

Оцінювання сценарно-функціональної придатності безпілотних авіаційних систем до виконання завдань виявлення хімічного та радіоактивного зараження

Assessment of Scenario-Functional Suitability of Unmanned Aerial Systems for Chemical and Radioactive Contamination Detection Tasks

Андрій Бачинський

ад'юнкнт, e-mail: bachinsky1985@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3251-0326>

Andrii Bachynskyi

PhD student, e-mail: bachinsky1985@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-3251-0326>

Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України. м. Київ, Україна

Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Received: June 25, 2026 | Revised: June 29, 2026 | Accepted: June 30, 2026

УДК 623.746:355.58:614.8:504.064

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.3.17>

Мета роботи. Розробити матрично-векторну багатокритеріальну модель оцінювання сценарно-функціональної придатності безпілотних авіаційних систем до виконання завдань виявлення хімічного та радіоактивного зараження з урахуванням сценарію їх застосування.

Метод дослідження. Використано системний підхід, структурно-функціональний аналіз, метод багатокритеріального оцінювання та сценарно-рівневий підхід.

Результати дослідження. Запропоновано матрично-векторну модель оцінювання сценарно-функціональної придатності безпілотних авіаційних систем. Сформовано систему критеріїв оцінювання, розподілених на структурно-сценарні та ресурсно-логістичні, введено матрицю релевантності критеріїв, матриці нижніх і верхніх референтних меж, а також розроблено процедуру нормування часткових оцінок і визначення узагальненого показника відповідності системи вимогам заданого сценарію.

Теоретична цінність дослідження. Формалізовано підхід до оцінювання придатності безпілотних авіаційних систем за ступенем їх відповідності вимогам конкретного сценарію застосування, а не за відносним порівнянням між собою.

Практична цінність дослідження. Модель може використовуватися для відбору безпілотних авіаційних систем, планування їх застосування, формування складу засобів виявлення та підтримки прийняття рішень під час хімічної й радіаційної розвідки.

Майбутні дослідження. Передбачають визначення референтних меж, верифікацію моделі на реальних або імітаційних даних та її інтеграцію до комплексної методики оцінювання ефективності виявлення зараження.

Тип статті. Аналітична наукова стаття теоретико-прикладного характеру.

Purpose. To develop a matrix-vector multi-criteria model for assessing the scenario-functional suitability of unmanned aerial systems (UAS) for chemical and radioactive contamination detection tasks, considering the operational scenario.

Method. The research employs a systems approach, structural-functional analysis, multi-criteria assessment, and a scenario-level approach.

Findings. A matrix-vector model for assessing the scenario-functional suitability of UAS is proposed. The study defines a system of evaluation criteria classified into structural-scenario and resource-logistic groups, introduces a criteria relevance matrix and lower and upper reference boundary matrices, and develops a procedure for normalizing partial assessments and calculating an integrated suitability indicator for a specific UAS model.

Theoretical implications. The study formalizes an approach for evaluating UAS suitability based on compliance with the requirements of a defined operational scenario rather than by comparative ranking of alternative systems.

Practical implications. The proposed model supports the preliminary selection of UAS for chemical and radiation reconnaissance, planning their deployment under different operational conditions, optimizing the composition of detection assets, and developing decision-support tools.

Future research. Further work should determine numerical reference boundaries, validate the model using real and simulated datasets, and integrate the proposed indicator into a comprehensive methodology for assessing contamination detection effectiveness.

Paper type. Analytical research article of a theoretical and applied nature.

Ключові слова. безпілотна авіаційна система; хімічне зараження; радіоактивне зараження; сценарно-функціональна придатність; багатокритеріальне оцінювання; референтні вимоги; матриця релевантності.

Key words. Unmanned Aerial System; Chemical Contamination; Radioactive Contamination; Scenario-Functional Suitability; Multi-Criteria Assessment; Reference Requirements; Relevance Matrix.

Вступ

Застосування безпілотних авіаційних систем (БпАС) для виявлення хімічного та радіоактивного (ХР) зараження набуває особливої актуальності в умовах зростання ролі дистанційних засобів розвідки, необхідності зменшення ризику для особового складу та потреби в оперативному

отриманні даних про стан зараженої місцевості. БпАС дають змогу виконувати спостереження, зондування, вимірювання та уточнення меж небезпечних зон без безпосереднього входження особового складу до району ураження [1, 2]. Водночас їх ефективне застосування залежить не лише від наявності платформи БпАС або бортового засобу виявлення, а й від відповідності конкретної моделі безпілотної системи умовам виконання завдання.

Проблема полягає в тому, що одна й та сама платформа може бути достатньою за дальністю, тривалістю польоту або корисним навантаженням, але водночас бути недостатньо придатною для роботи в урбанізованій місцевості, морській акваторії, в умовах ускладненої метеорологічної обстановки, на малих висотах, у режимах зависання або за потреби високої точності просторового позиціювання. Тому рішення щодо застосування БпАС має прийматися не лише за загальними льотно-технічними характеристиками, а з урахуванням сценарію виявлення зараження відповідно до умов обстановки, операційного рівня та особливостей району виконання завдання [3, 4].

Аналіз наукових і військово-практичних джерел свідчить, що наявні підходи до вибору технічних засобів часто орієнтовані на порівняння альтернатив між собою або на оцінювання окремих тактико-технічних характеристик. Такі підходи є корисними для ранжування зразків, проте не завжди дозволяють визначити, наскільки конкретна БпАС відповідає вимогам певного сценарію застосування. У завданнях виявлення ХР зараження така обмеженість є суттєвою, оскільки різні сценарії формують різні вимоги до маневреності, мінімальної висоти польоту, мінімальної швидкості, здатності до зависання, точності позиціювання, захищеності каналів зв'язку та модульності бортового комплексу тощо [5, 6].

У зв'язку з цим доцільним є відокремлення двох взаємопов'язаних, але не тотожних завдань: оцінювання ресурсної спроможності БпАС виконати потрібний обсяг робіт у просторі й часі та оцінювання її сценарно-функціональної придатності до застосування в конкретних умовах. Перше завдання характеризує здатність платформи забезпечити необхідну дальність, тривалість, площу обстеження або продуктивність. Друге завдання визначає, наскільки її конструктивні, аеродинамічні, функціональні та інформаційні властивості відповідають вимогам заданого сценарію.

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні підходу, за якого придатність БпАС визначається не через її відносне положення серед інших альтернатив, а через ступінь відповідності формалізованому сценарно-рівневому комплексу вимог. Такий підхід забезпечує можливість оцінювання БпАС незалежно від складу порівнюваної вибірки та враховує зміну вимог між різними сценаріями і рівнями застосування.

Огляд літератури

Питання вибору БпАС для виконання спеціальних завдань розглядається в науковій літературі переважно в контексті багатокритеріального оцінювання альтернатив [7, 8]. У таких дослідженнях застосовуються методи аналізу ієрархій, ранжування альтернатив, адитивної згортки, експертного оцінювання та інші підходи до підтримки прийняття рішень. Їх перевагою є можливість урахування значної кількості параметрів і формування впорядкованого переліку зразків за обраними критеріями. Водночас ці підходи здебільшого орієнтовані на визначення кращої альтернативи в межах заданої вибірки, а не на встановлення ступеня відповідності конкретної моделі вимогам певного сценарію застосування.

У роботах, присвячених оцінюванню засобів ХР розвідки [3, 9, 10], увага зосереджується на можливостях технічних засобів, їх тактико-технічних характеристиках, імовірності виявлення, своєчасності отримання даних, достовірності результатів вимірювання та здатності виконувати завдання в небезпечному середовищі. Такі підходи формують важливу основу для оцінювання ефективності виявлення, однак не завжди враховують специфіку БпАС як носія засобу виявлення, її обмеження за висотою, швидкістю, маневреністю, стійкістю до

метеоумов, здатністю до польоту в складному середовищі та можливістю адаптації бортового комплексу до типу зараження.

Окрему групу становлять дослідження, у яких БпАС розглядаються як засоби дистанційного моніторингу, картографування, спостереження або вимірювання параметрів небезпечного середовища [11-15]. У таких роботах підкреслюється значення висоти польоту, швидкості руху, ширини смуги огляду, точності геоприв'язки, тривалості перебування в районі виконання завдання та якості спеціалізованого бортового обладнання. Однак у більшості випадків ці параметри розглядаються або ізольовано, або в межах конкретного прикладного завдання без формування універсального сценарно-рівневого комплексу вимог.

Аналіз сучасних підходів свідчить, що недостатньо опрацьованим залишається питання формалізованого оцінювання придатності БпАС до виконання завдань виявлення ХР зараження саме з урахуванням сценарію застосування. Наявні методики здебільшого дають змогу порівнювати моделі між собою, але не забезпечують повної відповіді на питання, чи відповідає конкретна модель мінімально прийнятним і бажаним вимогам заданого сценарію чи операційному рівню.

Це зумовлює потребу в розробленні моделі, яка поєднує багатокритеріальне оцінювання з референтно-нормативним підходом. Така модель оцінювання має передбачати: формалізацію сценаріїв і рівнів застосування, визначення релевантних критеріїв для кожної сценарно-рівневої комбінації, поділ критеріїв за їх функціональним змістом, встановлення нижніх і верхніх референтних меж та обчислення узагальненого показника сценарно-функціональної придатності БпАС.

Методологія дослідження

Методологічною основою дослідження є системний підхід, відповідно до якого застосування БпАС для виявлення ХР зараження розглядається як взаємодія платформи, бортового спеціалізованого засобу виявлення, умов обстановки, сценарію виконання завдання та операційного рівня. Такий підхід дозволяє відокремити загальну ресурсну спроможність платформи від її сценарно-функціональної придатності до застосування в конкретних умовах [16].

Для формалізації умов застосування використано сценарний підхід. У його межах задається множина допустимих сценаріїв застосування БпАС та множина операційних рівнів. Обраний конкретний сценарій та операційний рівень, визначає сценарно-рівневий профіль застосування. Для кожної такої пари формується сценарно-рівневий комплекс вимог, який включає релевантні критерії, вагові коефіцієнти та нижні й верхні референтні межі нормування [17].

Для побудови множини критеріїв застосовано структурно-функціональний аналіз. За його результатами критерії поділено на дві групи: структурно-сценарні та ресурсно-логістичні. До структурно-сценарних критеріїв віднесено ті, що безпосередньо характеризують конструктивну, геометричну, аеродинамічну, функціональну та інформаційну відповідність БпАС умовам заданого сценарію. До ресурсно-логістичних критеріїв віднесено показники, які визначають масштаб, обсяг і тривалість виконання завдання у просторі й часі [18].

Для визначення складу критеріїв, що враховуються в конкретному сценарії та на відповідному операційному рівні, використано матрицю релевантності критеріїв. Її елементи відображають ступінь впливу кожного критерію на придатність БпАС в межах певного сценарію та операційного рівня. На основі цієї матриці формується робоча підмножина структурно-сценарних критеріїв, які беруть участь у розрахунку узагальненого показника сценарно-функціональної придатності.

Вагові коефіцієнти критеріїв визначаються експертно-аналітичним способом. Первинні експертні оцінки важливості критеріїв агрегуються за кожним критерієм, після чого

нормуються в межах робочої підмножини критеріїв. Це забезпечує можливість подальшої зваженої згортки нормованих часткових оцінок.

Для переходу від різнорозмірних характеристик моделей до єдиної шкали використано процедуру нормування. Для кожного критерію задаються нижня та верхня референтні межі. Нижня межа відповідає мінімально прийнятному рівню властивості, а верхня – бажаному рівню, після досягнення якого подальше покращення параметра не приводить до істотного збільшення сценарно-функціональної придатності. Референтні межі задаються у вигляді матриць нижніх і верхніх значень для всіх сценарно-рівневих профілів.

Фактичні значення критеріїв для моделей БпАС подаються у вигляді вектора характеристик. У процесі нормування цей вектор поелементно перетворюється на вектор нормованих часткових оцінок. Для критеріїв, що максимізуються, зростання значення підвищує придатність БпАС, а для критеріїв, що мінімізуються, зростання значення знижує її придатність. З цією метою вводиться індикатор напрямку переваги критерію.

Узагальнений показник адаптаційної придатності для конкретної i -ї моделі p -го типу БпАС визначається як зважена сума її нормованих часткових оцінок за релевантними структурно-сценарними критеріями. Значення показника належить інтервалу $[0;1]$ і характеризує ступінь відповідності БпАС вимогам обраного сценарію та операційного рівня.

Результати

У межах дослідження результатом є побудова послідовної розрахунково-логічної процедури оцінювання сценарно-функціональної придатності БпАС до виконання завдань виявлення ХР зараження. Запропонована процедура передбачає поетапний перехід від формалізації умов застосування БпАС до визначення релевантних критеріїв, їх вагових коефіцієнтів, референтних меж нормування, часткових нормованих оцінок та узагальненого показника придатності. Така логіка дозволяє оцінювати не абстрактну перевагу однієї платформи над іншою, а ступінь відповідності конкретної моделі БпАС вимогам заданого сценарію та операційного рівня.

Формалізація множини сценаріїв і сценарно-рівневих профілів

Для формалізації умов застосування БпАС у завданні виявлення ХР зараження спочатку задається множина допустимих операційних рівнів застосування БпАС $L_{\text{опр}}$.

Вибір операційного рівня здійснюється на основі сукупності параметрів q_ℓ , які належать до простору можливих параметрів вибору рівня Θ_ℓ і характеризують просторові, часові та організаційні особливості застосування БпАС. Для кожного рівня $\ell \in L_{\text{опр}}$ задається допустима область параметрів $\Omega_\ell \subseteq \Theta_\ell$. Тоді вибір операційного рівня можна подати у вигляді:

$$\ell(q_\ell) = \ell^* \Leftrightarrow q_\ell \in \Omega_{\ell^*}, \quad \ell^* \in L_{\text{опр}}. \quad (1)$$

Отже, ℓ^* є обраним операційним рівнем застосування БпАС, який відповідає параметрам конкретного завдання. В роботі в подальшому розглядається тактичний та оперативний рівні застосування.

Для конкретизації умов виявлення зараження вводиться множина допустимих сценаріїв застосування БпАС:

$$\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}, \quad (2)$$

де S_s – s -й сценарій застосування БпАС;

n – загальна кількість сценаріїв.

Вибір сценарію здійснюється на основі сукупності умов q_s , які належать до простору можливих параметрів вибору сценарію Θ_s і відображають особливості району виконання завдання, характер зараження, тип місцевості, метеорологічні та інші зовнішні чинники. Для кожного сценарію $S_s \in \mathcal{S}$ задається область допустимих умов:

$$\Omega_{S_s} \subseteq \Theta_s, \quad s = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Тоді вибір сценарію записується як:

$$S(q_s) = S_s \Leftrightarrow q_s \in \Omega_{S_s}, S_s \in \mathcal{S}, s = \overline{1, n}. \quad (4)$$

У результаті послідовного вибору операційного рівня та сценарію формується поєднання (S_s, ℓ^*) , яке задає сценарно-рівневий профіль застосування БпАС та визначає вихідні умови для подальшого оцінювання сценарно-функціональної придатності платформи до виконання завдання виявлення ХР зараження.

Для кожного сценарно-рівневого профілю (S_s, ℓ^*) формується відповідний профіль вимог:

$$\Pi(S_s, \ell^*) = \langle K_{XP}^*(S_s, \ell^*), w(S_s, \ell^*), L(S_s, \ell^*), U(S_s, \ell^*) \rangle, \quad (5)$$

де $K_{XP}^*(S_s, \ell^*)$ – підмножина критеріїв, релевантних для відповідного сценарію та операційного рівня;
 $w(S_s, \ell^*)$ – вектор вагових коефіцієнтів релевантних критеріїв;
 $L(S_s, \ell^*)$ – вектор нижніх референтних меж нормування критеріїв;
 $U(S_s, \ell^*)$ – вектор верхніх референтних меж нормування критеріїв.

Отже, сценарно-рівневий профіль (S_s, ℓ^*) у запропонованій моделі оцінювання задається формалізованою сукупністю релевантних критеріїв, їх ваг, нижніх і верхніх референтних меж. Це забезпечує можливість подальшого обчислення узагальненого показника сценарно-функціональної придатності БпАС, який позначимо $K_{\text{адапт}}(S_s, \ell^*)$.

Формування множини критеріїв оцінювання

Нехай повна множина критеріїв, що характеризують властивості БпАС, релевантні до виконання завдань виявлення ХР зараження, має вигляд

$$K_{XP} = \{k_{xp1}, k_{xp2} \dots, k_{xpm}\}. \quad (6)$$

До цієї множини включаються критерії, які відображають конструктивні, аеродинамічні, експлуатаційні та функціональні властивості БпАС. За змістом усі критерії доцільно поділити на дві групи:

$$K_{XP} = K_{XP}^C \cup K_{XP}^R, \quad K_{XP}^C \cap K_{XP}^R = \emptyset, \quad (7)$$

де K_{XP}^C – множина структурно-сценарних критеріїв, що характеризують конструктивну, геометричну й функціональну відповідність БпАС умовам конкретного сценарію (маневреність, можливість зависання, стійкість до погодних умов, здатність до роботи в ХБРЯ середовищі, габаритні характеристики, мінімальна швидкість і мінімальна висота польоту, наявність систем активного уникнення перешкод, точність позиціонування, захищеність каналів зв'язку, модульність бортового комплексу тощо);
 K_{XP}^R – множина ресурсних і логістичних критеріїв, які визначають експлуатаційно-ресурсний потенціал та просторово-часову продуктивність застосування БпАС, задаючи межі можливого обсягу завдань під час виявлення ХР зараження у конкретному сценарії (дальність польоту, тривалість польоту, корисне навантаження, максимальна швидкість, злітна маса, швидкість розгортання й відновлюваність та інші параметри, які насамперед характеризують масштаб і обсяг виконання завдання).

Оскільки $K_{\text{адапт}}(S_s, \ell^*)$ має відображати саме сценарно-функціональну, а не ресурсну придатність, для його формування доцільно використовувати лише критерії групи K_{XP}^C , оскільки критерії групи K_{XP}^R характеризують передусім масштаб і обсяг виконання завдання у просторі й часі. Саме критерії групи K_{XP}^C визначають, наскільки раціонально й безпечно застосовувати вже “ресурсно придатну” БпАС у конкретному сценарії: чи здатна платформа

працювати на потрібних висотах у міській забудові, діяти в ускладнених метеоумовах, забезпечувати стабільну навігацію та позиціювання в GNSS-обмеженому середовищі, бути сумісною з необхідною конфігурацією засобів виявлення, тощо.

Вибір релевантних критеріїв для кожного сценарію окремо та операційного рівня здійснюється експертним шляхом. До експертної групи доцільно включати фахівців із БпАС та планування ХБРЯ захисту в операціях (бойових діях).

Для формального подання зв'язку між множиною критеріїв оцінювання та сценарно-рівневими профілями застосування БпАС введемо матрицю релевантності критеріїв:

$$R = [r_{k,(S_s, \ell^*)}]_{m \times z}, \quad (8)$$

де m – кількість критеріїв множини K_{XP} ;

z – кількість можливих сценарно-рівневих профілів, що визначаються як:

$$z = |\mathcal{S}| \times |L_{опр}|, \quad (9)$$

$r_{k,(S_s, \ell^*)}$ – елемент матриці, який характеризує ступінь релевантності k -го критерію для сценарію S_s на операційному рівні ℓ^* .

Тоді для кожного S_s та ℓ^* на основі матриці R формується підмножина релевантних критеріїв

$$K_{XP}^*(S_s, \ell^*) = \{k \in K_{XP} : r_{k,(S_s, \ell^*)} > 0\}. \quad (10)$$

Оскільки $K_{адапт}(S_s, \ell^*)$ доцільно визначати саме за критеріями групи K_{XP}^C , підмножина критеріїв для оцінювання придатності визначається як:

$$K_{XP}^{C*}(S_s, \ell^*) = K_{XP}^*(S_s, \ell^*) \cap K_{XP}^C, \quad (11)$$

Таким чином матриця R виконує в моделі не лише інформаційну, а й формалізуючу функцію: вона визначає, які саме критерії мають брати участь у визначенні показника $K_{адапт}(S_s, \ell^*)$ для кожної комбінації сценарію та рівня застосування.

За потреби матриця R може також використовуватися для початкового коригування вектора ваг шляхом поелементного добутку:

$$\tilde{w}(S_s, \ell^*) = r(S_s, \ell^*) \odot w^0(S_s, \ell^*) \quad (12)$$

де $r(S_s, \ell^*)$ – вектор релевантності критеріїв, що відповідає стовпцю матриці R для сценарно-рівневого профілю (S_s, ℓ^*) ;

$w^0(S_s, \ell^*)$ – первинний вектор експертних ваг критеріїв для обраного сценарію та операційного рівня;

$\odot$ – операція поелементного множення.

Після цього вектор ваг підлягає нормуванню. Водночас у даному дослідженні матриця R використовується лише для структурування складу критеріїв, а остаточний рівень їх внеску визначається експертно.

У межах роботи для формалізованого подання зв'язку між критеріями оцінювання та сценарно-рівневими профілями застосування БпАС запропоновано матрицю релевантності критеріїв у якій визначено перелік критеріїв груп K_{XP}^C та K_{XP}^R , а також встановлено ступінь їх значущості для кожного поєднання сценарію виявлення ХР зараження та операційного рівня (табл. 1). Такий розподіл ґрунтувався на аналізі ТТХ сучасних БпАС, умов їх фактичного бойового застосування, вимог нормативних документів щодо ведення ХР розвідки, а також на узагальненні результатів виявлення зараження в різних типах місцевості та метеоумовах [19]. Зазначений перелік критеріїв не є вичерпним та може доповнюватися або коригуватися залежно від специфіки конкретного завдання з виявлення ХР зараження, особливостей оперативного середовища та типу спеціалізованого обладнання.

З метою зосередження на найбільш репрезентативних умовах застосування БпАС для виявлення ХР зараження розглянуто сценарії: “Виявлення ХР зараження в умовах відкритої місцевості” (S1), “Виявлення ХР зараження в урбанізованій місцевості” (S2), “Виявлення ХР зараження при ускладнених метеоумовах на відкритій місцевості” (S3) на тактичному та оперативному рівнях застосування.

Таблиця 1: Сценарно-рівнева матриця релевантності критеріїв K_{XP} для оцінювання адаптаційної придатності БпАС

№ критерію	Назва критерію	Група	S1		S2		S3	
			TP	OP	TP	OP	TP	OP
k_{xp1}	Маневреність	C	+/-	+/-	+	+/-	+/-	+/-
k_{xp2}	Можливість зависання	C	+/-	н/в	+	+/-	+/-	н/в
k_{xp3}	Дальність польоту (радіус зв'язку)	R	+	+	+/-	+	+	+
k_{xp4}	Тривалість польоту	R	+	+	+/-	+	+	+
k_{xp5}	Корисне навантаження	R	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**
k_{xp6}	Максимальна швидкість	R	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
k_{xp7}	Стійкість до погодних умов	C	+/-	+/-	+/-	+/-	+	+
k_{xp8}	Робота в ХБРЯ середовищі	C	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**
k_{xp9}	Вага (злітна маса)	R	+/-	н/в	+/-	н/в	+/-	н/в
k_{xp10}	Розміри (розмах крил / максимальні габарити платформи)	C	+/-	н/в	+	н/в	+/-	+/-
k_{xp11}	Максимальна висота польоту	C	+/-	+	+/-	+	+/-	+
k_{xp12}	Мінімальна швидкість	C	+	+/-	+	+/-	+/-	+/-
k_{xp13}	Мінімальна висота польоту	C	+	+/-	+	+/-	+/-	+/-
k_{xp14}	Наявність систем активного виявлення та уникнення перешкод	C	+/-	н/в	+	+/-	+/-	н/в
k_{xp15}	Точність та стабільність просторового позиціонування	C	+/-	+/-	+/-	+/-	+	+
k_{xp16}	Захищеність каналів зв'язку	C	+/-	+	+/-	+	+/-	+
k_{xp17}	Модульність бортового комплексу (час переконфігурації засобів виявлення)	C	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**	⁺ н/в**
k_{xp18}	Швидкість розгортання та відновлюваність	R	+	+/-	+	+/-	+	+/-

Примітка. “+” - суттєвий вплив; “+/-” - другорядний вплив; н/в” – незначущий вплив; * - адаптовані моделі БпАС для ХР розвідки; ** - спеціалізовані БпАС для ХР розвідки.

Визначення вагових коефіцієнтів критеріїв

Після формування $K_{XP}^C(S_s, \ell^*)$ здійснюється визначення вагових коефіцієнтів критеріїв $w_k(S_s, \ell^*)$, які характеризують відносну значущість k -го критерію у формуванні узагальненого показника сценарно-функціональної придатності БпАС для (S_s, ℓ^*) .

Оцінювання вагомості критеріїв для кожного сценарію та рівня здійснюється також експертним шляхом. Нехай $a_k^{(r)}(S_s, \ell^*)$ – оцінка важливості k -го критерію, надана r -м експертом для сценарію S_s та операційного рівня ℓ^* , де $r = \overline{1, N_E}$, а N_E – кількість експертів. Тоді агрегована експертна оцінка важливості k -го критерію A_k визначається як

$$A_k(S_s, \ell^*) = \sum_{r=1}^{N_E} a_k^{(r)}(S_s, \ell^*), \quad (13)$$

Після цього виконується нормування агрегованих оцінок за всіма критеріями, що належать до підмножини $K_C^*(S_S, \ell^*)$. Нормований ваговий коефіцієнт k -го критерію визначається за формулою

$$w_k(S_S, \ell^*) = \frac{A_k(S_S, \ell^*)}{\sum_{\rho \in K_{XP}^{C^*}(S_S, \ell^*)} A_\rho(S_S, \ell^*)} = \frac{\sum_{r=1}^{N_E} a_k^{(r)}(S_S, \ell^*)}{\sum_{\rho \in K_{XP}^{C^*}(S_S, \ell^*)} \sum_{r=1}^{N_E} a_\rho^{(r)}(S_S, \ell^*)}, \quad (14)$$

де $w_k(S_S, \ell^*)$ – нормований ваговий коефіцієнт, отриманий після агрегування експертних оцінок;

ρ – індекс перебору всіх критеріїв множини K_C^* .

При цьому має виконуватися умова нормування

$$\sum_{k \in K_{XP}^{C^*}(S_S, \ell^*)} w_k(S_S, \ell^*) = 1, \quad w_k(S_S, \ell^*) \geq 0 \quad (15)$$

Таким чином, отриманий вектор ваг:

$$w(S_S, \ell^*) = [w_1(S_S, \ell^*), w_2(S_S, \ell^*), \dots, w_{m_C}(S_S, \ell^*)]^T \quad (16)$$

відображає відносний внесок кожного релевантного структурно-сценарного критерію у загальну оцінку придатності БПАС для заданого сценарію та операційного рівня.

Матриці референтних профілів вимог

Ключовою особливістю запропонованої моделі є те, що оцінювання БПАС здійснюється не відносно інших платформ, а відносно сценарно визначених референтних вимог.

Для формального подання цих вимог вводяться дві матриці:

$$L = [L_{k,(S_S, \ell^*)}]_{m' \times Z}, \quad U = [U_{k,(S_S, \ell^*)}]_{m' \times Z}, \quad (17)$$

де	$L_{k,(S_S, \ell^*)}$	–	нижня референтна межа нормування критерію k для сценарно-рівневого профілю (S_S, ℓ^*) ;
	$U_{k,(S_S, \ell^*)}$	–	верхня референтна межа нормування критерію k для сценарно-рівневого профілю (S_S, ℓ^*) ;
	m'	–	кількість критеріїв множини $K_{XP}^{C^*}$.

Якщо множина сценаріїв має вигляд $\mathcal{S} = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, а множина операційних рівнів $L_{\text{опр}} = \{\text{TP}; \text{OP}\}$ то матрицю нижніх та верхніх референтних меж можна подати у вигляді:

$$L = \begin{bmatrix} L_{1,(S_1, \text{TP})} & L_{1,(S_1, \text{OP})} & \dots & L_{1,(S_n, \text{TP})} & L_{1,(S_n, \text{OP})} \\ L_{2,(S_1, \text{TP})} & L_{2,(S_1, \text{OP})} & \dots & L_{2,(S_n, \text{TP})} & L_{2,(S_n, \text{OP})} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{m', (S_1, \text{TP})} & L_{m', (S_1, \text{OP})} & \dots & L_{m', (S_n, \text{TP})} & L_{m', (S_n, \text{OP})} \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$U = \begin{bmatrix} U_{1,(S_1, \text{TP})} & U_{1,(S_1, \text{OP})} & \dots & U_{1,(S_n, \text{TP})} & U_{1,(S_n, \text{OP})} \\ U_{2,(S_1, \text{TP})} & U_{2,(S_1, \text{OP})} & \dots & U_{2,(S_n, \text{TP})} & U_{2,(S_n, \text{OP})} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ U_{m', (S_1, \text{TP})} & U_{m', (S_1, \text{OP})} & \dots & U_{m', (S_n, \text{TP})} & U_{m', (S_n, \text{OP})} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

У цих матрицях рядки відповідають критеріям $k \in K_{XP}^{C^*}$, а стовпці – сценарно-рівневим поєднанням (S_S, ℓ^*) , $S_S \in \mathcal{S}$, $\ell \in L_{\text{опр}}$. Для обраного (S_S, ℓ^*) із матриць L та U виділяються відповідні стовпці, які формують вектори референтних меж:

$$L(S_S, \ell^*) = \begin{bmatrix} L_{1,(S_S, \ell^*)} \\ L_{2,(S_S, \ell^*)} \\ \vdots \\ L_{m_C, (S_S, \ell^*)} \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$U(S_s, \ell^*) = \begin{bmatrix} U_{1,(S_s, \ell^*)} \\ U_{2,(S_s, \ell^*)} \\ \vdots \\ U_{m_c, (S_s, \ell^*)} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

де m_c – кількість структурно-сценарних критеріїв, відібраних для конкретного профілю (S_s, ℓ^*) .

Нижня та верхня референтні межі задають допустимий інтервал зміни k -го критерію для відповідного сценарно-рівневого профілю. Для критеріїв, що максимізуються, $L_{k(S_s, \ell^*)}$ відповідає мінімально прийнятному рівню, а $U_{k(S_s, \ell^*)}$ – бажаному рівню. Для критеріїв, що мінімізуються, $L_{k(S_s, \ell^*)}$ характеризує бажаний нижній рівень, а $U_{k(S_s, \ell^*)}$ – гранично допустимий верхній рівень. У всіх випадках має виконуватися умова $U_{k(S_s, \ell^*)} > L_{k(S_s, \ell^*)}$.

Таким чином, матриці L та U утворюють формалізовану систему референтних комплексів вимог. Вони забезпечують перехід від порівняльного оцінювання БпАС між собою до оцінювання їх відповідності вимогам конкретного сценарію та операційного рівня.

Числові значення елементів матриць L та U доцільно визначати експертно-аналітичним способом. Для параметрів, що мають безпосередній зв'язок із характеристиками польоту, часовими вимогами, просторовою дискретизацією вимірювань або фізичними умовами виявлення, межі можуть визначатися розрахунково. Для інтегральних, дискретних або якісних властивостей вони задаються на основі нормативно-технічних вимог, узагальнення досвіду застосування БпАС та експертного оцінювання.

Нормування часткових оцінок

Після формування сценарно-рівневого профілю вимог $\Pi(S_s, \ell^*)$ здійснюється нормування фактичних значень критеріїв БпАС. Для цього i -ту модель p -го типу БпАС позначимо як B_{pi} .

Метою нормування є приведення різнорозмірних технічних, конструктивних та експлуатаційних характеристик B_{pi} до єдиної безрозмірної шкали $[0;1]$ відносно сценарно-специфічних референтних інтервалів $[L(S_s, \ell^*), U(S_s, \ell^*)]$.

Нехай для обраного сценарію S_s та операційного рівня ℓ^* сформовано підмножину релевантних структурно-сценарних критеріїв:

$$K_{xp}^{c*}(S_s, \ell^*) = \{k_1^c, k_2^c, \dots, k_{m_c}^c\}. \quad (23)$$

Для моделі B_{pi} задається вектор фактичних значень критеріїв:

$$v_{pi} = [v_{pi1} \ v_{pi2} \ \dots \ v_{pim_c}],$$

де v_{pik} – значення k -го критерію для B_{pi} .

Для обраного (S_s, ℓ^*) із матриць нижніх і верхніх референтних меж виділяються відповідні вектори (20) та (21) які задають референтний базис нормування для кожного критерію у відповідному сценарії та на відповідному операційному рівні.

Оскільки критерії можуть мати різний напрям переваги, введемо індикатор типу критерію:

$$\eta_k = \begin{cases} 1 & \text{якщо } k\text{-й критерій належить до критеріїв, що максимізуються;} \\ 0 & \text{якщо } k\text{-й критерій належить до критеріїв, що мінімізуються.} \end{cases}$$

Тобто $\eta_k = 1$, $k \in k_{xp}^{(\max)}$, якщо зростання значення критерію підвищує придатність БпАС, і $\eta_k = 0$, $k \in k_{xp}^{(\min)}$ якщо зростання значення критерію знижує її придатність.

Вектор індикаторів напряму переваги критеріїв має вигляд:

$$\eta = [\eta_1 \ \eta_2 \ \dots \ \eta_{m_c}]. \quad (24)$$

Нормування фактичних значень критеріїв для B_{pi} здійснюється шляхом поелементного перетворення вектора фактичних характеристик v_{pi} у вектор нормованих часткових оцінок. У загальному вигляді це перетворення записується як

$$z_{pi}(S_s, \ell^*) = F(v_{pi}, L(S_s, \ell^*), U(S_s, \ell^*), \eta), \quad (25)$$

де z_{pi} – вектор нормованих часткових оцінок;
 $F(\cdot)$ – оператор поелементного нормування.

Кожний елемент вектора нормованих часткових оцінок визначається функцією:

$$z_{pik}(S_s, \ell^*) = f(v_{pik}, L_{k,(S_s, \ell^*)}, U_{k,(S_s, \ell^*)}, \eta_k), \quad (26)$$

де $z_{pik}(S_s, \ell^*)$ – нормована часткова оцінка B_{pi} за k -м критерієм у межах сценарію S_s та операційного рівня ℓ^* ;
 $f(\cdot)$ – функція нормування фактичного значення критерію відносно нижньої та верхньої референтних меж;
 $L_{k,(S_s, \ell^*)}, U_{k,(S_s, \ell^*)}$ – відповідно нижня та верхня референтні межі

У розгорнутому вигляді нормована часткова оцінка B_{pi} за k -м критерієм визначається за формулою:

$$z_{pik}(S_s, \ell^*) = \min \left\{ 1, \max \left[0, \frac{\eta_k(v_{pik} - L_{k,(S_s, \ell^*)}) + (1 - \eta_k)(U_{k,(S_s, \ell^*)} - v_{pik})}{U_{k,(S_s, \ell^*)} - L_{k,(S_s, \ell^*)}} \right] \right\}. \quad (27)$$

Оператори $\min\{1, \max[0, \cdot]\}$ забезпечують обмеження нормованої часткової оцінки в межах $0 \leq z_{pik}(S_s, \ell^*) \leq 1$.

Таким чином, кожне фактичне значення критерію v_{pik} перетворюється на безрозмірну оцінку відповідності $z_{pik}(S_s, \ell^*)$, яка показує, наскільки B_{pi} відповідає вимогам обраного сценарію та операційного рівня за відповідним критерієм.

У результаті нормування для B_{pi} формується вектор нормованих часткових оцінок:

$$z_{pi}(S_s, \ell^*) = [z_{pi1}(S_s, \ell^*) \ z_{pi2}(S_s, \ell^*) \ \dots \ z_{pim_c}(S_s, \ell^*)]. \quad (28)$$

Таким чином, вектор $z_{pi}(S_s, \ell^*)$ є розрахунковою основою часткової відповідності B_{pi} вимогам обраного сценарно-рівневого профілю. Він не характеризує абсолютні технічні переваги БпАС порівняно з іншими, а відображає ступінь відповідності кожної моделі референтним межах $L(S_s, \ell^*)$ та $U(S_s, \ell^*)$ для заданого сценарію S_s та операційного рівня ℓ^* .

Для подальшого обчислення узагальненого показника придатності використовується вектор вагових коефіцієнтів (16).

Узагальнений показник сценарно-функціональної придатності конкретної B_{pi} визначається як зважена сума її нормованих часткових оцінок:

$$K_{\text{адапт}, pi}(S_s, \ell^*) = \sum_{k=1}^{m_c} w_k(S_s, \ell^*) z_{pik}(S_s, \ell^*). \quad (29)$$

Отже, результатом нормування та подальшої зваженої згортки є не абстрактна оцінка БпАС загалом, а скалярне значення $K_{\text{адапт}, pi}(S_s, \ell^*)$, яке характеризує ступінь відповідності i -ї моделі p -го типу БпАС вимогам заданого сценарію виявлення ХР зараження та операційного рівня її застосування.

Значення показника $K_{\text{адапт}, pi}(S_s, \ell^*)$ належить інтервалу $[0;1]$. Чим ближче воно до одиниці, тим вищим є ступінь відповідності БпАС вимогам. Для практичної інтерпретації результатів доцільно запровадити рівневу шкалу $K_{\text{адапт}}$ (Табл. 2)

Таблиця 2: Шкала інтерпретації значень узагальненого показника придатності БпАС для виявлення ХР зараження

Діапазон значень $K_{\text{адапт},pi}(S_s, \ell^*)$	Рівень відповідності	Змістова інтерпретація
0,90–1,00	Повна відповідність	Практично повністю відповідає референтному профілю сценарію: всі визначальні структурно-сценарні критерії знаходяться в зоні близькій до значень, необхідних за вимогами сценарію; можливі лише незначні відхилення, що не потребують істотних організаційних або тактичних компенсацій.
0,70–0,89	Висока функціональна відповідність	Переважає більшість вагомих критеріїв знаходиться у прийнятній або наближеній до референтної зони; існуючі обмеження можуть бути компенсовані регулюванням профілю застосування (висота, швидкість, схема побудови маршруту, резервування іншими засобами).
0,50–0,69	Часткова відповідність.	Спостерігається суттєвий дисбаланс: частина критично важливих критеріїв відповідає сценарію, інша частина має помітні відхилення. Застосування такого БпАС можливе лише за умов додаткових обмежень або компенсуючих заходів (зміна завдання, залучення додаткових платформ, спрощення вимог до результату виявлення).
< 0,50	Функціональна невідповідність	Негативні відхилення за структурно-сценарними критеріями домінують, сумарна корисність платформи в даному сценарії є нижчою за мінімально прийнятний поріг, тому застосування БпАС у ролі основного засобу виявлення ХР зараження вважається недоцільним

Значення нижче певного порогового рівня (< 0,50) слід інтерпретувати як функціональну невідповідність БпАС умовам заданого профілю, за якої застосування такої БпАС як основного засобу виявлення ХР зараження є недоцільним. Проміжні значення відображають часткову або високу функціональну відповідність, а значення, близькі до одиниці – повну відповідність референтному профілю сценарію.

Обговорення

Запропонований підхід дозволяє перейти від традиційної логіки порівняльного ранжування БпАС до оцінювання ступеня їх відповідності формалізованим вимогам конкретного сценарію застосування. Це є принциповою відмінністю, оскільки у звичайних багатокритеріальних процедурах результат часто залежить від складу порівнюваної вибірки. Якщо до вибірки додається нова модель БпАС або вилучається одна з наявних, відносно положення альтернатив може змінюватися. Натомість запропонована модель орієнтована на референтно-нормативний базис, у якому кожний БпАС оцінюється відносно заданих вимог, а не лише відносно інших моделей.

Важливим методологічним положенням є поділ критеріїв на структурно-сценарні та ресурсно-логістичні. Такий поділ дає змогу уникнути змішування різних за змістом характеристик. Ресурсно-логістичні критерії визначають, який обсяг завдання може виконати платформа, зокрема за дальністю, тривалістю польоту, площею обстеження або транспортною спроможністю. Структурно-сценарні критерії визначають, наскільки раціонально і безпечно використовувати цю платформу в заданих умовах. Саме тому узагальнений показник сценарно-функціональної придатності доцільно формувати за структурно-сценарними критеріями, тоді як ресурсно-логістичні критерії мають застосовуватися в окремому блоці оцінювання можливості виконання потрібного обсягу завдання.

Матриця релевантності критеріїв виконує не лише інформаційну, а й формалізуючу функцію. Вона дозволяє визначити, які критерії мають враховуватися для конкретного сценарію та операційного рівня. Наприклад, для урбанізованої місцевості зростає значущість маневреності, габаритів, здатності до зависання, систем уникнення перешкод і точності позиціонування. Для відкритої місцевості та оперативного рівня більшого значення можуть набувати висотні параметри, стійкість до метеоумов, захищеність зв'язку та стабільність польоту. Це дозволяє адаптувати склад критеріїв до змісту завдання, а не застосовувати однаковий набір показників для всіх умов.

Система матриць нижніх і верхніх референтних меж забезпечує сценарно-нормативний характер оцінювання. Нижні та верхні межі задають референтний інтервал нормування критерію з урахуванням напрямку його переваги: для критеріїв, що максимізуються, верхня межа відповідає бажаному рівню, а для критеріїв, що мінімізуються, вона визначає гранично допустиме значення. Завдяки цьому модель оцінювання дозволяє врахувати не лише факт наявності певної характеристики БпАС, а й ступінь її відповідності вимогам сценарію.

Запропонована матрично-векторна форма подання підвищує формальну чіткість моделі оцінювання та створює основу для її програмної реалізації. Вектор фактичних характеристик моделей, матриці референтних меж, вектор нормованих часткових оцінок і вектор вагових коефіцієнтів утворюють послідовну розрахункову процедуру. За потреби ця процедура може бути масштабована для оцінювання групи БпАС різних типів без зміни загальної структури обчислення.

Водночас високий узагальнений показник сценарно-функціональної придатності не слід ототожнювати з повною ефективністю виконання завдання. Він характеризує саме якість сценарної відповідності БпАС, але не визначає автоматично достатність ресурсу, кількість потрібних платформ, час виконання завдання, імовірність виявлення або повноту обстеження району. Тому показник придатності доцільно розглядати як один із блоків загальної методики оцінювання ефективності виявлення ХР зараження із застосуванням БпАС.

Обмеженням запропонованого підходу є залежність результатів від якості експертного визначення вагових коефіцієнтів і референтних меж. Для підвищення обґрунтованості моделі доцільно надалі уточнювати ці значення на основі результатів імітаційного моделювання, аналізу фактичного досвіду застосування БпАС, експериментальних даних щодо роботи засобів виявлення і статистичної перевірки чутливості результатів до зміни ваг та меж нормування.

Висновки

У статті запропоновано матрично-векторну багатокритеріальну модель оцінювання сценарно-функціональної придатності БпАС до виконання завдань виявлення ХР зараження. На відміну від підходів, орієнтованих на порівняльне ранжування альтернатив, запропонована модель забезпечує оцінювання ступеня відповідності конкретної БпАС формалізованому комплексу вимог певного сценарію та операційного рівня.

У роботі формалізовано сценарно-рівневу постановку задачі оцінювання, за якої умови застосування БпАС задаються поєднанням сценарію виявлення ХР зараження та операційного рівня застосування. Для такого поєднання формується сценарно-рівневий комплекс вимог, що включає релевантні критерії, вагові коефіцієнти та референтні межі нормування.

Обґрунтовано поділ критеріїв на структурно-сценарні та ресурсно-логістичні. Це дозволяє відокремити оцінювання конструктивно-функціональної відповідності платформи умовам сценарію від оцінювання її ресурсної спроможності виконати необхідний обсяг завдання. Показано, що узагальнений показник придатності доцільно формувати саме за структурно-сценарними критеріями, оскільки вони визначають придатність моделі до застосування в конкретних умовах обстановки.

Запропоновано матрицю релевантності критеріїв, яка забезпечує формалізований відбір критеріїв для кожної комбінації сценарію та операційного рівня. Уведено систему

матриць нижніх і верхніх референтних меж, які формують сценарно-нормативний базис оцінювання та дозволяють порівнювати БпАС не з іншими альтернативами, а з вимогами конкретного сценарію.

Розроблено порядок нормування часткових оцінок, що забезпечує приведення різнорозмірних характеристик БпАС до єдиної безрозмірної шкали [0;1].

Практичне значення запропонованої моделі оцінювання полягає в можливості її використання для попереднього відбору БпАС, обґрунтування їх застосування в різних сценаріях ХР розвідки, а також для створення розрахункових інструментів підтримки прийняття рішень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення референтних меж, перевірку чутливості моделі до зміни вагових коефіцієнтів, а також інтеграцію узагальненого показника сценарно-функціональної придатності в загальну методику оцінювання ефективності виявлення ХР зараження.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Мовне редагування, переклад, технічна перевірка тексту.

Список використаних джерел

1. CBRN International. Flying UAV Laboratory: Wide-area monitoring, when and where it's needed. URL: https://www.cbrninternational.com/Flying_UAV_Lab.html (дата звернення: 21.05.2026).
2. Крячок С. Д. Застосування безпілотних літальних апаратів для виконання радіаційного моніторингу. "Technical Sciences and Technologies". 2024. № 3(37). С. 247–261. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3\(37\)-247-261](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3(37)-247-261).
3. Бондар Д. В., Гурник А. В., Литовченко А. О., Хижняк В. В., Шевченко В. Л., Ядченко Д. М. Застосування безпілотних авіаційних систем у сфері цивільного захисту: монографія / за заг. ред. П. Б. Волянського. Київ: Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, 2022. 312 с.
4. Harmata W. Aerial detection of contamination with the use of unmanned vehicles. "Scientific Journal of the Military University of Land Forces". 2018. Vol. 50, No. 1(187). P. 26–46. DOI:[10.5604/01.3001.0011.7353](https://doi.org/10.5604/01.3001.0011.7353).
5. Волканін Є. Є. Схемотехніка безпілотних літальних апаратів : навч. посіб. Харків: Харківський національний університет внутрішніх справ, 2024. 192 с.
6. Tachina O., Lysenko O., Alekseeva I., Novikov V., Sushchenko O. Classification of Modern Unmanned Aerial Vehicles. "Electronics and Control Systems". 2022. No. 3(73). P. 70–78. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.74.17354>.
7. Методика оцінювання ефективності застосування безпілотних систем у бригадах бойового складу ЗСУ: військова публікація, Київ: Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, 2025. 65 с.
8. Ramirez-Atencia C., Rodriguez-Fernandez V., Camacho D. A revision on multi-criteria decision making methods for multi-UAV mission planning support. URL: <https://arxiv.org/abs/2402.18743> [дата звернення 15.06.26].
9. Гутченко О. А., Гутченко К. С., Гутченко А. Г. Удосконалена методика оцінювання ефективності захисту військ від хімічних, біологічних, радіаційних та ядерних загроз.

- “Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони”. 2025. № 2(53). С. 17–25. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2025-53-2-17-25>.
10. Коробка В. П., Журавський О. М., Ткаченко В. В. Підвищення ефективності ведення радіаційної, хімічної та біологічної розвідки шляхом застосування безпілотних літальних апаратів. *Наука і оборона*. 2013. № 2. С. 29–34.
11. Akhundov R., Hashimov E. Enhancing the Efficiency of the Military Environmental Security System through the Implementation of Advanced Technical Means. “Modeling, Control and Information Technologies”. 2025. <https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.108>
12. Akhundov R., Islamov I. Military Environmental Security under Radiation and Chemical Threats. “Modeling, Control and Information Technologies”. 2025. <https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.129>.
13. Šmídl V., Hofman R. Tracking of atmospheric release of pollution using unmanned aerial vehicles. “Atmospheric Environment”. 2013. Vol. 67. P. 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.054>.
14. Tang X.-B. et al. Efficiency calibration and minimum detectable activity concentration of a real-time UAV airborne sensor system with two gamma spectrometers. “Applied Radiation and Isotopes”. 2016. URL: https://iint.nuaa.edu.cn/_upload/article/files/66/8b/96ef4d3d4d5aab25bc707bb7b35f/b8db4ee2-61f0-4d2d-9f04-61cb4ec4f60b.pdf. [дата звернення: 15.06.26].
15. van der Veeke S., Limburg J., Koomans R. L., Söderström M., van der Graaf E. R. Optimizing gamma-ray spectrometers for UAV-borne surveys with geophysical applications. “Journal of Environmental Radioactivity”. 2021. Vol. 237. Article 106717. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2021.106717](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106717).
16. Данильян О. Г., Дзьобань О. П. Методологія наукових досліджень: підручник. Харків : Право, 2019. 368 с.
17. Згуровський М. З. Сценарний аналіз як системна методологія передбачення. Київ: НТУУ “КПІ”, 2002.
18. Аналіз структурно-функціональний. Велика українська енциклопедія. 2020. URL: <https://vue.gov.ua/> [дата звернення 15.06.26].
19. Бачинський А. Компаративний аналіз безпілотних авіаційних систем для виявлення хімічного, біологічного, радіоактивного зараження. Вибір оптимальної платформи тактичного рівня. “Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України”. *Серія: військові та технічні науки*. 2025. Т. 100, № 3. С. 4–18. <https://doi.org/10.32453/3.v100i3.1903>.

References

1. CBRN International. Flying UAV Laboratory: Wide-area monitoring, when and where it's needed. URL: https://www.cbrninternational.com/Flying_UAV_Lab.html (accessed: 21.05.2026).
2. Kriachok S. D. Application of unmanned aerial vehicles for radiation monitoring. *Technical Sciences and Technologies*. 2024. No. 3(37). P. 247–261. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3\(37\)-247-261](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-3(37)-247-261).
3. Bondar D. V., Hurnyk A. V., Lytovchenko A. O., Khyzhniak V. V., Shevchenko V. L., Yadchenko D. M. Application of unmanned aerial systems in the field of civil protection: monograph / edited by P. B. Volianskyi. Kyiv: Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection, 2022. 312 p.
4. Harmata W. Aerial detection of contamination with the use of unmanned vehicles. *Scientific Journal of the Military University of Land Forces*. 2018. Vol. 50, No. 1(187). P. 26–46. DOI: [10.5604/01.3001.0011.7353](https://doi.org/10.5604/01.3001.0011.7353).
5. Volkanin Ye. Ye. Circuit engineering of unmanned aerial vehicles: textbook. Kharkiv: Kharkiv

- National University of Internal Affairs, 2024. 192 p.
6. Tachinina O., Lysenko O., Alekseeva I., Novikov V., Sushchenko O. Classification of Modern Unmanned Aerial Vehicles. *Electronics and Control Systems*. 2022. No. 3(73). P. 70–78. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.74.17354>.
 7. Methodology for assessing the effectiveness of the employment of unmanned systems in combat brigades of the Armed Forces of Ukraine: military publication. Kyiv: Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, 2025. 65 p.
 8. Ramirez-Atencia C., Rodriguez-Fernandez V., Camacho D. A revision on multi-criteria decision making methods for multi-UAV mission planning support. URL: <https://arxiv.org/abs/2402.18743> [accessed 15.06.26].
 9. Hutchenko O. A., Hutchenko K. S., Hutchenko A. H. Improved methodology for assessing the effectiveness of troop protection against chemical, biological, radiological and nuclear threats. *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*. 2025. No. 2(53). P. 17–25. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2025-53-2-17-25>.
 10. Korobka V. P., Zhuravskiy O. M., Tkachenko V. V. Improving the effectiveness of radiation, chemical and biological reconnaissance through the use of unmanned aerial vehicles. *Science and Defence*. 2013. No. 2. P. 29–34.
 11. Akhundov R., Hashimov E. Enhancing the Efficiency of the Military Environmental Security System through the Implementation of Advanced Technical Means. *Modeling, Control and Information Technologies*. 2025. <https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.108>.
 12. Akhundov R., Islamov I. Military Environmental Security under Radiation and Chemical Threats. *Modeling, Control and Information Technologies*. 2025. <https://doi.org/10.31713/MCIT.2025.129>.
 13. Šmídl V., Hofman R. Tracking of atmospheric release of pollution using unmanned aerial vehicles. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 67. P. 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.054>.
 14. Tang X.-B. et al. Efficiency calibration and minimum detectable activity concentration of a real-time UAV airborne sensor system with two gamma spectrometers. *Applied Radiation and Isotopes*. 2016. URL: <https://iint.nuaa.edu.cn/upload/article/files/66/8b/96ef4d3d4d5aab25bc707bb7b35f/b8db4ee2-61f0-4d2d-9f04-61cb4ec4f60b.pdf>. [accessed 15.06.26].
 15. van der Veeke S., Limburg J., Koomans R. L., Söderström M., van der Graaf E. R. Optimizing gamma-ray spectrometers for UAV-borne surveys with geophysical applications. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 237. Article 106717. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106717>.
 16. Danylian O. H., Dzoban O. P. Methodology of scientific research: textbook. Kharkiv: Pravo, 2019. 368 p.
 17. Zghurovskiy M. Z. Scenario analysis as a systems methodology for foresight. Kyiv: National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 2002.
 18. Structural-functional analysis. Great Ukrainian Encyclopedia. 2020. URL: <https://vue.gov.ua/> [accessed:15.06.26].
 19. Bachynskiy A. Comparative analysis of unmanned aerial systems for detecting chemical, biological and radioactive contamination. Selection of the optimal tactical-level platform. *Collection of Scientific Papers of the National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine. Series: Military and Technical Sciences*. 2025. Vol. 100, No. 3. P. 4–18. <https://doi.org/10.32453/3.v100i3.1903>.

