уточнення положення небезпечної зони, наземне й лабораторне підтвердження, класифікацію рівня екологічної небезпеки, вибір природоохоронних заходів та повторний контроль їх результативності.

5. Проведено розрахунково-сценарну перевірку достовірності математичної моделі моніторингу та результативності методики управління екологічною безпекою у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями. Перевірку виконано для чотирьох сценаріїв: локального механічного пошкодження, утворення радіоактивного пилу або аерозолів, забруднення технологічних покриттів із подальшим перенесенням поверхневим стоком, а також аварійного впливу за умов невизначеного місця пошкодження та обмеженого доступу. Встановлено, що у трьох сценаріях коефіцієнт охоплення небезпечних ділянок становить 1,00, а у сценарії з невизначеним місцем пошкодження та обмеженим доступом – 0,80. Показано, що пріоритетне обстеження дає змогу виявити основну частину небезпечних ділянок після перевірки 40–60 % території. За тривалості БпЛА-обстеження близько 20 хв і швидкості польоту до 4–5 м/с досягаються імовірність виявлення радіаційної аномалії 0,84, коефіцієнт покриття 0,84 та зменшення інформаційної невизначеності не менше ніж на 50 %. Після виконання природоохоронних заходів середнє значення інтегрального показника екологічної небезпеки зменшилося з 0,65 до 0,37, тобто приблизно на 43 %. Отримані результати підтверджують працездатність запропонованої моделі та методики для визначення пріоритетних зон контролю, уточнення стану можливого радіоактивного забруднення й вибору природоохоронних заходів.

6. Розроблено практичні рекомендації щодо застосування результатів дисертаційного дослідження для забезпечення екологічної безпеки у разі аварії на сухому сховищі відпрацьованого ядерного палива, спричиненої воєнними діями. Запропоновані рекомендації визначають порядок організації екологічного та радіаційного моніторингу у зоні впливу сховища, поєднання

стаціонарних, мобільних, дистанційних і лабораторних засобів контролю, встановлення пріоритетних ділянок обстеження, уточнення меж можливого радіоактивного забруднення та вибір природоохоронних заходів за результатами математичного моделювання. Практичне застосування рекомендацій передбачає послідовний перехід від фіксації аварійного впливу та збору первинної інформації до ранжування ділянок контролю, проведення БПЛА-обстеження, наземного й лабораторного підтвердження, визначення режиму кожної ділянки та повторної перевірки результативності виконаних дій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Освітньо-наукова програма вищої освіти «Техногенно-екологічна безпека» за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища» галузі знань 18 «Виробництво та технології». *Національний університет цивільного захисту України*. URL: https://nuczu.edu.ua/images/topmenu/osvitnya_diyalnosti/osvitni_programi/2022/1_83_teb_dok.pdf.
2. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. *Верховна Рада України. Законодавство України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text>.
3. Про заходи з підтримки розвитку ядерної енергетики та підвищення рівня безпеки у сфері використання ядерної енергії : Указ Президента України від 4 квітня 2019 р. № 104/2019. *Президент України*. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/1042019-26402>.
4. Стратегічний план розвитку Державного підприємства «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» на 2024–2028 роки : затверджений Державною інспекцією ядерного регулювання України 26 квітня 2023 р. *Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки*. URL: <https://sstc.ua/strategichnij-plan-rozvitku>.
5. The Database on Nuclear Power Reactors. *IAEA PRIS*. URL: <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>.
6. Nuclear Power in the World Today. *World Nuclear Association*. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today>.
7. Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. General Safety Requirements. GSR Part 7. Vienna : IAEA, 2015. URL:

<https://www.iaea.org/publications/10905/preparedness-and-response-for-a-nuclear-or-radiological-emergency>.

8. Arrangements for Preparedness for a Nuclear or Radiological Emergency. Safety Guide. Vienna : IAEA, 2007. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1265web.pdf>.

9. Initial Views on the Review and Revision of the System of Radiological Protection. Paris : OECD Publishing, 2023. *OECD Nuclear Energy Agency*. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_81152/initial-views-on-the-review-and-revision-of-the-system-of-radiological-protection?details=true.

10. Kim B.-J., Kim M., Hahm D., Park J., Han K.-Y. Probabilistic Flood Assessment Methodology for Nuclear Power Plants Considering Extreme Rainfall. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 9. Article 2600. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14092600>.

11. Huang Y.-N., Whittaker A. S., Luco N. A probabilistic seismic risk assessment procedure for nuclear power plants: (I) Methodology. *Nuclear Engineering and Design*. 2011. Vol. 241, № 9. P. 3996–4003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.06.051>.

12. Safety Aspects of Nuclear Power Plants in Human Induced External Events: Assessment of Structures. Vienna : IAEA, 2018. *International Atomic Energy Agency*. URL: <https://www.iaea.org/publications/10953/safety-aspects-of-nuclear-power-plants-in-human-induced-external-events-assessment-of-structures>.

13. Fire Probabilistic Safety Assessments for Nuclear Power Plants: 2019 Update : CSNI Technical Opinion Paper No. 17. Paris : OECD/NEA, 2019. *OECD Nuclear Energy Agency*. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2019/05/fire-probabilistic-safety-assessments-for-nuclear-power-plants_c08e6e17/2581e46c-en.pdf.

14. Liu T., Wu Z., Bensi M., Ma Z. A mechanistic model of a PWR-based nuclear power plant in response to external hazard-induced station blackout

accidents. *Frontiers in Energy Research*. 2023. Vol. 11. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1191467>.

15. Storage and Disposal of Radioactive Waste. *World Nuclear Association*. 2024. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste>.

16. Storage of Spent Nuclear Fuel : Specific Safety Guide No. SSG-15 (Rev. 1). Vienna : IAEA, 2020. *International Atomic Energy Agency*. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1882_web.pdf.

17. Waste and Spent Fuel Storage Safety Reference Levels : report. *WENRA*. 2024. URL: https://www.wenra.eu/sites/default/files/publications/WENRA_WGWD_StorageReport_v2_3_January2024.pdf.

18. Take a final look inside the 1,500ft-deep underground tunnels that will soon be shut off to humans for 100,000 YEARS. *The Sun*. 2025. URL: <https://www.thesun.co.uk/news/32065256/final-look-inside-deep-underground-tunnels-finland/>.

19. Foley T. J. Waiting for waste: Nuclear imagination and the politics of distant futures in Finland. *Energy Research & Social Science*. 2021. Vol. 72. Article 101867. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214629620304424>.

20. Sweden starts building 100,000 year storage site for spent nuclear fuel. *Reuters*. 2025. URL: <https://www.reuters.com/business/energy/sweden-starts-building-100000-year-storage-site-spent-nuclear-fuel-2025-01-15/>.

21. Nuclear Power in Ukraine. *World Nuclear Association*. URL: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/ukraine>.

22. Звіт про діяльність Державної інспекції ядерного регулювання України за 2024 рік. 127 с. *Кабінет Міністрів України*. URL:

https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/17-civik-2018/zvit_2024/zvit_atom_2024.pdf.

23. Ukraine. National Report. On Compliance with Obligations under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. 2025. 150 p. IAEA. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/2025-08/ukraine-national-report-8rm.pdf>.

24. Чорнобильській АЕС схвалили видачу ліцензії на сховище ядерного палива. *Укрінформ*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3232914-cornobilskij-aes-shvalili-vidacu-licenzii-na-shovise-adernogo-paliva.html>.

25. Ядерні відходи ЧАЕС почали перевозити в «сухе» сховище. *UA-Energy*. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/yaderni-vidkhody-chaes-pochaly-perevozyty-v-sukhe-skhovyshche>.

26. Промислова експлуатація СВЯП-2 розпочнеться найближчим часом! *Державне спеціалізоване підприємство «Чорнобильська АЕС»*. URL: <https://chnpp.gov.ua/ua/infotsentr/novyny/5785-promislovu-ekspluatatsiyu-svyap-2-rozpochato>.

27. Нетехнічне резюме матеріалів з обґрунтування безпеки продовження терміну експлуатації енергоблоків № 3, 4 ВП «Запорізька АЕС» у понадпроектний строк. *Нікопольська міська рада*. URL: https://nikopol-mrada.dp.gov.ua/ekolog/ntr_znpp_34_20170217_ukr.pdf.

28. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України від 08.02.1995 р. № 39/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80>.

29. Про поводження з радіоактивними відходами : Закон України від 30.06.1995 р. № 255/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/255/95-%D0%B2%D1%80>.

30. Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання : Закон України від 14.01.1998 р. № 15/98-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/15/98-%D0%B2%D1%80>.

31. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України : ДСП 6.177-2005-09-02 (ОСПУ-2005). Затв. наказом Міністерства охорони здоров'я України від 02.02.2005 № 54. Зареєстр. в Міністерстві юстиції України 20.05.2005 за № 552/10832. Київ : МОЗ України, 2005. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0552-05>.

32. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 р. № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>.

33. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23.05.2017 р. № 2059-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text>.

34. Про стратегічну екологічну оцінку : Закон України від 20.03.2018 р. № 2354-VIII. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/T182354>.

35. Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання : Закон України від 19.10.2000 р. № 2064-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2064-14>.

36. Про порядок прийняття рішень про розміщення, проектування, будівництво ядерних установок і об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами, які мають загальнодержавне значення : Закон України від 08.09.2005 р. № 2861-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2861-15>.

37. Основні положення забезпечення безпеки проміжних сховищ відпрацьованого ядерного палива сухого типу : НП 306.2.105-2004. Затв. наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 29.12.2004 № 198. Зареєстр. в Міністерстві юстиції України 17.01.2005 за № 49/10329. Київ : Держатомрегулювання України, 2004. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0049-05#Text>.

38. Вимоги безпеки під час поводження з ядерним паливом : НП 306.2.221-2019. Затв. наказом Державної інспекції ядерного регулювання

України від 21.06.2019 № 269. Зареєстр. в Міністерстві юстиції України 30.07.2019 за № 833/33804. Київ : Державна інспекція ядерного регулювання України, 2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0833-19#Text>.

39. Загальні положення безпеки атомних станцій : НП 306.2.245-2024. Затв. наказом Державної інспекції ядерного регулювання України від 04.03.2024 № 195 ; із змінами, внесеними наказом від 30.04.2024 № 422. Зареєстр. в Міністерстві юстиції України 25.04.2024 за № 598/41943. Київ : Державна інспекція ядерного регулювання України, 2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0598-24#Text>.

40. Вимоги до оцінки безпеки атомних станцій : НП 306.2.162-2010. Затв. наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 22.09.2010 № 124. Зареєстр. в Міністерстві юстиції України 21.10.2010 за № 964/18259. Київ : Держатомрегулювання України, 2010. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0964-10#Text>.

41. Вимоги до оцінки безпеки атомних станцій щодо зовнішніх впливів природного характеру : НП 306.2.245-2021. Затв. наказом Державної інспекції ядерного регулювання України від 30.04.2021 № 263. Зареєстр. в Міністерстві юстиції України 24.06.2021 за № 841/36463. Київ : Державна інспекція ядерного регулювання України, 2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0841-21>.

42. Ukraine: Current status of nuclear power installations. *OECD Nuclear Energy Agency*. 2025. URL: https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_66130/ukraine-current-status-of-nuclear-power-installations.

43. Update 259 – IAEA Director General Statement on Situation in Ukraine. *International Atomic Energy Agency*. 2024. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/pressreleases/update-259-iaea-director-general-statement-on-situation-in-ukraine>.

44. Kuzmiak I., Dimitriieva D., Pashchenko V., Pecherytsia O., Melnyk A. Regulation of nuclear security in Ukraine: contributions from international technical

assistance projects. *Journal of Radiological Protection*. 2025. Vol. 45, № 3. Article 031525. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ae0343>.

45. Копішинська К. О., Широкова І. С. Сучасний стан та перспективи інноваційного розвитку атомної енергетики України. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. 2019. № 16. С. 350–359. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.16.2019.182742>.

46. Ukrainian Regulatory Threat Assessment 2024 : DSA Report 02-2025. *Norwegian Radiation and Nuclear Safety Authority*. 2025. 121 p. URL: <https://www.dsa.no/publikasjoner/dsa-rapport-02-2025-ukrainian-regulatory-threat-assessment-2024/DSA%20Report%2002-2025%20Ukrainian%20Regulatory%20Threat%20Assessment%202024.pdf>.

47. Краснов В. А., Рашкевич Н. В. Підходи до оцінювання техногенно-екологічних наслідків ракетно-артилерійських уражень. *Problems of Emergency Situations* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси : НУЦЗ України, 2026. С. 452–453. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28455>.

48. 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>.

49. 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>.

50. Смірнов А. В., Краснов В. А., Сербин В. А. Оцінка екологічного стану території навколо сховища відпрацьованого ядерного палива. *Безпека людини у сучасних умовах* : збірник доповідей XVII Міжнародної науково-методичної конференції, м. Харків, 4–5 грудня 2025 р. Харків : НТУ «ХПІ»,

2025. C. 152–153. URL:
<http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28291>.

51. Краснов В., Рашкевич Н., Шевченко О., Погрібна Ю., Тригуб В. Розробка технології управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива. *Social Development and Security*. 2026. Vol. 16, No. 2. P. 173–185. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.15>.

52. 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>.

53. Weiss C. et al. Assessment of Spent Nuclear Fuel in Ukrainian Storage System: Inventory and Performance. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 8. Article 1945. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17081945>.

54. The vulnerability of nuclear plants during military conflict. *Greenpeace*. 2022. URL: <https://www.greenpeace.org/static/planet4-international-stateless/2022/03/559dfc6b-nuclear-power-plants-in-military-conflict-yuzhnoukrainsk-south-ukraine-briefing.pdf>.

55. Dangerous Targets: Civilian Nuclear Infrastructure and the War in Ukraine. *Royal United Services Institute (RUSI)*. 2022. URL: <https://www.rusi.org/explore-our-research/publications/special-resources/dangerous-targets-civilian-nuclear-infrastructure-and-war-ukraine>.

56. Nuclear Safety, Security and Safeguards in Ukraine. *International Atomic Energy Agency*. URL: <https://www.iaea.org/topics/response/nuclear-safety-security-and-safeguards-in-ukraine>.

57. Off-site power is being restored to Ukraine's Zaporizhzhia nuclear plant. *AP News*. 2025. URL: <https://apnews.com/article/ukraine-zaporizhzhia-nuclear-plant-repairs-2d5c046e85cb666fb84482b132f15898>.

58. Kikuchi M. A Vulnerability Related to Dry Storage of Spent Fuels. *Nautilus Institute*. 2017. URL: <https://nautilus.org/napsnet/napsnet-special-reports/a-vulnerability-related-to-dry-storage-of-spent-fuels/>.

59. Bednarek A., Newman A. Security and Proliferation Risks Associated with Management of Spent Nuclear Fuel. *American Nuclear Society*. 2019. URL: https://media.nti.org/documents/Security_Proliferation_Risks_Associated_with_Management_of_SNF_ANS_2019_proceedings.pdf.

60. The risks of war in a nuclear state. *Deutsche Welle (DW)*. 2022. URL: <https://www.dw.com/en/ukraine-the-risks-of-war-in-a-nuclear-state/a-60963926>.

61. The 2007 Recommendations of the ICRP : ICRP Publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007. Vol. 37, № 2–4. URL: [https://www.icrp.org/docs/icrp_publication_103-annals_of_the_icrp_37\(2-4\)-free_extract.pdf](https://www.icrp.org/docs/icrp_publication_103-annals_of_the_icrp_37(2-4)-free_extract.pdf).

62. Конвенція про ядерну безпеку. *Верховна Рада України. Законодавство України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_023#Text.

63. Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-making and Access to Justice in Environmental Matters (Aarhus Convention). *United Nations Economic Commission for Europe*. URL: <https://unece.org/fileadmin/DAM/env/pp/documents/cep43e.pdf>.

64. Safety of Nuclear Power Plants: Design : Specific Safety Requirements SSR-2/1 (Rev. 1). Vienna : IAEA, 2021. *International Atomic Energy Agency*. URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1715web-46541668.pdf>.

65. Wei C., Xu S., Zou S., Zhao F., Qin Z., Dong H., Hou Z. Risk Analysis and Evaluation of Nuclear Security Radiation Events in Spent Fuel Reprocessing Plants. *Sustainability*. 2022. Vol. 15, No. 1. Article 781. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010781>.

66. Han X., Xu J., Li Y., Bai B., Chang Z., Zhang S., Wang S. et al. Progress in passive spent fuel pool cooling system R&D based on heat pipe technology. *Progress in Nuclear Energy*. 2024. Vol. 175. Article 105335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105335>.

67. 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. Article 3990. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16103990>.

68. Rochman D., Algora A., Álvarez-Velarde F., Bardelay A., Bremnes Ø., Cabellos O., Žerovnik G. et al. An introduction to Spent Nuclear Fuel decay heat for Light Water Reactors: a review from the NEA WPNCs. *EPJ Nuclear Sciences and Technologies*. 2024. Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2024010>.

69. Yoo H. S., Yoo S. H., Kim E. S. Heat transfer enhancement in dry cask storage for nuclear spent fuel using additive high density inert gas. *Annals of Nuclear Energy*. 2019. Vol. 132. P. 108–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.04.018>.

70. Guillen D. P. Review of passive heat removal strategies for nuclear microreactor systems. *Nuclear Technology*. 2022. Vol. 209, Suppl. 1. P. S21–S40. DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2022.2055701>.

71. Solans V., Branger E., Grape S., Sjöstrand H. MODENA project: decay heat prediction using non-destructive assay. *EPJ Nuclear Sciences and Technologies*. 2025. Vol. 11. Article 51. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2025042>.

72. Istavara A., Ratiko R., Aziz M., Aisyah A., Nasruddin N. Optimization of heat removal and radiation protection of dry cask storage for MTR spent nuclear fuel. *Annals of Nuclear Energy*. 2023. Vol. 186. Article 109749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.109749>.

73. Welcome to sCO₂ -HeRo! *University of Duisburg-Essen*. URL: <https://www.uni-due.de/maschinenbau/sco2-hero/index.php>.

74. Hacks A. J. Experimental investigation of the sCO₂ -HeRo compressor. *2nd European Supercritical CO₂ Conference*, Essen, Germany, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17185/duepublico/46088>.

75. Hansel J., Andrs D., Charlot L., Giudicelli G. The MOOSE thermal hydraulics module. *Journal of Open Source Software*. 2024. Vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.06146>.

76. Shaver D., Fang J., Yuan H., Min M., Merzari E., Lan Y. H. Full-Core Computational Fluid Dynamics Simulations Using NekRS. *20th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH 2023*. American Nuclear Society, 2023. P. 1290–1301. DOI: <https://doi.org/10.13182/NURETH20-40874>.

77. Fenton C. H., Adams J., Halchuk S. Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity. *Geotechnical & Geological Engineering*. 2006. Vol. 24, № 3. P. 579–592. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-005-1148-4>.

78. Tsang C. F., Neretnieks I., Tsang Y. Hydrologic issues associated with nuclear waste repositories. *Water Resources Research*. 2015. Vol. 51, № 9. P. 6923–6972. DOI: <https://doi.org/10.1002/2015WR017641>.

79. Fire Protection Activities for Fuel Cycle Facilities. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. 2023. URL: <https://www.nrc.gov/materials/fuel-cycle-fac/fire-protection/fp-activities>.

80. Backgrounder on Fire Protection for Nuclear Power Plants. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. 2022. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/fire-protection-fs>.

81. Protection against Internal Hazards in the Design of Nuclear Facilities : IAEA Safety Reports Series No. 94. Vienna : IAEA, 2018. *International Atomic Energy Agency*. URL: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/05/ds494.pdf>.

82. Handling and Storage of Hazardous Materials. *University of Colorado Colorado Springs*. 2019. URL: https://dcss.uccs.edu/sites/g/files/kjihxj1296/files/inline-files/UCCS.HMMP%20Attachment%20D%20-%20Handling%20and%20Storage%20of%20Hazardous%20Materials_0.pdf.

83. Planning zones. *Nuclear Safety: An Information Portal of the Federal Government and the Länder*. 2025. URL: <https://www.nuklearesicherheit.de/en/nuclear-emergency-preparedness-and-response/preparing-for-an-emergency/planning-zones/>.
84. Nuclear Reactor Access Zones. *Union of Concerned Scientists*. URL: <https://www.ucs.org/resources/nuclear-reactor-access-zones>.
85. The Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Rev.4) and guidance for implementation. Vienna : IAEA, 2011. *International Atomic Energy Agency*. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_967rev1_prn.pdf.
86. Physical protection (domestic) – overview and regulatory framework (10 CFR Part 73). *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. URL: <https://www.nrc.gov/security/domestic/phys-protect.html>.
87. Regulatory Guides and Draft Guidance on Perimeter Intrusion Alarm Systems and Physical Protection. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2220/ML22203A131.pdf>.
88. Evaluation of Physical Protection Systems at Nuclear Facilities : guidance. Vienna : IAEA, 2019. *International Atomic Energy Agency*. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/p15745-PUB2104_web.pdf.
89. Technical reports on hardened structural design for protection against blast and fragmentation. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2326/ML23263A997.pdf>.
90. Designing Blast Hardened Structures for Military and Civilian Use. *AMPTIAC*. URL: <https://humanitarianlibrary.org/sites/default/files/2020/10/AMPTIAC%20-%20Designing%20Blast%20Hardened%20Structures%20for%20Military%20and%20Civilian%20Use.pdf>.

91. Managing Aging Effects on Dry Cask Storage Systems for Extended Long-Term Storage and Transportation of Used Fuel. Revision 2. *Argonne National Laboratory*. 2014. URL: <https://publications.anl.gov/anlpubs/2014/09/107500.pdf>.

92. Ageing Management Programs for Spent Fuel Dry Storage. *International Atomic Energy Agency*. 2022. URL: <https://rampac.energy.gov/docs/default-source/storage/amp-crp-iaea-ihlrwmc-2022.pdf>.

93. Implementation of Aging Management Requirements for Spent Fuel Storage Renewals. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. 2020. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML2028/ML20282A298.pdf>.

94. U.S. Spent Nuclear Fuel and Reprocessing Waste Inventory. *Pacific Northwest National Laboratory*. 2023. URL: https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-33938.pdf.

95. Safety of Spent Fuel Storage. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. 2017. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1710/ML17108A306.pdf>.

96. Reactor License Renewal Inspections. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. 2023. URL: <https://www.nrc.gov/reactors/operating/licensing/renewal/introduction/inspections>.

97. Battery Backup for Nuclear Power Plants. *Nuclear Engineering International*. 2021. URL: <https://www.neimagazine.com/advanced-reactorsfusion/battery-backup-for-nuclear-power-plants-8037728/>.

98. Operation and Maintenance of Spent Fuel Storage and Transportation Systems. Vienna : IAEA, 2010. *International Atomic Energy Agency*. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1532_web.pdf.

99. Nuclear Fuels Storage and Transportation Requirements Document. *U.S. Department of Energy*. 2016. URL: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/10/f33/FCRD-NFST-2013-000330%20-%20Rev2%20with%20attachments.pdf>.

100. Mouschoutzi M., Ponis S. T. A comprehensive literature review on spare parts logistics management in the maritime industry. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*. 2022. Vol. 38, № 2. P. 71–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.12.003>.

101. Contingency and Disaster Relief Operations. *Defense Logistics Agency*. 2024. URL: https://www.dla.mil/Portals/104/Documents/J3LogisticOperations/CustomerSupport/Commodity%20Self-Help%20Book_15NOV2024.p.

102. Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection : Safety Standards Series No. RS-G-1.8. Vienna : IAEA, 2005. *International Atomic Energy Agency*. URL: <https://www.iaea.org/publications/7176/environmental-and-source-monitoring-for-purposes-of-radiation-protection>.

103. Programmes and Systems for Source and Environmental Radiation Monitoring. Vienna : IAEA, 2010. *International Atomic Energy Agency*. URL: <https://www.iaea.org/publications/8242/programmes-and-systems-for-source-and-environmental-radiation-monitoring>.

104. Environmental Protection in New Nuclear Power Programmes : Nuclear Energy Series No. NG-T-3.11 (Rev. 1). Vienna : IAEA, 2022. *International Atomic Energy Agency*. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB2076_web.pdf.

105. Accident Monitoring Systems for Nuclear Power Plants : Nuclear Energy Series No. NP-T-3.16. Vienna : IAEA, 2015. *International Atomic Energy Agency*. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1676_web.pdf.

106. Environmental Radiological Monitoring: Planning and Implementing Your Programme. *UK Government*. London, 2024. URL: <https://www.gov.uk/guidance/environmental-radiological-monitoring-planning-and-implementing/context-and-scope>.

107. Рашкевич Н. В., Мележик Р. С., Перегін А. В., Краснов В. А. Оцінка забруднення ґрунтів у районах ураження ракетно-артилерійських систем за показниками електропровідності. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2025. № 2(42). С. 294–303. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2025-42-19>.
108. 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>.
109. Державне агентство з управління зоною відчуження. *ДАЗВ*. URL: <https://dazv.gov.ua>.
110. Про затвердження Положення про Державну інспекцію ядерного регулювання України : Постанова Кабінету Міністрів України від 20 серпня 2014 р. № 363. *Верховна Рада України. Законодавство України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/363-2014-%D0%BF#Text>.
111. Український гідрометеорологічний центр Державної служби України з надзвичайних ситуацій. *Український гідрометеорологічний центр*. URL: <https://www.meteo.gov.ua>.
112. Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія „Енергоатом“». *Енергоатом*. URL: <https://energoatom.com.ua>.
113. Omori Y., Sasaki R., Otsuki Y., Sorimachi A., Ishikawa T. Walking survey technique for ambient gamma dose rate measurement established in Fukushima Medical University. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2022. Vol. 59, № 8. P. 1061–1070. DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2021.2023370>.
114. Chaplin J. D., Christl M., Straub M., Bochud F., Froidevaux P. Passive sampling tool for actinides in spent nuclear fuel pools. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7, № 23. P. 20053–20058. URL: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsomega.2c01884>.
115. Nabavi S. O., Christoudias T., Proestos Y., Fountoukis C., Al-Sulaiti H., Lelieveld J. Spatiotemporal variation of radionuclide dispersion from nuclear power

plant accidents using FLEXPART mini-ensemble modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2023. Vol. 23, № 13. P. 7719–7739. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-23-7719-2023>.

116. Li Y., Wang T., Wang J., Guo W., Li W., Qiu H., Lv M. et al. Research on predicting the diffusion of radionuclide in complex building scenarios based on a hybrid deep learning model. *Nuclear Engineering and Design*. 2025. Vol. 441. Article 114187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.114187>.

117. Sangiorgi M., Hernández-Ceballos M. A., Bolivar J. P. Analysing the performance of radiological monitoring network during nuclear accidents. *Progress in Nuclear Energy*. 2023. Vol. 160. Article 104689. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104689>.

118. Radiation Monitoring Systems (RMS). *Mirion Technologies*. URL: <https://www.mirion.com/products/radiation-monitoring-systems>.

119. Gellenoncourt A., Ayoub A., Wainwright H. M. Optimizing radiation monitoring networks to improve emergency response strategies during nuclear power plant accidents. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15, No. 1. Article 11914. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95571-0>.

120. Marques L., Vale A., Vaz P. State-of-the-art mobile radiation detection systems for different scenarios. *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 4. Article 1051. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041051>.

121. AT1123 X-Ray and Gamma Radiation Survey Meter. *Atomtex*. URL: <https://atomtex-usa.com/product/at1123-x-ray-and-gamma-radiation-survey-meter/>.

122. 115. Nouri Rahmat Abadi B., West A., Peel H., Nancekievill M., Ballard C., Lennox B., Groves K. et al. CARMA II: A ground vehicle for autonomous surveying of alpha, beta and gamma radiation. *Frontiers in Robotics and AI*. 2023. Vol. 10. Article 1137750. DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2023.1137750>.

123. Ahmad M. I., Ab. Rahim M. H., Nordin R., Mohamed F., Abu-Samah A., Abdullah N. F. Ionizing radiation monitoring technology at the verge of internet

of things. *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 22. Article 7629. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21227629>.

124. TERRA Cloud – Automated Radiation Monitoring System. *ECOTEST*. URL: <https://ecotestgroup.com/products/terra-cloud/>.

125. Zhong N., Li L., Yang X., Zhao Y. Analytical Methods for the Determination of ^{90}Sr and $^{239,240}\text{Pu}$ in Environmental Samples. *Molecules*. 2022. Vol. 27, № 6. Article 1912. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27061912>.

126. Cherkashina A. et al. Radionuclide analysis using collision–reaction cell ICP-MS technology. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2020. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ja/d0ja00211a>.

127. Zheng J., Sahoo S. K., Aono T. Recent progress on mass spectrometric analysis of artificial radionuclides in environmental samples collected in Japan. *Nuclear Analysis*. 2022. Vol. 1, № 3. Article 100025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucana.2022.100025>.

128. Development of a single method for direct measurement of multiple radionuclides by ICP-MS. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*. 2023. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/ja/d2ja00174h>.

129. Elsenbawy A., Pates J. M., Kamel N. H., Morsi T., Mekewi M., El-Gamal A., Zhang H. et al. Development of a Novel DGT Passive Sampler for Measuring Cs-137 In Situ in Marine Environments. *Analytical Chemistry*. 2024. Vol. 96, № 8. P. 3300–3307. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.3c03767>.

130. Rizzo A., Antonacci G., Borra E., Cardellini F., Ciciani L., Sperandio L., Vilardi I. Environmental gamma dose rate monitoring and radon correlations: evidence and potential applications. *Environments*. 2022. Vol. 9, № 6. Article 66. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments9060066>.

131. Wu Z., Wang B., Sun J., Wang Y., Zhao C. In-situ γ -ray analysis of ground surface radioactivity using portable HPGe γ spectrometer. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, № 1. Article 9418. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13770-5>.

132. Cantaluppi C., Zannoni D., Cianchi A., Giacetti W., Lovisetto B., Pagnin E., Favero T. Methods for radioactivity measurements in drinking water using gamma spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 232. Article 106566. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106566>.

133. Anand R., Harshith K., Raghavan A., Maddara R., Anand P. Automated UAV to survey and monitor ionising radiation levels in a closed environment. *Power Electronics and Drives*. 2022. Vol. 7. URL: <https://sciendo.com/article/10.2478/pead-2022-0010>.

134. Leelőssy Á., Lagzi I., Kovács A., Mészáros R. A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2018. Vol. 182. P. 20–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.009>.

135. Galmarini S., Bianconi R., Bellasio R., Graziani G. Forecasting the consequences of accidental releases of radionuclides in the atmosphere from ensemble dispersion modelling. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2001. Vol. 57, № 3. P. 203–219. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0265-931X\(01\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0265-931X(01)00017-0).

136. Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., Stunder B. J., Cohen M. D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2015. Vol. 96, № 12. P. 2059–2077. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.

137. Brioude J., Arnold D., Stohl A., Cassiani M., Morton D., Seibert P., Wotawa G. et al. The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1. *Geoscientific Model Development*. 2013. Vol. 6, № 6. P. 1889–1904. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-6-1889-2013>.

138. RASCAL: Description of Models and Methods (NUREGs) – operational consequence assessment tool for nuclear incidents. *U.S. Nuclear Regulatory Commission*. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/staff/sr1887/index>.

139. Evangeliou N., Hamburger T., Cozic A., Balkanski Y., Stohl A. Inverse modeling of the Chernobyl source term using atmospheric concentration and deposition measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017. Vol. 17, № 14. P. 8805–8824. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-17-8805-2017>.
140. Quélo D., Sportisse B., Isnard O. Data assimilation for short range atmospheric dispersion of radionuclides: a case study of second-order sensitivity. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2005. Vol. 84, № 3. P. 393–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.04.011>.
141. Langevin C. D., Provost A. M., Panday S., Hughes J. D. Documentation for the MODFLOW 6 groundwater transport model. *U.S. Geological Survey*. 2022. No. 6-A61. DOI: <https://doi.org/10.3133/tm6A61>.
142. Рашкевич Н. В., Шевченко О. С., Краснов В. А. Моделювання процесу пошуку джерел забруднення водних об'єктів в умовах сучасних військових загроз. *Maritime Security of the Baltic-Black Sea Region: Challenges and Threats* : proceedings of the V International Scientific Conference. Riga : Baltija Publishing, 2025. P. 42–45. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26737>.
143. Hutchinson M., Oh H., Chen W. H. A review of source term estimation methods for atmospheric dispersion events using static or mobile sensors. *Information Fusion*. 2017. Vol. 36. P. 130–148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2016.11.010>.
144. Saindane S., Pujari R. N., Murali S., Narsaiah M. V. R., Dhole S. D., Karmalkar N. R. Environmental radiation mapping methodology and applications. *Radiation Protection and Environment*. 2020. Vol. 43, № 2. P. 94–99. DOI: https://doi.org/10.4103/rpe.RPE_35_20.
145. Aerial Measuring System Technical Integration Annual Report 2002. *Remote Sensing Laboratory*. URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/812387>.

146. Present and Future Environmental Impact of the Chernobyl Accident. *International Atomic Energy Agency*. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1240_prn.pdf.
147. Pence J., Miller I., Sakurahara T., Whitacre J., Reihani S., Kee E., Mohaghegh Z. GIS-based integration of social vulnerability and level 3 probabilistic risk assessment to advance emergency preparedness, planning, and response for severe nuclear power plant accidents. *Risk Analysis*. 2019. Vol. 39, № 6. P. 1262–1280. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.13241>.
148. Nagata T., Kimura Y., Ishii M. Use of a geographic information system (GIS) in the medical response to the Fukushima nuclear disaster in Japan. *Prehospital and Disaster Medicine*. 2012. Vol. 27, № 2. P. 213–215. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1049023X1200060X>.
149. Zhang Y. Online-coupled meteorology and chemistry models: history, current status, and outlook. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008. Vol. 8, № 11. P. 2895–2932. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-8-2895-2008>.
150. Balakay L. GIS Modelling of Radionuclide Transport from the Semipalatinsk Test Site (MigRad project). *EGU General Assembly*. 2009. URL: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-8596.pdf>.
151. Lin Y., Hoover J., Beene D., Erdei E., Liu Z. Environmental risk mapping of potential abandoned uranium mine contamination on the Navajo Nation, USA, using a GIS-based multi-criteria decision analysis approach. *Environmental Science and Pollution Research*. 2020. Vol. 27, № 24. P. 30542–30557. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09257-3>.
152. 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>.
153. Краснов В. А., Рашкевич Н. В., Рашкевич О. С. Моніторинг

територій навколо сховищ відпрацьованого ядерного палива. *Інформаційні технології в сучасному світі* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених. Харків : Державний біотехнологічний університет, 2026. С. 353–356. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28456>.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, у яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз:

1. 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>.

Особисто здобувачем проаналізовано умови формування небезпеки на забруднених територіях, узагальнено чинники просторово-часового поширення небезпечних речовин та обґрунтовано підходи до математичного опису зон екологічної небезпеки.

2. Рашкевич Н.В., Мележик Р.С., Перегін А.В., **Краснов В.А.** Оцінка забруднення ґрунтів у районах ураження ракетно-артилерійських систем за показниками електропровідності. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2025. № 2(42). С. 294–303. DOI: <https://doi.org/10.52363/2524-0226-2025-42-19>.

Особисто здобувачем проаналізовано підходи до оцінювання забруднення ґрунтів у районах воєнного ураження, обґрунтовано використання показників електропровідності та узагальнено результати для формування критеріїв екологічної безпеки.

3. **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>.

Особисто здобувачем сформовано постановку задачі оцінювання радіаційного впливу, визначено чинники радіаційної небезпеки та обґрунтовано необхідність поєднання радіаційного контролю з математичним моделюванням.

4. 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>.

Особисто здобувачем проаналізовано особливості забруднення ґрунтів та ґрунтових вод, обґрунтовано підходи до інтегрованого оцінювання стану довкілля та використання результатів моделювання для просторового зонування території.

5. 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>.

Особисто здобувачем розроблено підходи до геопросторового профілювання території можливого радіаційного забруднення та обґрунтовано процедури виділення ділянок першочергового обстеження.

6. **Краснов В.**, Рашкевич Н., Шевченко О., Погрібна Ю., Тригуб В. Розробка технології управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива. *Social Development and Security*. 2026. Vol. 16, No. 2. P. 173–185. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.2.15>.

Особисто здобувачем розроблено структурну побудову методики управління екологічною безпекою сухого сховища ВЯП, обґрунтовано поєднання аналітично-розрахункового, пошуково-вимірювального та управлінського блоків і визначено послідовність вибору природоохоронних заходів.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Смірнов А. В., **Краснов В. А.**, Сербин В. А. Оцінка екологічного стану території навколо сховища відпрацьованого ядерного палива. *Безпека людини*

у сучасних умовах : збірник доповідей XVII Міжнародної науково-методичної конференції, м. Харків, 4–5 грудня 2025 р. Харків : НТУ «ХП», 2025. С. 152–153. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28291>.

Особисто здобувачем проаналізовано чинники впливу на екологічний стан території навколо сховища ВЯП, визначено основні показники контролю стану довкілля та обґрунтовано необхідність поєднання радіаційного моніторингу з просторовим аналізом прилеглих територій.

8. Рашкевич Н. В., Шевченко О. С., **Краснов В. А.** Моделювання процесу пошуку джерел забруднення водних об'єктів в умовах сучасних військових загроз. *Maritime Security of the Baltic-Black Sea Region: Challenges and Threats* : proceedings of the V International Scientific Conference. Riga : Baltija Publishing, 2025. Р. 42–45. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26737>.

Особисто здобувачем обґрунтовано постановку задачі пошуку джерел забруднення в умовах воєнних дій, визначено чинники просторової невизначеності та запропоновано підходи до розподілу пошукових дій у зоні можливого радіоактивного забруднення.

9. **Краснов В. А.**, Рашкевич Н. В. Підходи до оцінювання техногенно-екологічних наслідків ракетно-артилерійських уражень. *Problems of Emergency Situations* : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси : НУЦЗ України, 2026. С. 452–453. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28455>

Особисто здобувачем систематизовано підходи до оцінювання техногенно-екологічних наслідків ракетно-артилерійських уражень, визначено основні небезпечні чинники та обґрунтовано необхідність урахування просторового поширення забруднення, обмеження доступу і неповноти первинної інформації.

10. **Краснов В. А.**, Рашкевич Н. В., Рашкевич О. С. Моніторинг територій навколо сховищ відпрацьованого ядерного палива. *Інформаційні*

технології в сучасному світі : матеріали Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених. Харків : Державний біотехнологічний університет, 2026. С. 353–356. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/28456>.

Особисто здобувачем обґрунтовано необхідність моніторингу територій навколо сховищ відпрацьованого ядерного палива, визначено роль стаціонарних, мобільних і дистанційних засобів контролю та запропоновано підходи до встановлення пріоритетних ділянок обстеження.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

1. Kondratenko O. M., Andronov V. A., Polishchuk T. R., Kasionkina N. D., **Krasnov V. A.** Accounting the emissions of engine fuel vapors in the criteria-based assessment of the ecological safety level of power plants with reciprocating ICE exploitation process. *Двигуни внутрішнього згоряння*. 2022. № 1. С. 40–50. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.1.06>.

Особисто здобувачем проаналізовано підходи до критеріального оцінювання екологічної безпеки техногенних об'єктів, узагальнено вплив викидів забруднювальних речовин та обґрунтовано використання інтегральних показників для оцінювання екологічної небезпеки.

2. Кондратенко О. М., Андронов В. А., Строков О. П., Бабакін В. М., **Краснов В. А.** Інструментальна похибка відомих формул перерахунку показників димності у показники токсичності відпрацьованих газів поршневіх ДВЗ. *Technogenic and Ecological Safety*. 2022. № 12(2/2022). С. 3–18. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2022.2.1>.

Особисто здобувачем проаналізовано відомі формули перерахунку показників димності у показники токсичності відпрацьованих газів поршневих двигунів внутрішнього згоряння, взято участь в оцінюванні інструментальної похибки цих залежностей та узагальненні результатів розрахунків.

3. Kondratenko O. M., **Krasnov V. A.**, Semykin M. V. The place of DPF with a liquid working body in the classification of atmospheric air protection technologies from the complex negative influence of power plants with reciprocating ICE. *Technogenic and Ecological Safety*. Харків : НУЦЗУ, 2023. № 14(2/2023). С. 67–91. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2023.2.8>.

Особисто здобувачем проаналізовано місце фільтрів твердих частинок із рідким робочим тілом у системі технологій захисту атмосферного повітря, узагальнено їх функціональне призначення та взято участь у класифікації засобів зменшення негативного впливу енергетичних установок із поршневыми двигунами внутрішнього згорання.

4. Kondratenko O. M., **Krasnov V.** Development of the mobile disassembly test bench for experimental study of the ecological safety level of exploitation of firefighting and emergency-rescue equipment with reciprocating ICE and the performance characteristics of the executive devices of EPT. *Technogenic and Ecological Safety*. 2025. № 17(1/2025). P. 37–47. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2025.1.4>.

Особисто здобувачем взято участь у розробленні мобільного розбірного експериментального стенда для дослідження рівня екологічної безпеки експлуатації пожежно-рятувальної техніки з поршневыми двигунами внутрішнього згорання, обґрунтовано його функціональне призначення та проаналізовано можливості використання стенда для оцінювання робочих характеристик виконавчих пристроїв природоохоронних технологій.

5. **Krasnov V. A.**, Kondratenko O. M. Portable test bench for experimental research of the working characteristics of executive elements of environmental protection technologies against the influence of power plants with reciprocating ICE. *Екологічна безпека в умовах війни* : збірник тез доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції, м. Львів, 21 листопада 2024 р. Львів : ЛДУБЖД, 2024. С. 45–46. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/22441>.

Особисто здобувачем обґрунтовано призначення переносного експериментального стенда для дослідження робочих характеристик виконавчих елементів природоохоронних технологій, визначено його функціональні можливості та взято участь у формуванні підходу до експериментального оцінювання ефективності засобів захисту довкілля від впливу енергетичних установок із поршневими двигунами внутрішнього згоряння.

6. Kondratenko O., **Krasnov V.** Designing and developing of portable dismountable test bench for experimental research of the working characteristics of executive elements of environmental protection technologies against the influence of power plants with reciprocating ICE. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії* : збірник тез та доповідей міжнародної конференції, м. Харків, 11–12 березня 2025 р. Харків : ФОП Бровін О. В., 2025. С. 185–188. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/26321>.

Особисто здобувачем взято участь у проектуванні переносного розбірного експериментального стенда для дослідження робочих характеристик виконавчих елементів природоохоронних технологій, обґрунтовано його конструктивні та функціональні особливості, а також можливість застосування для оцінювання засобів зменшення негативного впливу енергетичних установок із поршневими двигунами внутрішнього згоряння.

7. Кондратенко О. М., **Краснов В. А.** Розробка пересувного експериментального стенду для дослідження показників екологічної безпеки пожежно-рятувального транспорту. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : матеріали доповідей XXXIII Міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025, м. Харків, 14–17 травня 2025 р. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. С. 196. URL: http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/26345/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D1%84_%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D1%80%D0%B0%

D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%D0%9E%D0%9C_%D0%94%D0%92%D0%97_MicroCAD-2025.pdf.

Особисто здобувачем взято участь у розробленні пересувного експериментального стенда для дослідження показників екологічної безпеки пожежно-рятувального транспорту, обґрунтовано його призначення та визначено можливість використання для оцінювання впливу технічних засобів із поршневыми двигунами внутрішнього згоряння на стан довкілля.

ДОДАТОК Б**Документи про впровадження результатів дослідження**

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор Комунального Підприємства
«Санітарно-Екологічний центр»
Харківської Міської Ради
Котенко І.О.



« 2026 року

АКТ

**про впровадження результатів дисертації
за темою «Удосконалення технології управління екологічною безпекою у разі
аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива в наслідок воєнних дій»
Краснова В'ячеслава Анатолійовича**

склали даний акт про те, що результати дисертації за темою «Удосконалення технології управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива в наслідок воєнних дій» Краснова В.А. впроваджені в практичну діяльність комунального підприємства ХМР «САНІТАРНО-ЕКОЛОГІЧНИЙ ЦЕНТР» шляхом впровадження розробленої технології управління екологічною безпекою у процесі аналізу техногенно-екологічних ризиків та підготовки інженерно-аналітичних рішень під час оцінювання можливих аварійних ситуацій на об'єктах зберігання відпрацьованого ядерного палива.

Результати дисертаційного дослідження за темою «Удосконалення технології управління екологічною безпекою у разі аварії на сховищі відпрацьованого ядерного палива внаслідок воєнних дій» мають практичну цінність та можуть бути використані в системі екологічного моніторингу, прогнозування та управління безпекою на об'єктах ядерної інфраструктури.

Даний акт не є підставою для одержання премій та інших винагород із фондів Національного університету цивільного захисту України.

Голова комісії:

Котенко І.О.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики
 Національної академії наук України,
 чл.-кор. НАН України, д.т.н., проф.

« 18 » _____ 2017 р. **ПОПОВ**

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ**

результатів дисертаційної роботи
 Краснова В'ячеслава Анатолійовича
 на тему: «Забезпечення екологічної безпеки сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії внаслідок воєнних дій»,
 представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю
 183 «Технології захисту навколишнього середовища»

Комісія у складі: голови – головного наукового співробітника відділу проблем фізичного захисту об'єктів критичної інфраструктури, доктора фізико-математичних наук, професора Дівізінюка М.М. та членів комісії – провідного наукового співробітника відділу технологій захисту довкілля та радіаційної безпеки, доктора технічних наук, старшого наукового співробітника Яцишина А.В.; провідного наукового співробітника відділу проблем фізичного захисту об'єктів критичної інфраструктури, доктора технічних наук, старшого дослідника Фарахова О.В. у вигляді цього акту про те, що наукові результати дисертаційної роботи Краснова В.А. у вигляді дворівневої математичної моделі моніторингу стану екологічної безпеки та методики управління екологічною безпекою сховища відпрацьованого ядерного палива у разі аварії внаслідок воєнних дій впроваджені у науково-дослідну діяльність Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, що дало змогу розширити можливості наукових досліджень установи в галузі комплексного екологічного моніторингу радіаційно-небезпечних об'єктів.

Даний акт не є підставою для одержання премій та інших винагород із фондів Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України.

Голова комісії:

головний науковий співробітник
 відділу проблем фізичного захисту
 об'єктів критичної інфраструктури,
 доктор фізико-математичних наук, професор

 Михайло ДІВІЗІНЮК

Члени комісії:

провідний науковий співробітник
 відділу технологій захисту довкілля та
 радіаційної безпеки, доктор технічних наук,
 старший науковий співробітник

 Андрій ЯЦИШИН

провідний науковий співробітник
 відділу проблем фізичного захисту
 об'єктів критичної інфраструктури,
 доктор технічних наук, старший дослідник

 Олександр ФАРАХОВ