

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-645-4-10>

**MODELING THE PROCESS OF DETECTING SOURCES
OF WATER POLLUTION UNDER MODERN MILITARY THREATS**

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОШУКУ ДЖЕРЕЛ
ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ СУЧАСНИХ
ВІЙСЬКОВИХ ЗАГРОЗ**

Rashkevich Nina Vladyslavna

*PhD, Associate Professor
of the Department of State Supervision
in the Field of Fire and Technogenic
Safety of the Educational and Scientific
Institute of Fire and Technogenic Safety
National University of Civil Protection
of Ukraine
Cherkasy, Ukraine*

Рашкевич Ніна Владиславна

*PhD, доцент кафедри державного
нагляду у сфері пожежної
та техногенної безпеки Навчально-
наукового інституту пожежної
та техногенної безпеки
Національний університет
цивільного захисту України
м. Черкаси, Україна*

Shevchenko Olha Stanislavivna

*Candidate of Technical Sciences,
Doctoral Researcher
National University of Civil Protection
of Ukraine
Cherkasy, Ukraine*

Шевченко Ольга Станіславна

*кандидат технічних наук,
докторант
Національний університет
цивільного захисту України
м. Черкаси, Україна*

**Krasnov Viacheslav
Anatoliyovych**

*Adjunct Researcher
National University of Civil Protection
of Ukraine
Cherkasy, Ukraine*

**Краснов Вячеслав
Анатолійович**

*ад'юнкт
Національний університет
цивільного захисту України
м. Черкаси, Україна*

Військові дії створюють підвищену ймовірність раптового та масштабного забруднення водних об'єктів, що виникає внаслідок руйнування промислових, транспортних та інженерних об'єктів, порушення роботи інфраструктури та вторинних техногенних процесів [1]. Забруднення розвивається у складному, динамічному та невизначеному середовищі, де масштаби та форми уражень змінюються у часі та просторі. Традиційні методи моніторингу водних об'єктів не забезпечують необхідної оперативності та охоплення, що знижує ефективність реагування та підвищує ризик екологічних збитків. У таких умовах необ-

хідно оперативно виявляти джерела забруднення, враховуючи динаміку поширення домішок, ефективність пошукових процедур, ресурсні, часові та геопросторові обмеження.

Аналіз наукових робіт у цій сфері дозволяє виокремити основні підходи та тенденції. Зокрема, в роботі [2] досліджено формування інформаційної QR-технології моніторингу стану поверхневих вод на територіях, які постраждали внаслідок бойових дій, показавши важливість інтеграції оперативних даних для оцінки стану водних об'єктів. Дослідники [3] провели аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних з небезпекою ґрунтових вод, та визначили фактори ризику і методи їх контролю. У подальших роботах [4] сформувавши математичну модель для оцінки небезпечного впливу на стан ґрунтових вод міських агломерацій під час ракетно-артилерійських уражень. В роботі [5] запропоновано підходи для попередження надзвичайних ситуацій, пов'язаних із забрудненням водних об'єктів у зонах бойових дій, підкресливши роль оперативного моніторингу та координації ресурсів.

Для опису динаміки поширення забруднень у водних об'єктах позначимо концентрацію забруднюючих речовин у водному середовищі як $C(x, t)$, де $x \in \Omega$ – координати в акваторії, а t – час. Зміни концентрації визначаються природними процесами перенесення, дифузії, осадження та додатковими впливами зовнішніх негативних факторів $W(x, t)$:

$$\frac{dC}{dt} = F(C, x, t) + W(x, t), \quad (1)$$

де $F(C, x, t)$ – функція, що описує внутрішню динаміку поширення забруднення; $W(x, t)$ – додаткові зовнішні впливи, що пов'язані з військовими діями або небезпечними подіями.

Стан системи моніторингу, зокрема безпілотних літальних апаратів (БпЛА), описується змінною $M(t)$, яка характеризує їхню працездатність та покриття території. Динаміка стану системи визначається:

$$\frac{dM}{dt} = G(M, t) - H(u, t), \quad (2)$$

де $G(M, t)$ – автономна динаміка систем без зовнішнього втручання; $H(u, t)$ – ефект керуючих дій $u(t)$ для підтримання працездатності та оптимізації пошуку.

Процес виявлення джерел забруднення описується функцією щільності виявлення аномалій $p(x, t)$ та функцією покриття території БпЛА $\sigma(x, t)$. Ефективність пошукових процедур у часі $S(t)$ залежить

від тривалості польоту, маршруту та енергоресурсів платформ. Оптимальна стратегія пошуку визначається максимізацією інтегралу покриття з урахуванням щільності виявлення:

$$\max_{\gamma(t)} \int_{\Omega} p(x, t) \sigma(x, t) dx, \quad (3)$$

де $\gamma(t)$ – параметри керування траєкторіями пошукових засобів. Спад ефективності покриття у часі моделюється експоненційно:

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

λ – константа зниження ефективності, а σ_0 – початкове покриття.

Завдання управління процесом пошуку та реагування формулюється як мінімізація інтегрального екологічного збитку:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} [R(t) + aS^{-1}(t) + \beta \|u(t)\|] dt, \quad (5)$$

де $R(t) = \Phi(C(t), M(t))$ – рівень небезпеки; $S(t)$ – ефективність пошуку; $u(t)$ – керуючі дії; a, β – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритети пошуку та реагування.

Граничні умови моделі включають:

1. Часові межі реагування:

$$t_0 \leq t \leq t_f, \quad (6)$$

де t_0 – початок спостереження або реагування, t_f – момент досягнення стабілізації або завершення операції.

2. Технічні обмеження БпЛА:

$$0 \leq t \leq T_{\text{політ}}, \quad E(t) \geq E_{\text{min}}, \quad (7)$$

де $T_{\text{політ}}$ – максимально допустимий час безперервного польоту, $E(t)$ – поточний запас енергії, E_{min} – мінімально необхідний рівень енергії для виконання завдання.

3. Геопросторові межі зони спостереження:

$$x \in \Omega. \quad (8)$$

4. Обмеження на управлінські рішення:

$$\|u(t)\| \leq u_{\text{max}}, \quad (9)$$

де $u(t)$ – керуючі впливи на системи моніторингу та пошуку, u_{max} – максимально допустима величина цих впливів.

Ефективність пошуку джерел забруднення залежить від стану технічних систем, маршрутів огляду та ресурсних обмежень і визначає швидкість виявлення, точність локалізації забруднень та своєчасність прийняття управлінських рішень для мінімізації екологічних збитків.

Література:

1. Вовчук Т., Лобойченко В., Рашкевич Н., Шевченко О., Шевченко Р. Формування інформаційної QR-технології моніторингу стану поверхневих вод на територіях, які постраждали внаслідок бойових дій. Scientific foundations in research in Engineering : collective monograph / Kornylo I., Gnyr O. etc. International Science Group. Boston : Primedia eLaunch. 2022. 709 p.

2. Рашкевич Н. В., Мирошник О. М., Шевченко Р. І. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій пов'язаних з небезпечною ґрунтових вод. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Т. 7, № 2. С. 193–216.

3. Рашкевич Н. В., Шевченко Р. І., Вовчук Т. С. Формування математичної моделі аналізу небезпечного впливу на стан ґрунтових вод міських агломерацій від ракетно-артилерійських уражень. *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 1, вип. 182. С. 229–240.

4. Бондаренко А. Ю., Рашкевич Н. В., Лобойченко В. М., Шевченко Р. І. Інноваційні підходи в попередженні надзвичайних ситуацій, пов'язаних із забрудненням водних об'єктів населених пунктів, де відбувались бойові дії. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022* : мат. І Міжнар. наук.-практ. конф. Полтава, 2022. С. 500–502.

5. Рашкевич Н. В. Визначення основних джерел забруднення ґрунтів та водних ресурсів під час військових конфліктів. *Problems of Emergency Situations* : мат. Міжнар. наук.-практ. конф. Черкаси : НУЦЗ України, 2025 р. С. 119–120.