

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА РОЗРОБКИ ІНТЕГРОВАНОЇ МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ТА ҐРУНТОВИХ ВОД НА УРАЖЕНИХ ТЕРИТОРІЯХ

Н. В. Рашкевич¹, В. А. Краснов¹, О. С. Рашкевич²¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна²Головне управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Харківській області

УДК 614.8

DOI: 10.52363/2522-1892.2025.2.3

Отримано: 01 серпня 2025

Прийнято: 27 листопада 2025

Cite as: Rashkevich N., Krasnov V., Rashkevich O. (2025). Theory and practice of developing an integrated model for assessing soil and groundwater pollution in affected areas. *Technogenic and ecological safety*, 18(2/2025), 23–33. doi: 10.52363/2522-1892.2025.2.3

Анотація

У статті надано опис розробленої індексної моделі, яка дозволяє кількісно оцінити ймовірність переходу екосистеми до критичного стану внаслідок забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на територіях, що постраждали від ураження ракетно-артилерійськими системами. Модель дозволяє врахувати комплексний вплив факторів довкілля на характер міграції забруднюючих речовин в геосередовищах і наслідки їх дії на здоров'я населення. Об'єкт дослідження – процеси забруднення ґрунтів та ґрунтових вод, спричиненого бойовими діями. Предмет дослідження – оцінювання ступеня техногенного навантаження на екосистеми відповідно до характеру фізіологічної дії (субгострої або пролонгованої) на організм людини сукупності факторів оточуючого середовища.

Запропоновано систему семи оціночних індексів, що охоплюють воєнне навантаження, геологічну та гідрологічну вразливість, метеорологічне прискорення, територіальну чутливість, стан критичної інфраструктури та вразливість населення. Для кожного індексу розроблено аналітичні залежності на основі нормованих факторів та вагових коефіцієнтів. Визначення вагомості індексів здійснено експертно-аналітичним підходом із використанням модифікованої методики Делфі.

Моделю забезпечує інтегральну оцінку порушення екологічної рівноваги, дозволяє проводити просторове зонування територій, ідентифікацію критичних зон, прогнозування типу фізіологічної дії та обґрунтування пріоритетних заходів моніторингу. На основі модельних розрахунків визначаються положення цільових стратегій реагування на небезпеки та встановлюються заходи мінімізації наслідків небезпеки для населення та довкілля.

Розроблена модель надається у вигляді аналітичного виразу, характеризується гнучкістю та адаптивністю до різних сценаріїв виникнення та поширення небезпеки. Практична цінність моделі полягає в можливості її інтеграції в системи екологічного моніторингу, проектування систем реагування на ситуації техногенної небезпеки. Запропонована модель доцільна у роботі систем прийняття управлінських рішень в умовах поствоєнного відновлення територій.

Ключові слова: забруднення ґрунту, забруднення ґрунтових вод, оціночний індекс, техногенна небезпека, перехід до критичного стану, фізіологічна дія.

Постановка проблеми

Сучасні збройні конфлікти супроводжуються масштабним порушенням природного середовища, що спричиняє інтенсивне забруднення ґрунтів та ґрунтових вод [1]. Таке техногенне навантаження формує комплексні загрози для екосистем та здоров'я населення, прояв яких можливий як у короткостроковій (субгостра дія), так й в довгостроковій (пролонгована дія) перспективі.

Складність становить необхідність ідентифікації типу фізіологічної дії забруднюючих речовин, що визначається особливостями техногенного впливу під час бойових дій та специфіки бойового навантаження, умов розповсюдження забруднюючих речовин в геоекосистемах. Особливої уваги потребують ґрунти як деponуюче середовище шкідливих елементів технегенезу, а як наслідок – дослідження властивостей ґрунту та гідрогеологічних характеристик території. У зв'язку з цим постає завдання оцінки впливу факторів оточуючого середовища на екологічний стан довкілля, з урахуванням типу фізіологічної дії забруднення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Упродовж останніх років наукові дослідження, що пов'язані з оцінкою наслідків застосування

озброєння на територіях воєнних дій, стали актуальними на тлі повномасштабної військової агресії проти України.

Одним із напрямів таких досліджень є аналіз забруднення ґрунтів, важкими металами внаслідок вибухів. У наслідок цього відзначено значні концентрації свинцю, кадмію, хрому та міді в ґрунтах після ракетних атак [2]. Локальне накопичення токсичних елементів потребує постійного моніторингу та рекультивацийних заходів. Подібні результати отримано в дослідній роботі на території Миколаївської області: у ґрунтах було зафіксовано перевищення допустимих концентрацій фосфору, миш'яку, свинцю, міді, кадмію, цинку, нікелю, барію та бензо(α)пірену в 1,2...11 разів, зафіксовано суттєве погіршення якості води через руйнування інфраструктури [3]. Дослідження геохімічного аналізу орних шарів ґрунтів у регіонах України, що постраждали від бойових дій, зокрема в Сумській, Харківській та Чернігівській областях встановило закономірності накопичення мікроелементів (барію, цинку, марганцю та заліза) у кореневій зоні сільськогосподарських культур. Було відзначено деградацію гумусового горизонту. [4]. Підвищений вміст важких металів та зниження природної

родючості безпосередньо впливають на врожайність, біобезпеку продукції та стійкість харчових ланцюгів у зонах конфлікту.

Пропонується при визначенні наслідків порушення екологічного стану ґрунтів застосовувати гідрогеохімічні моделі й профільне зондування, що дозволяє простежити міграцію забруднювачів у ґрунтовому середовищі [5]. Досвід Кувейту має прикладну цінність для аналізу довготривалих наслідків війни в Україні, особливо в районах із легкопроникними ґрунтами.

При роботі у районах активних бойових дій запроваджується єдина методологія прогнозування забруднення ґрунтових вод [6]. Подальші дослідження щодо переходу на інтеграційні схеми запропоновали математичну модель аналізу небезпечного впливу на стан ґрунтових вод міських агломерацій від ракетно-артилерійських систем (РАС) [7]. У наукових публікаціях надається алгоритм інформаційно-технічного методу попередження небезпеки на територіях, що зазнали уражень [8]. Сформована методика лазерного моніторингу НС техногенного характеру дозволяє виявляти ризики забруднення в реальному часі [9].

Підхід до аналізу небезпеки в районах, що зазнали РАС, викладено у роботі [10], де обґрунтовано необхідність міждисциплінарного управління ризиками – від гідрогеологічного та токсикологічного аналізу до організаційно-правових заходів запобігання НС.

Слід виокремити праці, які комплексно аналізують процеси деградації земельних ресурсів в умовах техногенної загрози [11–13].

Системний підхід являє основу до розробки відновлення забруднених територій із застосуванням безреакційної рекультивациі [11]. Авторами розроблено моделі управління, що враховують особливості знешкодження боєприпасів без подальшого техногенного навантаження, з акцентом на автоматизоване прийняття рішень.

Розроблено критерії ефективності заходів рекультивациі з урахуванням небезпеки залишків боєприпасів [12]. Запропоновано індексну шкалу для оцінювання рівня безпеки, що дозволяє проводити порівняльний аналіз варіантів відновлення. Це дослідження є релевантним при формуванні індексних моделей оцінювання ризику переходу до критичного стану довкілля.

Пропонується використання методики дослідження забруднення ґрунтів важкими металами в районах вибухів [13]. Автори застосовують комбінований підхід, що включає відбір проб, спектральний аналіз та створення моделей просторового розподілу концентрацій. Це дослідження пов'язане з оцінюванням міграції забруднювачів та може бути використане для уточнення вагових коефіцієнтів в індексній моделі, яку розроблено в даній статті.

На увагу заслуговують публікації, присвячені моніторингу поверхневих та донних вод на територіях, що зазнали бойового ураження [14]. У роботі надається аналіз результатів застосування сучасних технологій (дистанційне зондування, GIS)

для оперативного виявлення змін у стані поверхневих вод. Запропоновані методи можуть бути інтегровані в систему екологічного моніторингу територій, що зазнали ураження РАС.

Кількісна оцінка екологічної загрози проводиться на основі аналізу просторового розподілу в ґрунтах забруднюючих речовин у районі промислового об'єкта (нафтопереробного заводу). Застосовано ГІС-технології для інтеграції геохімічних даних з картографічною інформацією [15].

Для визначення важких металів у донних відкладах автори акцнтують увагу на складності розподілу забруднювачів у вертикальному профілі водойм, що критично важливо для прогнозування тривалості впливу [16]. особливості.

При експрес-визначенні окремих компонентів у водних витяжках із рослинної сировини запропоновані методи аналітичного контролю, адаптовані до польових умов оцінювання рівня забруднення [17].

Тематика дослідження наслідків бойових дій на територіях узгоджується з міжнародними дослідженнями, які трактують широкомасштабне руйнування довкілля під час війни як екоцид [18, 19]. Відзначено, що воєнні дії не лише спричиняють безпосередні руйнування природного середовища, але й призводять до довгострокових змін у біогеохімічному циклі, порушення водного балансу та деградації екосистем, особливо в регіонах із високою щільністю насичення боєприпасами і хімічними речовинами.

Огляд впливу військових навчань, бойових дій та залишків боєприпасів на ґрунтові організми, виявивши зменшення біорізноманіття, порушення функцій ґрунту та накопичення токсичних компонентів, зокрема важких металів надано у роботі [20].

При проведенні оцінки сезонних коливань забруднення води та донних відкладень ріки Тигр після бойових дій відзначено постійне перевищення концентрацій кадмію, свинця, хрому, нікелю вище граничних значень Всесвітньої організації охорони здоров'я як у воді, так й в осадах. Це пов'язано з наслідками війни – руйнуванням інфраструктури, забрудненням осколків боєприпасів та пожеж на нафтових родовищах [21].

Для всебічного вивчення техногенних порушень ґрунтового покриву та гідромереж важливим є розробка методологічних інструментів оцінки забруднення. Так для оцінювання викидів токсикантів в атмосферу та ґрунт при вибухах ракет і БПЛА запропоновані статистичні, хімічні та техногенні моделі [22]. Це дозволяє більш точно оцінювати масштаби ураження та ризики для здоров'я населення та довкілля у реальному часі, а також є підґрунтям для побудови системи екологічного моніторингу в умовах бойових дій.

На методичних аспектах оцінки підповерхневого забруднення нафтовими продуктами, спричиненого військовою агресією РФ, зосереджена розробка алгоритму зонування територій, аналізу джерел забруднення та визначення пріоритетів для

моніторингу [23]. Автори пропонують методичну основу, що базується на поєднанні гідродинамічного моделювання, геологічного картування та дослідження динаміки розповсюдження контамінації.

Комплексну оцінку якості підземних вод у місті Мосул (Ірак) після завершення бойових дій запроваджено для оцінювання якості води з використанням індексу за канадською методикою (CCME-WQI) та індексу забруднення важкими металами (HPI) [24]. Було виявлено підвищені концентрації таких металів, як свинець, хром, нікель та цинк, що створюють ризики для питного водопостачання та іригаційного використання.

У наукових працях надано цілісну концепцію інформаційно-аналітичної підтримки оцінки екологічності складних об'єктів, зокрема природно-техногенного характеру, з використанням системного, алгоритмічного та когнітивного підходів [25–27].

Запропоновано інформаційно-алгоритмічну модель комплексної оцінки екологічності системних об'єктів, яка враховує багаторівневу структуру об'єкта, множинність критеріїв оцінювання та взаємозв'язки між компонентами системи [25]. Модель базується на логіко-інформаційному підході, що дозволяє формалізувати системні ознаки складних об'єктів та забезпечити структуроване подання інформації для прийняття управлінських рішень.

Наголошується на впровадженні компараторної ідентифікації, що дозволяє зіставляти оцінювані об'єкти з еталонними або нормативними станами [26]. Запропоновано методику побудови інтегрального показника екологічності на основі нормалізації вихідних параметрів, визначення вагових коефіцієнтів і агрегування часткових оцінок.

Дослідниками запропоновано багаторівневу модель прийняття рішень, яка інтегрує структурно-функціональну повноту системи оцінки, інформаційні потоки, компараторну ідентифікацію та сценарний аналіз [27]. Такий підхід дозволяє не лише враховувати складність та ієрархічність природно-техногенних об'єктів, а й адаптувати процес прийняття рішень до умов невизначеності та динамічності екологічної ситуації.

Узагальнюючи результати аналізу наукових публікацій, можна зробити висновок, що проведені дослідження підтверджують погіршення якості довкілля в зонах ураження, накопичення важких металів, токсичних речовин та знищення природних компонентів біогеоценозу. Показано, що наслідки небезпеки, які виникають, можуть бути тривалими за впливом і вимагати відповідної класифікації та інтеграції в методологію запобігання виникнення та поширення небезпеки на територіях, що зазнали ракетно-артилерійських уражень.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – розробити індексну модель оцінки ймовірності переходу екосистеми до критичного стану внаслідок забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на територіях, що зазнали ураження

ракетно-артилерійськими системами, з урахуванням багатфакторного впливу оточуючого середовища та типу фізіологічної дії забруднюючих речовин на організм людини.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- визначити систему оціночних індексів, які кількісно відображають внесок окремих факторів у формування критичного стану екосистеми;
- визначити вагомість кожного індексу в загальній інтегральній оцінці рівноваги екологічного стану, з урахуванням типів фізіологічної дії забруднювачів (субгострого (T_{1-2}), пролонгованого (T_{2-3}));
- формалізувати оціночні індекси у вигляді аналітичних залежностей, що враховують багатфакторний вплив оточуючого середовища;
- описати індексну модель, яка дозволяє ідентифікувати ділянки, наближені до критичного стану, і визначити пріоритети для подальшого екологічного моніторингу та відновлення.

Матеріали і методи

У дослідженні застосовано комплекс методів, що забезпечують кількісну оцінку впливу факторів оточуючого середовища на стан ґрунтів та ґрунтових вод, з можливістю виявлення територій, наближених до критичного екологічного стану.

Зокрема, використано:

- системний аналіз для виявлення та класифікації факторів оточуючого середовища, що визначають ступінь порушення екологічної рівноваги;
- експертно-аналітичний підхід із застосуванням модифікованого методу Делфі для визначення вагомості оціночних індексів, що відображають вплив окремих факторів на рівень навантаження;
- метод нормування, який дозволяє привести значення індексів до уніфікованої шкали для подальшого інтегрування в загальну модель;
- аналітичне моделювання для побудови математичних залежностей між факторами оточуючого середовища та узагальненим рівнем порушення екологічного стану з урахуванням типів фізіологічної дії забруднюючих речовин.

Визначення системи оціночних індексів, які кількісно відображають внесок окремих факторів у формування критичного стану екосистеми

До основних факторів оточуючого середовища, що впливають на характер прояву фізіологічній дії небезпеки забруднення ґрунтів та ґрунтових вод на здоров'я населення – на територіях, що зазнали ураження РАС – субгостра (T_{1-2}) чи пролонгована (T_{2-3}) небезпека – можна віднести воєнне навантаження, геологічні, гідрогеологічні, метеорологічні умови, типи земель, об'єктів критичної інфраструктури (КІ) та компоненти вразливості населення.

Для визначення вагової значимості (вагомості) кожного з індексів у загальній інтегральній оцінці ступеня порушення екологічного стану на територіях, що зазнали ураження РАС, доцільно застосувати експертно-аналітичний підхід.

На основі визначених факторів техногенного впливу на екосистеми побудовано систему оціночних індексів, кожен з яких відображає окремий аспект негативної дії на загальний екологічний стан середовища, з урахуванням потенційної токсичної дії на людину та природні компоненти (табл. 1).

Запропонована структура дозволяє здійснювати поетапну, кількісну оцінку впливу окремого індексу (фактору) на загальний стан рівноваги довкілля. Кожен індекс може бути адаптований до специфіки конкретної території, що забезпечує гнучкість моделі.

Таблиця 1 – Структура системи оціночних індексів

№	Назва	Сутність	Позначення
1	Індекс воєнного навантаження	Інтегрує характеристики обстрілів (тип, калібр, інтенсивність, детонація), що визначають масштаб і токсичність початкового забруднення	I_{milit}
2	Індекс геологічної вразливості	Відображає наскільки геологічна структура сприяє затриманню або проникненню забруднювачів у ґрунт	I_{geo}
3	Індекс гідрологічної вразливості	Характеризує здатність території передавати забруднення через водоносні горизонти та поверхневі води	I_{hydr}
4	Індекс метеорологічного прискорення	Оцінює вплив погодних умов на швидкість і масштаб поширення забруднювачів	I_{met}
5	Індекс територіальної чутливості	Враховує цільове призначення земель і рівень контакту населення з потенційно забрудненими середовищами	I_{land}
6	Індекс вразливості критичної інфраструктурної	Оцінює ризики, пов'язані з ураженням об'єктів критичної інфраструктури, які можуть стати джерелом вторинного забруднення	I_{CI}
7	Індекс вразливості населення	Інтегрує демографічні, медичні та соціальні чинники, що впливають на сприйнятливність населення до токсичного навантаження	I_{vuln}

Визначення вагомості кожного індексу в загальній інтегральній оцінці рівноваги екологічного стану з урахуванням типів фізіологічної дії забруднювачів

Для визначення вагомості кожного з оціночних індексів застосовується експертно-аналітичний підхід (модифікований метод Делфі [28–30]) із подальшою статистичною обробкою отриманих результатів. Процедура оцінювання включає кілька послідовних етапів.

Етап 1. Формування експертної групи.

До складу експертної групи увійшло 15 експертів, які мають досвід роботи у сфері екологічного моніторингу та токсикологічного аналізу, що дозволяє адекватно оцінити властивості забруднюючих речовин та їхній вплив на довкілля, розуміння механізмів міграції хімічних речовин у ґрунтово-водному середовищі, врахування геологічних, гідрогеологічних і метеорологічних факторів, здатність аналізувати ризики та сценарії розвитку НС.

Етап 2. Розробка анкети оцінювання.

Анкета складається з трьох основних компонентів.

1. Опис блоків індексів (факторів), що підлягають оцінці.

Блок «Воєнне навантаження» охоплює характеристики бойового впливу, які безпосередньо визначають кількість і токсичність потенційних забруднювачів. До нього входять такі фактори, як тип і калібр застосованих боеприпасів (мінометні, артилерійські, касетні, термобаричні, з фосфором, радіоактивні тощо), інтенсивність обстрілів (кількість снарядів, тривалість та щільність

ураження), а також тип детонації (поверхнева, повітряна, підземна), що визначає глибину впровадження речовин у середовище.

Блок «Геологічна вразливість середовища» відображає властивості ґрунту та порід, які впливають на затримання або проникнення забруднювачів у ґрунтовий шар. До цього блоку належать тип ґрунтоутворюючої породи (пісок, суглинок, глина), гранулометричний склад, ступінь тріщинуватості або наявності карстових пустот, які сприяють швидкому просочуванню, а також водотривкі шари, що можуть стримувати поширення забруднення.

Блок «Гідрологічна вразливість середовища» характеризує здатність території до перенесення забруднювачів через підземні та поверхневі води. Враховуються такі чинники: тип, глибина і режим водоносного горизонту (напірний, безнапірний), фільтраційні властивості порід, напрямки і швидкість підземних потоків, режим ґрунтових вод. Окремо розглядається наявність відкритих водойм, густина водної мережі, рівень водообміну водойм, присутність заплав або заболочених ділянок, використання водних ресурсів для питного водопостачання.

Блок «Метеорологічне прискорення» охоплює погодні умови, що впливають на мобільність та активність забруднювачів. Серед факторів – інтенсивність опадів, температура повітря, швидкість вітру, вологість повітря, сонячна інсоляція, тривалість посушливого періоду, атмосферний тиск і сезон року. Ці показники впливають на поверхневу міграцію та реактивність речовин.

Блок «Територіальна чутливість» описує вплив антропогенних особливостей місцевості на масштаби та наслідки забруднення. Він включає тип землекористування (продуктивні землі, житлові райони, водні об'єкти, оздоровчі та рекреаційні зони, інфраструктурні території та зони обмеженого доступу), які визначають рівень контакту населення з потенційно забрудненими середовищами та вплив на здоров'я.

Блок «Вразливість критичної інфраструктури» оцінює ступінь ризику, пов'язаного з ураженням об'єктів критичної інфраструктури (медичні заклади, водозабори, харчові підприємства, енергетичні та транспортні вузли тощо). Ці об'єкти можуть бути джерелами вторинного забруднення або каналами поширення небезпеки.

Блок «Вразливість населення» включає характеристики населення, які визначають його біологічну та поведінкову здатність протистояти впливу токсикантів. До таких факторів належать вік (діти, літні люди мають меншу здатність до детоксикації), стан здоров'я (наявність хронічних хвороб, ослаблений імунітет), доступ до медичних послуг (віддаленість, обмеженість ресурсів), а також рівень поінформованості населення щодо ризиків, що впливає на ймовірність уникнення контакту з небезпечними речовинами.

2. Інструкція до заповнення, яка включає пояснення мети дослідження, завдання експерта, тип використаної шкали оцінювання.

Метою є визначення відносної вагомості кожного з індексів, які відображають вплив факторів оточуючого середовища на ймовірність виникнення критичного стану з фізіологічною дією. Завдання експерта – проаналізувати запропоновані індекси та на основі власного професійного досвіду оцінити ступінь їхнього впливу на інтегральний показник, використовуючи запропоновану шкалу.

Для оцінювання використовується шкала від 0 до 1, де 0 – мінімальна вагомість (індекс має дуже слабкий вплив), 1 – максимальна вагомість (індекс важливий (домінуючий) для розвитку фізіологічної небезпеки).

3. Поле коментарів та обґрунтувань для підвищення об'єктивності та прозорості оцінювання. Заповнення цього поля не є обов'язковим, однак рекомендоване, особливо у таких випадках:

- обраний бал суттєво відрізняється від середнього значення;
- індекс має специфічне значення в умовах, знайомих експерту;
- оцінка ґрунтується на практичному досвіді, конкретних випадках або наукових джерелах;
- потрібне уточнення або застереження щодо можливого впливу.

Етап 3. Проведення першого туру експертного опитування.

На третьому етапі здійснюється первинне збирання експертних оцінок. Кожен експерт самостійно, без обговорення з іншими учасниками, заповнює анкету, надаючи числові значення

вагомості кожного з факторів, що впливають на швидкість прояву фізіологічної небезпеки.

Перший тур має на меті отримати незалежні судження експертів щодо відносної важливості індексів (факторів); визначити рівні варіативності оцінок та потенційно суперечливих позицій; зафіксувати аргументи або коментарі, що пояснюють надані бали.

Після завершення збору анкет, усі дані кодуються, узагальнюються в таблиці, обробляються статистично (розрахунок середнього балу, стандартного відхилення, попередньої вагомості) для підготовки до наступного етапу.

Для обчислення середнього балу експертної оцінки вагомості індексу (фактору) застосовується вираз:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ji}, \quad (1)$$

де: $\bar{x}_i$ – середній бал для i -го індексу (фактору); x_{ji} – оцінка i -го індексу (фактору), надана j -м експертом; n – загальна кількість експертів; i – номер індексу (фактору); j – номер експерта.

Вираз для розрахунку стандартного відхилення експертних оцінок індексу (фактору):

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ji} - \bar{x}_i)^2}, \quad (2)$$

де: S_i – стандартне відхилення оцінок i -го індексу (фактору).

Попередня вагомість (%) індексу (фактору) i розраховується за виразом:

$$W_i = \frac{\bar{x}_i}{\sum_{k=1}^m \bar{x}_k} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

де W_i – попередня вагомість індексу (фактору) i у відсотках; m – загальна кількість індексів (факторів);

$\sum_{k=1}^m \bar{x}_k$ – сума середніх балів усіх індексів (факторів).

Етап 4. Зворотний зв'язок та другий тур оцінювання.

На цьому етапі кожному експерту надається узагальнена статистична інформація за результатами першого туру: середнє значення вагомості по кожному індексу (фактору), діапазон оцінок (мінімум – максимум), рівень розбіжностей між думками (варіація або стандартне відхилення), анонімні коментарі інших експертів (за наявності).

Цей зворотний зв'язок дає можливість експертам переосмислити свої попередні оцінки, порівняти їх з узагальненими результатами та, за бажанням, уточнити або переглянути значення вагомостей.

У другому турі опитування експерти повторно заповнюють анкету (в оновленому бланку або через платформу), уточнюючи свої оцінки з урахуванням колективної думки, що сприяє підвищенню узгодженості групових суджень.

Результати другого туру використовуються для остаточного розрахунку вагових коефіцієнтів.

Етап 5. Нормалізація експертних оцінок.

Після завершення другого туру експертного опитування всі зібрані числові значення проходять процедуру нормалізації, метою якої є приведення оцінок до єдиної шкали (від 0 до 1), що забезпечує порівнюваність впливу кожного фактору в інтегральному показнику ризику.

Нормалізація здійснюється за виразом.

$$W_i = \frac{\bar{x}_i}{\sum_{k=1}^m \bar{x}_k}.$$

У результаті отримують систему вагових коефіцієнтів W_i , сума яких дорівнює 1. Це дозволяє використовувати їх у подальших розрахунках інтегрального ризику як пропорційний внесок кожного фактору в загальну оцінку.

У таблиці 2 наведено результати оцінки розподілу вагових коефіцієнтів α_i , які відображають відносну важливість кожного індексу для інтегральної оцінки ймовірності переходу до критичного стану з субгострою фізіологічною дією (T_{1-2}).

У таблиці 3 наведено результати оцінки розподілу вагових коефіцієнтів β_i , які відображають відносну важливість кожного індексу для інтегральної оцінки ймовірності переходу до критичного стану з пролонгованою фізіологічною дією (T_{2-3}).

Отримані результати забезпечують основу для формування диференційованих підходів до просторового зонування територій за рівнем екологічної загрози з урахуванням характеру фізіологічної дії забруднення.

Формалізація оціночних індексів у вигляді аналітичних залежностей, що враховують багатofакторний вплив оточуючого середовища

Формалізація кожного індексу здійснена на основі сукупності факторів, нормованих у діапазоні (0...1), та їх відповідної вагомості для кожного типу фізіологічної дії. Розглянемо поетапно структуру кожного з індексів.

Таблиця 2 – Вагомість кожного з оціночних індексів у загальній інтегральній оцінці ймовірності переходу до критичного стану з субгострою фізіологічною дією (T_{1-2})

Назва оціночного індексу	Значення α_i	Обґрунтування
Індекс воєнного навантаження, I_{milit}	0,25	Визначає початкову потужність та глибину ураження
Індекс гідрологічної вразливості, I_{hydr}	0,25	Поширення забруднювачів через воду – головний шлях при субгострій дії
Індекс вразливості критичної інфраструктури, I_{CI}	0,20	Забруднення водозаборів, медичних і соціальних об'єктів посилює ризики
Індекс метеорологічного прискорення, I_{met}	0,15	Прискорює інгаляційні або водні забруднення
Індекс вразливості населення, I_{vuln}	0,10	Навіть низькі дози забруднювачів можуть викликати негативні ефекти у дітей та осіб похилого віку
Індекс геологічної вразливості, I_{geo}	0,05	Менший вплив у короткостроковій перспективі

Таблиця 3 – Вагомості кожного з оціночних індексів у загальній інтегральній оцінці ймовірності переходу до критичного стану з пролонгованою фізіологічною дією (T_{2-3})

Назва оціночного індексу	Значення β_i	Обґрунтування
Індекс геологічної вразливості, I_{geo}	0,25	Визначає тривале збереження забруднювачів у ґрунтах
Індекс територіальної чутливості, I_{land}	0,20	Забруднення сільгоспугідь та житлових зон призводить до накопичення ризику
Індекс вразливості населення, I_{vuln}	0,15	Вразливі групи страждають від довготривалих доз
Індекс воєнного навантаження, I_{milit}	0,15	Характер боеприпасів впливає на тривале накопичення забруднювачів
Індекс гідрологічної вразливості, I_{hydr}	0,10	Менш критичний, але впливає на вторинне накопичення у воді
Індекс вразливості критичної інфраструктури, I_{CI}	0,10	Можливість вторинного забруднення харчових або медичних об'єктів
Індекс метеорологічного прискорення, I_{met}	0,05	Сезонність впливає, але значимість нижча при тривалому сценарії

1. Формалізація індексу воєнного навантаження, I_{milit} :

$$I_{milit}^{(T)} = \omega_1^{(T)} \cdot F_1 + \omega_2^{(T)} \cdot F_2 + \omega_3^{(T)} \cdot F_3, \quad (4)$$

де $I_{milit}^{(T)}$ – індекс воєнного навантаження для типу фізіологічної дії $T = T_{1-2}, T_{2-3}$; F_1 – оцінка типу та калібру боєприпасів (0...1); F_2 – оцінка інтенсивності обстрілів (0...1); F_3 – оцінка типу детонації (0...1); $\omega_1^{(T)}, \omega_2^{(T)}, \omega_3^{(T)}$ – вагові коефіцієнти відповідно до значимості факторів для кожного типу дії (сумарно 1).

2. Формалізація індексу геологічної вразливості, I_{geo} :

$$I_{geo}^{(T)} = \gamma_1^{(T)} \cdot G_1 + \gamma_2^{(T)} \cdot G_2 + \gamma_3^{(T)} \cdot G_3 + \gamma_4^{(T)} \cdot G_4 + \gamma_5^{(T)} \cdot G_5, \quad (5)$$

де $I_{geo}^{(T)}$ – індекс геологічної вразливості для типу фізіологічної дії $T = T_{1-2}, T_{2-3}$; G_1 – оцінка типу ґрунтоутворюючої породи (0...1); G_2 – оцінка гранулометричного складу (0...1); G_3 – оцінка наявності тріщинуватості, карстових пустот (0...1); G_4 – оцінка наявності водотривких шарів (0...1); G_5 – оцінка типу рельєфу (0...1); $\gamma_1^{(T)}, \gamma_2^{(T)}, \gamma_3^{(T)}, \gamma_4^{(T)}, \gamma_5^{(T)}$ – вагові коефіцієнти відповідно до значимості факторів для кожного типу дії (сумарно 1).

3. Формалізація індексу гідрологічної вразливості, I_{hydr} :

$$I_{hydr}^{(T)} = h_1^{(T)} \cdot H_1 + h_2^{(T)} \cdot H_2 + h_3^{(T)} \cdot H_3 + h_4^{(T)} \cdot H_4 + h_5^{(T)} \cdot H_5 + h_6^{(T)} \cdot H_6 + h_7^{(T)} \cdot H_7 + h_8^{(T)} \cdot H_8, \quad (6)$$

де $I_{hydr}^{(T)}$ – індекс гідрологічної вразливості для типу фізіологічної дії $T = T_{1-2}, T_{2-3}$; H_1 – оцінка глибини залягання водоносного горизонту (0...1); H_2 – оцінка типу водоносного горизонту (0...1); H_3 – оцінка напрямку і швидкості підземного стоку (0...1); H_4 – оцінка рівня вологості/насичення ґрунтів (0...1); H_5 – оцінка режиму ґрунтових вод (0...1); H_6 – оцінка наявності поблизу відкритих водойм (0...1); H_7 – оцінка густини водної мережі (0...1); H_8 – оцінка використання водойм для питного водопостачання (0...1); $h_1^{(T)}, h_2^{(T)}, h_3^{(T)}, h_4^{(T)}, h_5^{(T)}, h_6^{(T)}, h_7^{(T)}, h_8^{(T)}$ – вагові коефіцієнти відповідно до значимості факторів для кожного типу дії (сумарно 1).

4. Формалізація індексу метеорологічного прискорення, I_{met} :

$$I_{met}^{(T)} = m_1^{(T)} \cdot M_1 + m_2^{(T)} \cdot M_2 + m_3^{(T)} \cdot M_3 + m_4^{(T)} \cdot M_4 + m_5^{(T)} \cdot M_5 + m_6^{(T)} \cdot M_6 + m_7^{(T)} \cdot M_7 + m_8^{(T)} \cdot M_8, \quad (7)$$

де $I_{met}^{(T)}$ – індекс метеорологічного прискорення для типу фізіологічної дії $T = T_{1-2}, T_{2-3}$; M_1 – оцінка інтенсивності опадів (0...1); M_2 – оцінка

температури повітря (0...1); M_3 – оцінка швидкості вітру (0...1); M_4 – оцінка вологості повітря (0...1); M_5 – оцінка сонячної інсоляції (0...1); M_6 – оцінка тривалості посушливого періоду (0...1); M_7 – оцінка атмосферного тиску (0...1); M_8 – оцінка сезону року (0...1); $m_1^{(T)}, m_2^{(T)}, m_3^{(T)}, m_4^{(T)}, m_5^{(T)}, m_6^{(T)}, m_7^{(T)}, m_8^{(T)}$ – вагові коефіцієнти відповідно до значимості факторів для кожного типу дії (сумарно 1).

5. Формалізація індексу територіальної чутливості, I_{land} :

$$I_{land}^{(T)} = l_1^{(T)} \cdot L_1 + l_2^{(T)} \cdot L_2 + l_3^{(T)} \cdot L_3 + l_4^{(T)} \cdot L_4 + l_5^{(T)} \cdot L_5, \quad (8)$$

де $I_{land}^{(T)}$ – індекс територіальної чутливості для типу фізіологічної дії $T = T_{1-2}, T_{2-3}$; L_1 – оцінка продуктивного використання (0...1); L_2 – оцінка житлової забудови (0...1); L_3 – оцінка використання для водоспоживання (0...1); L_4 – оцінка оздоровчої та рекреаційної спрямованості (0...1); L_5 – оцінка вторинного ураження через виробничі ланцюги (0...1); $l_1^{(T)}, l_2^{(T)}, l_3^{(T)}, l_4^{(T)}, l_5^{(T)}$ – вагові коефіцієнти відповідно до значимості факторів для кожного типу дії (сумарно 1).

6. Формалізація індексу вразливості критичної інфраструктури, I_{CI} :

$$I_{CI}^{(T)} = c_1^{(T)} \cdot C_1 + c_2^{(T)} \cdot C_2 + c_3^{(T)} \cdot C_3 + c_4^{(T)} \cdot C_4 + c_5^{(T)} \cdot C_5 + c_6^{(T)} \cdot C_6 + c_7^{(T)} \cdot C_7, \quad (9)$$

де $I_{CI}^{(T)}$ – індекс вразливості критичної інфраструктури для типу фізіологічної дії $T = T_{1-2}, T_{2-3}$; C_1 – оцінка наявності об'єктів водопостачання та водовідведення (0...1); C_2 – оцінка наявності об'єктів енергетики та паливної інфраструктури (0...1); C_3 – оцінка наявності медичних та соціальних установ (0...1); C_4 – оцінка наявності об'єктів зберігання небезпечних речовин (0...1); C_5 – оцінка наявності об'єктів харчового забезпечення (0...1); C_6 – оцінка наявності об'єктів логістичних та транспортних вузлів (0...1); C_7 – оцінка наявності об'єктів управління, зв'язку та ППО (0...1); $c_1^{(T)}, c_2^{(T)}, c_3^{(T)}, c_4^{(T)}, c_5^{(T)}, c_6^{(T)}, c_7^{(T)}$ – вагові коефіцієнти відповідно до значимості факторів для кожного типу дії (сумарно 1).

7. Формалізація індексу вразливості населення, I_{vuln} :

$$I_{vuln}^{(T)} = v_1^{(T)} \cdot V_1 + v_2^{(T)} \cdot V_2 + v_3^{(T)} \cdot V_3 + v_4^{(T)} \cdot V_4, \quad (10)$$

де $I_{vuln}^{(T)}$ – індекс вразливості населення для типу фізіологічної дії $T = T_{1-2}, T_{2-3}$; V_1 – оцінка віку (0...1); V_2 – оцінка стану здоров'я (0...1); V_3 – оцінка доступу до медичних послуг (0...1); V_4 – оцінка рівня поінформованості (0...1); $v_1^{(T)}, v_2^{(T)}, v_3^{(T)}, v_4^{(T)}$ – вагові коефіцієнти відповідно до значимості факторів для кожного типу дії (сумарно 1).

Надалі оціночні індекси використовуються для побудови інтегрального показника ймовірності виникнення критичного стану з урахуванням типу фізіологічної дії (T_{1-2} або T_{2-3}), шляхом зваженого об'єднання відповідних коефіцієнтів у рамках єдиної системи оцінювання.

Опис індексної моделі, яка дозволяє ідентифікувати ділянки, наближені до критичного стану, і визначити пріоритети для подальшого екологічного моніторингу та відновлення

Загальний інтегральний індекс потенційної загрози переходу до критичного стану (I_{KC}) представляє собою функцію наведених оціночних індексів:

$$I_{KC} = f(I_{milit}, I_{geo}, I_{hydr}, I_{met}, I_{land}, I_{Cl}, I_{vuln}). \quad (11)$$

Залежно від типу фізіологічної дії забруднення на організм людини, інтегральний індекс (I_{KC}) може бути представлений у двох модифікованих формах, які по-різному враховують значимість кожного з оціночних індексів.

1. Для субгострої фізіологічної дії (T_{1-2}). Цей тип небезпеки проявляється протягом короткого часу (від годин до кількох тижнів) після впливу забруднювачів, через питну воду.

$$I_{KC}^{(1-2)} = \sum_{i=1}^m \alpha_i \cdot I_i, \quad (12)$$

де α_i – вагові коефіцієнти, що відображають відносну важливість кожного з індексів для інтегральної оцінки переходу до критичного стану довкілля з субгострою фізіологічною дією (T_{1-2}); m – кількість залучених індексів.

2. Для пролонгованої фізіологічної дії (T_{2-3}). Цей тип небезпеки проявляється через місяці або роки, пов'язаний із накопиченням забруднювачів у ґрунті, біомасі. При цьому пріоритет мають геологічні умови, використання земель та тривалість впливу.

$$I_{KC}^{(2-3)} = \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot I_i, \quad (13)$$

де β_i – вагові коефіцієнти, що відображають відносну важливість кожного з індексів для інтегральної оцінки переходу до критичного стану довкілля з пролонгованою фізіологічною дією (T_{2-3}); m – кількість залучених індексів.

Значення I_{KC} варіюється в межах від 0 до 1, де вищі значення свідчать про більший ризик і потребу в терміновому реагуванні (табл. 4).

Таблиця 4 – Інтерпретаційна шкала для інтегрального показника переходу в критичний стан I_{KC}

Значення I_{KC}	Рівень ризику	Інтерпретація	Рекомендовані дії
<0,20	Дуже низький	Умови не сприяють активному поширенню токсикантів або фізіологічному ураженню населення.	Моніторинг у звичайному режимі, немає потреби у втручанні.
0,21...0,40	Низький	Існує потенційна загроза для вразливих груп або в разі погіршення супутніх умов	Спостереження, оцінка змін параметрів, підготовка до локального втручання, поінформованість населення.
0,41...0,60	Помірний	Територія має середню просторову проникність та/або ознаки геохімічної або гідрологічної активності.	Посилений моніторинг, обмеження доступу до деяких ділянок, превентивне зонування.
0,61...0,80	Високий	Умови сприятливі для швидкого надходження токсикантів у харчовий ланцюг чи питну воду.	Тимчасове вилучення територій з обігу, моніторинг води та повітря, попереджувальні заходи для вразливих груп.
>0,81	Критичний	Можливе масове ураження вразливих груп. Забруднення має системний характер.	Екстрене реагування, евакуація, закриття джерел водопостачання, дезактивація територій, мобілізація медичних ресурсів.

Інтерпретація значення інтегрального показника потенційної загрози критичного стану довкілля дає змогу:

– кількісно оцінити рівень екологічної небезпеки для населення на постраждалих територіях після впливу ракетно-артилерійських систем;

– виявити зони з найбільшим ризиком розвитку негативних фізіологічних наслідків, залежно від часу дії забруднювачів (субгостра або пролонгована);

– встановити просторову ієрархію територій за ступенем загрози з урахуванням комбінованого впливу природних та техногенних факторів;

– формувати пріоритети для екологічного моніторингу, санації та відновлення, орієнтуючись на індекси, що мають найвищу вагомість у формуванні загального ризику;

– забезпечити наукове обґрунтування управлінських рішень у сфері цивільного захисту, екологічної безпеки та відновлення довкілля.

Висновки

1. Визначено систему оціночних індексів, що забезпечує кількісне врахування внеску факторів оточуючого середовища у формування критичного стану екосистеми на територіях, забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження. Система охоплює воєнне навантаження, геологічну та гідрологічну вразливість, метеорологічні умови, територіальну чутливість, стан критичної інфраструктури та вразливість населення.

2. Оцінено вагомість кожного індексу в інтегральній оцінці потенційної загрози критичного стану екосистеми з урахуванням типу фізіологічної дії забруднювачів. Для субгострої дії (T_{1-2}) визначальними є індекс воєнного навантаження, гідрологічної вразливості та вразливості критичної інфраструктури, що зумовлюють швидкість розвитку критичного стану екосистеми та безпосередній вплив на здоров'я населення у перші періоди після забруднення. Для пролонгованої дії (T_{2-3}) домінують геологічна вразливість та

територіальна чутливість, які визначають тривалість збереження забруднювачів у середовищі, їх накопичення та повільну міграцію, що спричиняє відстрочений, але тривалий вплив на екосистему та здоров'я населення.

3. Формалізовано кожен із оціночних індексів у вигляді аналітичних виразів, які враховують вплив множини факторів оточуючого середовища. Вони побудовані на нормованих шкалах оцінювання та диференційовані за типом фізіологічної дії, що забезпечує адаптивність до конкретних умов території.

4. Індексна модель, описана в дослідженні, дозволяє кількісно охарактеризувати потенційну загрозу переходу довкілля в критичний стан, шляхом обчислення інтегрального показника на основі оціночних індексів. Модель є інструментом для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері екологічної безпеки на постраждалих територіях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Marcantonio R., Hook K. The Environment in Warfare-Related Policy Making: The case in Ukraine. *Small Wars Journal*. 2020. Vol. 1020. 20 p.
2. Волівач Т. Забруднення ґрунтів важкими металами внаслідок ракетних атак. *Всеукраїнська науково-практична конференція молодих учених і студентів «Екологічна безпека держави»*. 2025. Т. 19. С. 54–55. DOI: 10.18372/2786-8168.19.19966.
3. Шибанова А., Руда М., Паславський М. Вплив активних військових дій на екологічний стан ґрунтових та водних ресурсів півдня України. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 351. № 3.1. С. 579–584. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-351-75.
4. Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils / O. Datsko et al. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2025. Vol. 53. No. 1. P. 14328–14328.
5. Ground water contamination in Kuwait resulting from the 1991 Gulf War: a preliminary assessment / A. Mukhopadhyay et al. *Groundwater Monitoring & Remediation*. 2008. Vol. 28. No. 2. P. 81–93.
6. Рашкевич Н. В., Мирошник О. М., Шевченко Р. І. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій пов'язаних з небезпекою ґрунтових вод. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Т. 7. № 2. С. 193–216. DOI: 10.31731/2524.2636.2023.7.2.193.216.
7. 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. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-1-182-229-240.
8. Рашкевич Н. В., Шевченко Р. І., Нешпор О. В. Формування алгоритму інформаційно-технічного методу попередження надзвичайної ситуації на територіях, що зазнали ракетно-артилерійських уражень. *Комунальне господарство міст*. 2024. Т. 3. Вип. 184. С. 223–228. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-3-184-223-228.
9. Формування методики лазерного моніторингу надзвичайної ситуації техногенного характеру на території, що зазнала ракетно-артилерійського ураження / О. С. Рашкевич, Н. В. Рашкевич, Р. І. Шевченко, А. О. Хмирова. *Social Development and Security*. 2024. Т. 14. № 4. С. 171–180. DOI: 10.33445/sds.2024.14.4.14.
10. Рашкевич Н. В. Аналіз сучасного стану попередження надзвичайних ситуацій на територіях України, які зазнали ракетно-артилерійських уражень. *Комунальне господарство міст*. 2023. Т. 4. Вип. 178. С. 232–251. DOI: 10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251.
11. Модель системи управління безпекою рекультивації земель місць знешкодження та знищення боєприпасів / Ю. Ю. Дідовець, В. Ю. Колосков, Г. М. Колоскова, А. Джинаду. *Техногенно-екологічна безпека*. 2021. № 10(2/2021). С. 64–69. DOI: 10.52363/2522-1892.2021.2.10.
12. Вдосконалений критерій в методі оцінювання рівня безпеки процесу рекультивації земель місць знешкодження та знищення боєприпасів / В. А. Андронов та ін. *Техногенно-екологічна безпека*. 2022. № 12(2/2022). С. 43–50. DOI: 10.52363/2522-1892.2022.2.6.
13. Method of Investigation of Soil Contamination with Heavy Metals at the Sites of Explosions / Yu. Didovets, V. Koloskov, B. Bandurian, H. Koloskova. *Kev Engineering Materials*. 2024. Vol. 988. P. 107–116.
14. Application of Up-to-Date Technologies for Monitoring the State of Surface Water in Populated Areas Affected by Hostilities / A. Myroshnychenko et al. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*. 2022. Vol. 16. No. 3. P. 50–59.
15. Козуля Т. В., Журко С. А. Дослідження ризик-впливу Кременчуцького НПЗ на екологічний стан ґрунтів з використанням технологій ГИС. *Наука сьогодні: сталий розвиток, технології та інновації: матеріали наук.-практ. конф.* Одеса: Видавництво «Молодий вчений», 2025. С. 165–169.
16. Study of the features of determination of heavy metals in bottom sediments / V. Loboichenko et al. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1348. Art. 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012014.
17. Ensuring environmental safety during express determination of individual components of plant raw materials in aqueous solutions / V. Loboichenko et al. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1491. Art. 012027. DOI 10.1088/1755-1315/1491/1/012027.
18. Wirtu Y. D., Abdela U. Impact of war on the environment: ecocide. *Frontiers in Environmental Science*. 2025. Vol. 13. Art. 1539520.
19. Chiarini G. (2024). Ecocide in war and peace: From the air pollution consequences of the war in Ukraine to Japan's disposal of Fukushima water into the ocean. *Case Western Reserve Journal of International Law*. 2024. Vol. 56. Art. 239.
20. Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: an ecotoxicological review / A. Rodríguez-Seijo, D. Fernández-Calviño, M. Arias-Estévez, D. Arenas-Lago. *Biology and Fertility of Soils*. 2024. Vol. 60. P. 813–844. DOI: 10.1007/s00374-024-01835-8.

21. Altahaan Z., Dobslaw D. Assessment of the impact of war on concentrations of pollutants and heavy metals and their seasonal variations in water and sediments of the Tigris River in Mosul/Iraq. *Environments*. 2024. Vol. 11(1). Art. 10.
22. Ломазов П. К., Павличенко А. В. Удосконалення методологічних підходів до оцінки та прогнозування змін стану довкілля внаслідок воєнних дій. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2024. № 77. С. 174–183. DOI: 10.33271/crpnmu/77.174.
23. Methodical aspects of the assessment of the state of subsurface contamination with petroleum products caused by the military aggression of the Russian Federation against Ukraine / R. Havryliuk, O. Shpak, O. Lohvynenko, I. Zapolskiy. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*. 2024. Vol. 61. P. 23–38. DOI: 10.26565/2410-7360-2024-61-02.
24. Altahaan Z. F., Dobslaw D. Assessment of post-war groundwater quality in urban areas of Mosul city/Iraq and surrounding areas for drinking and irrigation purposes by using the Canadian Environment Water Quality Index CCME-WQI and Heavy Metal Pollution Index HPI. *World Journal of Advanced Research and Reviews*. 2024. Vol. 21. P. 2461–2481.
25. Козуля Т. В., Смельянова Д. Інформаційно-алгоритмічна підтримка комплексної оцінки екологічності системних об'єктів. *Системні дослідження та інформаційні технології: міжнародний науково-технічний журнал*. 2017. № 2. С. 68–76. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2017.2.07.
26. Козуля Т. В., Білова М. О. Інформаційно-методична основа визначення оцінки екологічності складних природно-техногенних об'єктів. *Системні дослідження та інформаційні технології: міжнародний науково-технічний журнал*. 2017. № 1. С. 65–74.
27. Козуля Т. В., Козуля М. М. Інформаційно-методичні основи підтримки прийняття рішень для комплексного дослідження системних об'єктів: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2024. 231 с.
28. Горбатенко В., Петренко І. Метод Делфі та специфіка його застосування у прогностичних розробках. *Політичний менеджмент*. 2008. № 6. С. 174–182.
29. Hasson F., Keeney S., McKenna H. Revisiting the Delphi technique-Research thinking and practice: A discussion paper. *International Journal of Nursing Studies*. 2025. Art. 105119.
30. A Delphi study to build consensus on the definition and use of big data in obesity research / C. Vogel et al. *International journal of obesity*. 2019. Vol. 43(12). P. 2573–2586.

Rashkevich N., Krasnov V., Rashkevich O.

THEORY AND PRACTICE OF DEVELOPING AN INTEGRATED MODEL FOR ASSESSING SOIL AND GROUNDWATER POLLUTION IN AFFECTED AREAS

The article provides a description of a developed index model that enables a quantitative assessment of the probability of an ecosystem shifting to a critical state as a result of soil and groundwater pollution in areas affected by rocket and artillery system strikes. The model makes it possible to account for the complex influence of environmental factors on the migration patterns of pollutants in geomediums and the consequences of their impact on public health.

The object of research is the processes of soil and groundwater pollution caused by military actions. The subject of research is the assessment of the degree of technogenic pressure on ecosystems according to the nature of physiological effects (subacute or prolonged) on the human body through the combined impact of environmental factors.

A system of seven assessment indices is proposed, covering military load, geological and hydrological vulnerability, meteorological acceleration, territorial sensitivity, the state of critical infrastructure, and population vulnerability. For each index, analytical dependencies have been developed based on normalized factors and weighting coefficients. The significance of the indices was determined using an expert-analytical approach with a modified Delphi method.

The model provides an integral assessment of ecological imbalance, enables spatial zoning of territories, identification of critical zones, prediction of the type of physiological effect, and substantiation of priority monitoring measures. Based on model calculations, the positions of target response strategies to hazards are defined, and measures for minimizing their consequences for the population and the environment are established.

The developed model is presented in the form of an analytical expression, characterized by flexibility and adaptability to various scenarios of hazard occurrence and spread. The practical value of the model lies in its potential integration into environmental monitoring systems and the design of technogenic hazard response systems. The proposed model is advisable for use in decision-making systems during the post-war recovery of territories.

Key words: soil pollution, groundwater pollution, assessment index, technogenic hazard, transition to critical state, physiological effect.

REFERENCES

1. Marcantonio, R., Hook, K. (2020). The Environment in Warfare-Related Policy Making: The case in Ukraine. *Small Wars Journal*, 1020, 20.
2. Volivach, T. (2025). Zabrudnennya gruntiv vazhkymy metalamy vnaslidok raketnykh atak [Soil contamination by heavy metals as a result of missile attacks]. *Vseukrainska nauково-praktychna konferenciya molodykh uchenykh i studentiv "Ekologichna bezpeka derzhavy"*, 19, 54–55. DOI: 10.18372/2786-8168.19.19966. [in Ukrainian]
3. Shybanova, A., Ruda, M., & Paslavskiy, M. (2025). Vplyv aktyvnykh viys'kovykh diy na ekolohichnyy stan obgruntovanykh ta vodnykh resursiv pivdnyy Ukrainy [The impact of active military operations on the environmental condition of soil and water resources in southern Ukraine]. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Series: Technical Sciences*, 351(3.1), 579–584. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-351-75. [in Ukrainian]
4. Datsko, O., Melnyk, O., Kovalenko, I., Butenko, A., Zakharchenko, E., Ilchenko, V., Onychko, V., & Solokha, M. (2025). Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 53(1), 14328–14328.
5. Mukhopadhyay, A., Al-Awadi, E., Quinn, M., Akber, A., Al-Senafy, M., & Rashid, T. (2008). Ground water contamination in Kuwait resulting from the 1991 Gulf War: a preliminary assessment. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 28(2), 81–93.
6. Rashkevich, N., Myroshnyk, O., & Shevchenko, R. (2023). Analiz suchasnoho stanu poperedzhennya nadzvychaynykh sytuatsiy, pov'yazanykh z nebezpekoyu hruntovykh vod [Analysis of the current state of warning of emergency situations related to the danger of groundwater]. *Emergency Situations: Prevention and Response*, 7(2) 193–216. DOI: 10.31731/2524.2636.2023.7.2.193.216. [in Ukrainian]
7. Rashkevich, N., Shevchenko, R., & Vovchuk, T. (2024). Formuvannya matematychnoyi modeli analizu nebezpechnoho vplyvu na stan obgruntovanykh vod mis'kykh ahlomeratsiy vid raketno-artyleryys'kykh urazhen' [Development of a mathematical model for analysing the hazardous impact on the state of groundwater in city agglomerations from missile and artillery attacks]. *Municipal Economy of Cities*, 1(182) 229–240. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-1-182-229-240. [in Ukrainian]
8. Rashkevich, N., Shevchenko, R., & Neshpor, O. (2024). Formuvannya alhorytmu informatsiyno-tekhnichnoho metodu poperedzhennya nadzvychaynoyi sytuatsiyi na terytoriyakh, shcho zaznaly raketno-artyleryys'kykh urazhen' [Development of an algorithm of the information and technical method of emergency prevention in the territories affected by rocket and artillery damage]. *Municipal Economy of Cities*, 3(184) 223–228. DOI: 10.33042/2522-1809-2024-3-184-223-228. [in Ukrainian]
9. Rashkevich, O., Rashkevich, N., Shevchenko, R., & Khmyrova, A. (2024). Formuvannya metodyky lazernoho monitorynhu nadzvychaynoyi sytuatsiyi tekhnohennoho kharakteru na terytoriyi, shcho zaznala raketno-artyleryys'koho ushkodzhennya [The formation of methodology laser

monitoring of an emergency of technogenic character in the territory affected by rocketly and artillery damage]. *Social Development and Security*. Vol. 14. No. 4. C. 171–180. DOI: 10.33445/sds.2024.14.4.14. [in Ukrainian]

10. Rashkevich, N. (2023). Analiz suchasnoho stanu poperedzhennya nadzvychaynykh sytuatsiy na terytoriyakh Ukrayiny, yaki zaznaly raketno-artyleryys'kykh urazhen' [Analysis of the current state of warning of emergency situations in the territories of Ukraine which were suffered by rocket and artillery impacts]. *Municipal Economy of Cities*, 4(178), 232–251. DOI: <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-4-178-232-251>. [in Ukrainian]

11. Didovets, Yu. Yu., Koloskov, V. Yu., Koloskova, G. M., & Dzhinadu, A. (2021). Model systemy upravlinnja bezpekoju rekultyvacii zemel misc zneskhodzhennja ta znyshhennja bojeprypasiv [Model of safety management system of land recultivation of places of ammunition disposal and destruction]. *Technogenic and ecological safety*. 10(2/2021), 64–69. DOI: 10.52363/2522-1892.2021.2.10. [in Ukrainian]

12. Andronov, V. A., Didovets, Y. Y., Koloskov, V. Y., Koloskova, G. M., & Dzhinadu, A. (2022). Vdoskonalenyj kryterij v metodi ocinjuvannja rivnja bezpeky procesu rekultyvacii zemel misc zneskhodzhennja ta znyshhennja bojeprypasiv [Improved criterion in method of assessment of the safety level of the process of land recultivation of places of ammunition disposal and destruction]. *Technogenic and ecological safety*, 12 (2/2022), 43–50. DOI: 10.52363/2522-1892.2022.2.6. [in Ukrainian]

13. Didovets, Yu., Koloskov, V., Bandurian, B., & Koloskova, H. (2024). Method of Investigation of Soil Contamination with Heavy Metals at the Sites of Explosions. *Kev Engineering Materials*, 988, 107–116.

14. Myroshnychenko, A., Loboichenko, V., Divizynuk, M., Levterov, A., Rashkevich, N., Shevchenko, O., & Shevchenko, R. (2022). Application of Up-to-Date Technologies for Monitoring the State of Surface Water in Populated Areas Affected by Hostilities. *Bulletin of the Georgian National Academy of Sciences*, 16(3), 50–59.

15. Kozulya, T. V., & Zhurko, S. A. (2025). Doslidzhennja ryzyk-vplyvu Kremenchuts'koho NPZ na ekolohichnyy stan obgruntuvan' z vykorystannjam tekhnolohiy HIS [Research on the risk-impact of the Kremenchuk Oil Refinery on the ecological state of soils using GIS technologies]. *Nauka s'ohodennja: stalyy rozvytok, tekhnolohiyi ta innovatsiyi : materialy nauk.-prakt. konf.* Odesa: Vydavnytstvo "Molodyy vchenyy", 165–169. [in Ukrainian]

16. Loboichenko, V., Nikitina, N., Leonova, N., Konovalova, O., Bondarenko, A., Zemlianskyi, O., & Rashkevich, N. (2024). Study of the features of determination of heavy metals in bottom sediments. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012014. DOI: 10.1088/1755-1315/1348/1/012014.

17. Loboichenko, V., Leonova, N., Nikitina, N., Savchenko, Y., Rashkevich, N., Shevchenko, O. & Khmyrova, A.. (2025). Ensuring environmental safety during express determination of individual components of plant raw materials in aqueous solutions. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1491, 012027. DOI 10.1088/1755-1315/1491/1/012027

18. Wirtu, Y. D., & Abdela, U. (2025). Impact of war on the environment: ecocide. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1539520.

19. Chiarini, G. (2024). Ecocide in war and peace: From the air pollution consequences of the war in Ukraine to Japan's disposal of Fukushima water into the ocean. *Case Western Reserve Journal of International Law*, 56, 239.

20. Rodríguez-Seijo, A., Fernández-Calviño, D., Arias-Estévez, M., & Arenas-Lago, D. (2024). Effects of military training, warfare and civilian ammunition debris on the soil organisms: an ecotoxicological review. *Biology and Fertility of Soils*, 60, 813–844. URL: 10.1007/s00374-024-01835-8.

21. Altahaan, Z., Dobslaw, D. (2024). Assessment of the impact of war on concentrations of pollutants and heavy metals and their seasonal variations in water and sediments of the Tigris River in Mosul/Iraq. *Environments*, 11(1), 10.

22. Lomazov, P., & Pavlichenko, A. (2024). Udoshkonalennja metodolohichnykh pidkhodiv do otsinky ta prohnozuvannja zmin stanu dovkillja vnaslidok voyennykh diy [Improvement of Methodological Approaches to the Assessment and Forecasting of Environmental Changes Caused by Military Actions]. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 77, 174–183. DOI: 10.33271/crpnmu/77.174. [in Ukrainian]

23. Havryliuk, R., Shpak, O., Lohvynenko, O., & Zapolskiy, I. (2024). Methodical aspects of the assessment of the state of subsurface contamination with petroleum products caused by the military aggression of the Russian Federation against Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, 61, 23–38. DOI: 10.26565/2410-7360-2024-61-02.

24. Altahaan, Z. F., & Dobslaw, D. (2024). Assessment of post-war groundwater quality in urban areas of Mosul city/Iraq and surrounding areas for drinking and irrigation purposes by using the Canadian Environment Water Quality Index CCME-WQI and Heavy Metal Pollution Index HPI. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 21, 2461–2481.

25. Kozulya, T. V., Yemel'yanova, D. (2017). Informatsiyno-alhorytmichna pidtrymka kompleksnoyi otsinky ekolohichnosti systemnykh ob'yektiv [Information and algorithmic support for a comprehensive assessment of the environmental performance of system objects]. *Systems Research and Information Technology: International Scientific and Technical Journal*, 2, 68–76. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2017.2.07. [in Ukrainian]

26. Kozulya, T. V., & Bilova, M. O (2017). Informatsiyno-metodychna osnova vyznachennja otsinky ekolohichnosti skladnykh pryrodno-tekhnohennykh ob'yektiv [Information and methodological basis for determining the assessment of environmental friendliness of complex natural and man-made objects]. *Systems Research and Information Technology: International Scientific and Technical Journal*, 1, 65–74. [in Ukrainian]

27. Kozulya, T. V., & Kozulya, M. M. (2024). Informatsiyno-metodychni osnovy pidtrymky rishen' dlya kompleksnoho doslidzhennja systemnykh ob'yektiv: monohrafiya [Information and methodological foundations of decision support for the comprehensive study of system objects: monograph]. Kharkiv: NTU «KHPI». [in Ukrainian]

28. Gorbatenko, V., & Petrenko, I. (2008). Metod Delfi ta spetsyfika yoho zastosuvannja u prohnoznykh rozrobkakh [The Delphi Method and the Specifics of Its Application in Forecasting Studies]. *Political Management*, 6, 174–182. [in Ukrainian]

29. Hasson, F., Keeney, S., & McKenna, H. (2025). Revisiting the Delphi technique-Research thinking and practice: A discussion paper. *International Journal of Nursing Studies*, 105119.

30. Vogel, C., Zwolinsky, S., Griffiths, C., Hobbs, M., Henderson, E., & Wilkins, E. (2019). A Delphi study to build consensus on the definition and use of big data in obesity research. *International journal of obesity*, 43(12), 2573–2586.