

УДК 614.841.3

ФОРМУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПОЛЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНІЧНИХ МЕТОДІВ ПОПЕРЕДЖЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНОГО ХАРАКТЕРУ ЗУМОВЛЕНИХ ЗАБРУДНЕННЯМ ҐРУНТІВ В ЗОНІ БОЙОВИХ ДІЙ

<https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.2.82-91>

Рашкевич Н. В.¹, ORCID iD 0000-0001-5124-6068
Рашкевич О. С.², ORCID iD 0009-0005-4374-4602
Дівізінюк М. М.³, ORCID iD 0000-0002-5657-2302
Шевченко Р. І.¹, ORCID iD 0000-0001-9634-6943
Шевченко О. С.¹, ORCID iD 0000-0003-2106-5009
*E-mail: nine291085@gmail.com

¹Національний університет цивільного захисту України, Україна

²Головне управління Державної служби України з надзвичайних ситуацій у Харківській області, Україна

³Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції:

08.08.2025

Пройшла рецензування:

20.08.2025

Опубліковано:

11.12.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

забруднення ґрунтів,
функціональне поле,
інформаційно-технічний
метод, медико-біологічна
надзвичайна ситуація,
токсичність

АНОТАЦІЯ

У статті розглянуто проблему формування функціонального поля інформаційно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій, зумовлених небезпечним впливом на середовище та території, зокрема забруднення ґрунтів токсичними речовинами, що можуть зберігати токсичність протягом тривалого часу внаслідок бойових уражень. Через ускладнення проведення класичного моніторингу в умовах воєнного конфлікту запропоновано метод непрямої оцінки ризику, що базується на геопросторовому аналізі кількості та розподілу уражень із урахуванням природних факторів, які впливають на поширення небезпечних речовин у ґрунті. Модель території передбачає її поділ на дискретні комірки, у межах яких розраховується сумарна інтенсивність токсичного впливу з урахуванням просторових взаємодій зон ураження, геологічних особливостей ґрунту та метеорологічних умов. Запропоновані аналітичні формули для моделювання інтенсивності впливу, що модифікується коефіцієнтами геологічної вразливості та метеоумов, також включають розрахунок відносного індексу токсичності для кожної комірки. Для оцінки потенційного впливу на населення введено узагальнений індекс, який поєднує токсичність, вразливість населення та ймовірність міграції забруднювачів у середовище. Науковою новизною є розробка геопросторового підходу для моделювання токсичних забруднень в зонах бойових дій, включаючи інтеграцію геологічних і метеорологічних факторів, а також поєднання просторових і соціальних параметрів для оцінки ризиків для здоров'я населення. Інтенсивність впливу кожного ураження моделюється за допомогою аналітичної лінійної функції, враховуючи просторову залежність відстані від осередку ураження. Результатом моделювання є створення теплових карт ризику, що дозволяють ідентифікувати критичні зони для моніторингу, евакуації або профілактичних заходів, що є особливо актуальним в умовах обмеженого доступу до польових досліджень. Модель передбачає також врахування змін токсичності у часі через процеси деградації або накопичення забруднень, що робить її ефективним інструментом для оцінки ризиків та розробки превентивних стратегій у надзвичайних ситуаціях, пов'язаних із забрудненням ґрунтів у зоні бойових дій.

Постановка проблеми. Бойові дії з використанням ракетно-артилерійських систем призводять до утворення небезпечного фізико-хімічного середовища на уражених територіях, насамперед – у ґрунтах, які слугують природним накопичувачем токсичних речовин. У зонах вибухів та вогневих уражень у ґрунт потрапляють забруднювачі, що можуть зберігати токсичність протягом тривалого часу.

Умови воєнного часу створюють бар'єри для класичного моніторингу: польові обстеження утруднені або небезпечні, відбір та лабораторний аналіз проб неможливі в низці регіонів. Тим часом, наявність токсикантів у ґрунті формує ризик медико-біологічної надзвичайної ситуації (НС) – через міграцію небезпечних речовин у повітря (у вигляді пилу), на поверхню шкіри, у сільськогосподарську продукцію або через непряме потрапляння до організму людини.

Внаслідок цього може мати місце масове хронічне або гостре отруєння населення, з ураженням нервової, кровоносної, імунної систем та органів детоксикації (печінка, нирки).

В умовах відсутності можливості лабораторного контролю, постає необхідність непрямой оцінки загроз для здоров'я населення на основі доступних показників – щільності та кількості уражень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У наукових публікаціях широко висвітлюється тема впливу воєнних дій на стан ґрунтів. У роботі [1] наведено оцінку масштабів деградації земельних ресурсів в Україні, з акцентом на просторову нерівномірність негативного впливу та необхідність інтегрованого підходу до відновлення уражених територій. У низці публікацій окреслено практичні аспекти реагування на ризики техногенного походження, включаючи оптимізацію процедур відбору проб ґрунтів у зонах підвищеної небезпеки [2], розробку організаційно-технічних заходів для запобігання НС [3], а також

удосконалення методик оцінки стану ґрунтів у межах системи цивільного захисту [4].

Окрему увагу дослідники приділяють токсикологічним ризикам, пов'язаним із функціонуванням військових об'єктів. У критичному огляді [5] систематизовано джерела забруднення, механізми перенесення токсикантів і типи домінуючих забруднювачів. Методологічні основи оцінювання ризиків у специфічних умовах, зокрема на стрільбищах, розглянуто в [6], де зафіксовано високий рівень акумуляції важких металів у ґрунтах. Робота [7] аналізує методи ідентифікації слідів пострілів у навколишньому середовищі, що має значення для виявлення токсикологічного навантаження в постконфліктний період.

У дослідженнях [8, 9] акцент зроблено на просторових закономірностях розподілу металів у ґрунтах із врахуванням чинників перенесення та ролі антропогенних механізмів вторинного забруднення. Монографія [10] розглядає вплив фізико-хімічних характеристик ґрунту (рН, вміст органічної речовини, тип ґрунту) на біодоступність мікроелементів, що є визначальними при оцінці токсичності залишків боєприпасів. Комплексний огляд [11] деталізує регіональні відмінності рівнів забруднення та міграційних шляхів металів.

У роботі [12] проведено бібліометричний аналіз наукових тенденцій щодо токсикологічного ризику, зокрема зростаючого інтересу до моделей впливу на здоров'я людини та застосування геоінформаційних технологій. Моделювання на основі методу Монте-Карло, як представлено в [13], дає змогу кількісно оцінювати варіативність потенційної шкоди для здоров'я за різних сценаріїв забруднення. Просторовий аналіз джерел забруднення, описаний у [14], рекомендовано для інтеграції в системи екологічного моніторингу задля виявлення локальних аномалій навантаження на ґрунтове середовище в районах техногенного або воєнного впливу.

У публікації [15] наведено результати польових досліджень, проведених у межах зони бойових дій під час російсько-українського конфлікту, які вказують на значні відмінності у складі ґрунтів поблизу зони бойового зіткнення. У роботі [16] ідентифіковано основні типи забруднювачів ґрунтів (важкі метали, паливно-мастильні матеріали, залишки вибухових речовин) і вказано на нестачу довготривалих спостережень за наслідками забруднення. Порівняльний аналіз, представлений у [17], базується на прикладі міста Мосул, де встановлено сезонну варіативність концентрацій забруднювачів і обґрунтовано необхідність довгострокового моніторингу. У роботі [18] застосовано індексні методи для оцінки ступеня забруднення ґрунтів в Україні, з виокремленням найбільш небезпечних зон за вмістом свинцю, кадмію та цинку – елементів із високим токсикологічним потенціалом.

Публікації [19–23] деталізують методологічні основи просторового аналізу забруднення ґрунтів із використанням сучасних інструментів. Зокрема, у [19] описано застосування геоінформаційних систем для діагностики агроєкологічного стану ґрунтів і візуалізації ризикових зон. Документ [20], підготовлений Агентством з охорони довкілля США (USEPA), надає стандартизовану процедуру оцінки ризиків для здоров'я та навколишнього середовища в межах програм Superfund. У роботі [21] проаналізовано індекси безпеки та нормативні значення гранично допустимих концентрацій для важких металів у сільськогосподарських ґрунтах, а також порівняно ефективність підходів у міжнародній практиці.

Інтеграцію геопросторової аналітики з оцінкою ризиків для здоров'я населення на забруднених територіях запропоновано у [22], де представлено комплексну схему обробки даних для пріоритетизації заходів з відновлення. У роботі [23] описано багатоканальну модель експозиції, адаптовану до умов невизначеності, що дозволяє об'єктивно оцінити ризик при

наявності залишків важких металів у ґрунті.

Функціональне поле інформаційно-технічних методів у галузі попередження надзвичайних ситуацій охоплює сукупність технологій, процедур і систем, що використовуються для забезпечення безпеки на об'єктах критичної інфраструктури та в різних сферах діяльності. Це поле включає в себе моніторинг, аналіз і управління ризиками, використання сучасних інформаційних та технічних засобів для своєчасного виявлення загроз і попередження їхнього розвитку [24, 25].

У монографії [24] розглянуто інженерно-технічні методи попередження НС, зокрема ідентифікацію водних розчинів для виявлення забруднень токсичними речовинами. Автори пропонують нові підходи на основі геопросторових даних, що дозволяють ефективно моніторити і реагувати на загрози на об'єктах критичної інфраструктури. Методи поєднують інновації в галузі хімії та цивільного захисту, відповідаючи вимогам сталого розвитку.

У монографії [25] автори розглядають основні принципи цивільного захисту, зокрема синергетичні підходи для інтеграції методів захисту. Робота акцентує на адаптації технологій та стандартів до сучасних загроз, зокрема в умовах війни, і пропонує нові підходи до управління ризиками.

Аналіз наявної літератури свідчить про тенденцію переходу від локальних методик відбору проб до системних прогнозно-аналітичних моделей, які враховують просторово-часову динаміку забруднення. Проте залишається відкритим питання розробки інтегральної математичної моделі, яка б поєднувала кількісну оцінку токсикологічного навантаження, ймовірності виникнення надзвичайних ситуацій та картографічну візуалізацію результатів, із одночасним урахуванням гідрогеологічних, метеорологічних, соціально-демографічних чинників і бойових даних

для забезпечення комплексної оцінки ризиків, спричинених воєнним забрудненням ґрунтів.

Формулювання цілей дослідження. Мета дослідження полягає у формуванні функціонального поля існування інформаційно-технічних методів з попередження надзвичайних ситуацій зумовлених забрудненням ґрунтів токсичними залишками бойових уражень.

Запропонований підхід дозволить надалі оцінити ризик виникнення медико-біологічних НС без застосування класичних процедур, що є релевантним в умовах війни для захисту здоров'я цивільного населення та особового складу.

Методи дослідження. Для оцінки потенційної токсичності ґрунтів на уражених бойовими діями територіях застосовано комплексний геопросторовий підхід, що базується на моделюванні інтегрального впливу ракетно-артилерійських уражень.

Інтенсивність впливу кожного ураження моделюється за допомогою аналітичної лінійної функції з урахуванням просторової залежності відстані від осередку. Для корекції впливу враховуються геологічні характеристики ґрунтів (пористість, органічна речовина, мінеральний склад, структурні особливості) через введення геологічного коефіцієнта, а також метеорологічні умови (опаді, температура, вологість, вітер) за допомогою метеорологічного коефіцієнта.

Запропонований підхід передбачає сумування внесків усіх уражень у кожній комірці, що дозволяє врахувати різні типи взаємодії осередків (ізолюваність, адитивність, синергія, антагонізм). Для оцінки потенційного впливу на населення використовується узагальнений індекс, який об'єднує інтенсивність токсичності, вразливість населення та ймовірність міграції токсикантів у критичні середовища.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під функціональним полем інформаційно-технічних методів розуміємо просторово-часові рамки, у межах яких виконуються всі процедури методу. Це

територія та період, де метод «працює» та перетворює окремі ураження на безперервну індексну картину потенційного токсичного впливу й пов'язаних ризиків, що є основою для визначення пріоритетів моніторингу, профілактичних, за потреби, евакуаційних заходів за умов обмеженого доступу до польових досліджень у зоні бойових дій.

В умовах збройного конфлікту джерелами хімічного навантаження на ґрунти виступають залишки ракетно-артилерійського ураження, продукти горіння та термічного розкладу вибухових речовин, а також уламки військової техніки з високим вмістом важких металів. Таке забруднення має локалізований характер у площині – в межах епіцентру ураження – та проникає вглиб залежно від енергії вибуху й типу ґрунту.

Просторове поширення хімічних речовин у товщі ґрунту здійснюється за рахунок дифузії в поровому просторі, фільтрації під дією атмосферних опадів і гравітаційного переміщення розчинених форм токсикантів у вертикальному напрямку. У результаті цих процесів формується фізичне поле забруднення, яке характеризується просторовою неоднорідністю, анізотропністю та динамічними змінами у часі.

Надходячи до ґрунту, хімічні речовини вступають у складні взаємодії з компонентами ґрунтової матриці, зокрема сорбуються на глинистих мінералах та органічній речовині, вступають в обмінні реакції з іонами ґрунтового розчину та зазнають окисно-відновних трансформацій, що змінюють їхню токсичність.

Можна виділити чотири типи просторової взаємодії осередків навантаження в межах ураженої території.

Перший – ізолюваний осередок, коли кожен випадок ураження формує локальну зону токсичності без перетину з іншими, що характерно для розрідженого техногенного навантаження.

Другий – адитивне накладання, при якому зони токсичності частково перекриваються, і їхній вплив

підсумовується, збільшуючи інтегральне забруднення ділянки.

Третій – синергетичний ефект, що виникає в разі просторового збігу декількох зон ураження, коли їх взаємодія призводить до посилення загального токсичного ефекту внаслідок підвищеної концентрації чи активації хімічних сполук.

Четвертий – антагоністичний ефект, який передбачає часткове нівелювання дії окремих токсикантів через хімічну взаємодію між ними, що знижує загальну токсичність середовища. Хоча ймовірність такого сценарію є низькою, його слід враховувати на рівні гіпотетичної моделі.

Усі ці реакції визначають форму існування забруднювачів, їхню рухомість та тривалість збереження у ґрунтовому середовищі.

Оскільки пряма оцінка та відбір проб в умовах воєнних дій обмежені, модель розробляється на основі геопросторових (статистичних) даних про кількість уражень з урахуванням природніх факторів, що впливають на поширення та накопичення токсичних речовин у ґрунті (геологічної вразливості та метеорологічного прискорення). Тобто, вхідними даними є кількість, тип (якщо доступно) ракетно-артилерійських уражень на території, координати кожного ураження, час, що минув з моменту ураження, геологічні та метеорологічні дані.

Для формалізації поля формуємих моделей досліджувана територія поділяється на комірки розміром 100×100 м – це оптимальний баланс між детальністю аналізу та обчислювальними ресурсами. Кожна комірка має координати центру (x_i, y_i) . Розбиття території на дискретні комірки дозволяє кількісно описати локальне навантаження забруднювачів.

Кожне ураження розглядається як точка із зоною впливу – колом радіусу r , у межах якого потенційно відбувається забруднення ґрунту. Інтенсивність токсичності зменшується із збільшенням відстані від центру.

Інтенсивність впливу можна описати аналітичною функцією – лінійною спадною:

$$P(d) = P_0 \left(1 - \frac{d}{r}\right), 0 \leq d \leq r \quad (1)$$

де P_0 – максимальна інтенсивність впливу у центрі; d – відстань від центра ураження.

Для комірки i із центром у точці (x_i, y_i) сумарний вплив від усіх уражень M із координатами (x_j, y_j) обчислюється як сума внесків від усіх джерел забруднення, що мають ненульовий вплив у межах зони впливу:

$$S_i = \sum_{j=1}^M P_0^{(j)} \cdot \left(1 - \frac{d_{ij}}{r_j}\right) \cdot \delta(d_{ij} \leq r_j), \quad (2)$$

де S_i – сумарна інтегральна інтенсивність впливу у комірці i ; $P_0^{(j)}$ – максимальна інтенсивність впливу від джерела j ; d_{ij} – відстань між центром комірки i та джерелом j : $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$, r_j – радіус зони впливу ураження j ; $\delta(d_{ij} \leq r_j)$ – функція, яка дорівнює 1, якщо $d_{ij} \leq r_j$, і 0 – в іншому випадку; M – абсолютна числова величина – скільки разів територія була уражена в межах досліджуваної зони або ділянки.

Розміри зони впливу ураження значною мірою залежать від типу застосованого боєприпасу, геологічних та метеорологічних умов у момент та після вибуху.

Геологія території визначає механічні та хімічні властивості ґрунтів, які впливають на розподіл та стабільність забруднювачів. Тип ґрунту (піски, глини, супіски) обумовлює пористість і водопроникність, що визначає швидкість просочування токсичних речовин. Структура та склад ґрунту, включаючи вміст органічної речовини та мінеральний склад, формують здатність ґрунтового середовища до сорбції та адсорбції забруднюючих сполук. Наявність водотривких шарів або тріщин у

геологічному розрізі може посилювати або ускладнювати вертикальну й горизонтальну міграцію токсичних елементів.

Для врахування цих параметрів у моделі застосовується геологічний коефіцієнт $I_{geo} \in [0, 1]$, який модифікує інтенсивність забруднення у комірці залежно від типу і властивостей ґрунту:

$$C_{ij} = C_0 \cdot I_{geoij} \cdot e^{-\lambda d_{ij}}, \quad (3)$$

де C_{ij} – концентрація забруднюючої речовини у комірці i, j ; C_0 – початкова концентрація в джерелі забруднення; I_{geoij} – геологічний коефіцієнт для комірки i, j ; λ – коефіцієнт загасання залежно від середовища.

Коефіцієнт I_{geo} визначається на основі комплексної оцінки типу ґрунту, його гранулометричного складу, водопроникності та сорбційних характеристик:

$$I_{geo} = f(k_{por}, k_{org}, k_{min}, \vartheta), \quad (4)$$

де k_{por} – коефіцієнт пористості; k_{org} – вміст органічної речовини; k_{min} – мінеральний склад (наприклад, вміст глини); ϑ – структурні особливості (наявність тріщин, водотривких шарів).

Метеорологічні умови суттєво впливають як на хімічні перетворення забруднювачів, так й на фізичні процеси їх перенесення в довкіллі. Зокрема, опади (дощ або сніг) сприяють вимиванню токсичних речовин у глибші шари ґрунту або безпосередньо до джерел ґрунтових і поверхневих вод. Температурний режим та рівень вологості визначають швидкість хімічного розкладу забруднюючих сполук і формування нових у ґрунті. Крім того, вітер може переносити пилові частинки та аерозолі з територій, уражених забрудненням, що призводить до вторинного поширення токсичних агентів.

Для кількісного врахування сукупного впливу погодних факторів упродовж досліджуваного періоду до моделі вводиться метеорологічний

коефіцієнт $I_{meteo} \in [0, 1]$, значення якого визначається як нормалізована функція:

$$I_{meteo}(t) = w_1 \cdot f_{rain}(t) + w_2 \cdot f_{temp}(t) + w_3 \cdot f_{hum}(t) + w_4 \cdot f_{wind}(t), \quad (5)$$

де $f_{rain}(t)$ – функція інтенсивності опадів у момент часу t ; $f_{temp}(t)$ – функція температурного впливу; $f_{hum}(t)$ – вплив вологості; $f_{wind}(t)$ – оцінка вітрового транспорту забруднення; w_1, w_2, w_3, w_4 – вагові коефіцієнти, що відображають відносну важливість кожного фактора ($\sum w_i = 1$).

Об'єднуючи всі коефіцієнти, отримуємо скориговану інтенсивність впливу одиничного ураження j у комірці i :

$$P_j^{cor}(d_{ij}, t) = P_j(d_{ij}) \cdot I_{geo}(t) \cdot I_{meteo}(t), \quad (6)$$

Сумарна потенційна токсичність у комірці i дорівнює сумі внесків від усіх уражень M :

$$S_i = \sum_{j=1}^M P_j^{cor}(d_{ij}, t) \quad (7)$$

Для отримання відносного індексу токсичності:

$$R_{s,i} = \frac{S_i}{\max_k S_k}. \quad (8)$$

де S_i – це значення індексу (наприклад, токсичності) у конкретній комірці i ; $\max_k S_k$ – це максимальне значення індексу S_k серед усіх комірок k на розглянутій території.

$R_{s,i}$ – відносний індекс, який лежить у проміжку від 0 до 1; можна використовувати для ідентифікації критичних зон, подальшої оцінки ризику та картографування.

Для проведення оцінки ймовірності розвитку медико-біологічної надзвичайної ситуації (МБНС) вихідними даними є $R_{s,i}$ – відносний індикатор забруднення ґрунту в комірці i , визначений за попередньою задачею; Z_i – щільність населення в зоні i ; I_{CI} – вразливість населення в клітинці i

(вік, хронічні захворювання, соціальні умови тощо), нормована до діапазону $[0; 1]$; D_i – ймовірність міграції токсикантів у критичні середовища (грунтові води, повітря), нормована $[0; 1]$.

Визначимо узагальнений індекс впливу забруднення на населення:

$$H_i = R_{s,i} \cdot I_{CI} \cdot D_i. \quad (9)$$

Цей індекс показує, наскільки сильно конкретна територія потенційно небезпечна з точки зору токсичного впливу на вразливе населення при можливій міграції токсикантів.

Ймовірність виникнення МБНС визначається функцією:

$$P_{\text{МБНС},i} = 1 - e^{-\alpha H_i Z_i}, \quad (10)$$

де α – емпіричний коефіцієнт масштабу $(0,001-0,01)$, який налаштовується згідно з епідеміологічними даними.

Ця функція має експоненціальний вигляд, що відображає різке зростання ймовірності при досягненні критичних значень забруднення.

Таблиця 1 – Інтерпретація результатів

$P_{\text{МБНС},i}$	Рівень ризику	Рекомендації
0,00–0,25	Низький	Моніторинг не обов'язковий
0,26–0,50	Середній	Періодичний моніторинг, оцінка соціального впливу
0,51–0,75	Високий	Санітарне обстеження, профілактика, обмеження господарського використання
0,76–1,00	Критичний	Евакуація, карантинні заходи, термінове очищення середовища

Значення $P_{\text{МБНС},i}$ можуть бути покладені в основу теплової карти ризику, яка відображатиме пріоритетні зони для моніторингу та тестування населення, оцінки забруднення харчових продуктів,

визначення потреби в гуманітарній допомозі.

Модель може бути вдосконалена для відображення змін у часі, тобто враховувати, як із часом зменшується вплив забруднення (через розпад або вимивання токсичних речовин), використовуючи час t_i після ураження для коригування індексу ризику H_i :

$$H_i(t) = H_i \cdot e^{-\lambda t_i}, \quad (11)$$

де λ – коефіцієнт деградації або розпаду токсикантів.

Якщо потрібно врахувати посилення небезпеки з часом, тобто не розпад, а накопичення або погіршення умов, У цьому випадку часовий параметр t_i посилює вагу кожного джерела ураження.

$$H_i(t) = H_i \cdot (1 + \alpha \cdot t_i), \quad (12)$$

де H_i – базове значення токсичності у комірці i ; t_i — час у днях або тижнях з моменту ураження; α — коефіцієнт накопичення, який показує, як швидко токсиканти акумулюються з часом.

Модель реалізується в середовищі геоінформаційних систем (ГІС), що забезпечує інтеграцію просторових даних про ураження, геологічні характеристики ґрунту та метеорологічні умови в єдину аналітичну платформу. Використання ГІС дозволяє не лише автоматизувати обробку великих обсягів інформації, але й здійснювати візуалізацію розподілу токсичних забруднень у вигляді теплових карт, що суттєво полегшує ідентифікацію зон підвищеного ризику.

Як було зазначено, геопросторовий підхід передбачає поділ досліджуваної території на дискретні комірки з фіксованими координатами, у межах яких обчислюється сумарна інтенсивність токсичного впливу. Такий підхід забезпечує гнучкість і масштабованість моделі, дозволяючи аналізувати як локальні, так і регіональні тенденції забруднення. Для кожної комірки враховуються внески від усіх точкових джерел уражень із застосуванням аналітичної функції залежності

інтенсивності токсичного впливу від відстані до осередку ураження, а також корекційних коефіцієнтів, що відображають геологічну вразливість та поточні метеоумови. Це дає змогу моделювати динаміку поширення токсикантів з урахуванням природних процесів фільтрації, сорбції та міграції.

Реалізація моделі в ГІС-середовищі забезпечує можливість оперативного оновлення вхідних даних, що особливо важливо в умовах воєнних дій, коли оперативна інформація про нові ураження та зміну погодних умов є обмеженою та мінливою. Крім того, платформа дозволяє створювати сценарні аналізи, порівнювати варіанти розвитку подій і формувати рекомендації щодо зон пріоритетного моніторингу та евакуації населення.

Висновки та напрями подальших досліджень. Сформульовано функціональне поле існування інформаційно-технічних методів попередження надзвичайних ситуацій, що представляє собою модель оцінки токсичного впливу, яка ґрунтується на

геопросторовому аналізі кількості та розподілу уражень з урахуванням геологічних та метеорологічних факторів. Територія поділяється на комірки розміром 100×100 м, що дозволяє кількісно описати локальне забруднення та обчислити відносний індекс токсичності для кожної комірки. Модель використовує аналітичні функції для моделювання інтенсивності токсичного впливу, враховуючи відстань до центру ураження, тип ґрунту та метеорологічні умови. Оцінка ймовірності розвитку медико-біологічної надзвичайної ситуації здійснюється на основі поєднання індексу токсичності, вразливості населення та ймовірності міграції токсикантів. Реалізація моделі в середовищі геоінформаційних систем дозволяє автоматизувати обробку та візуалізацію даних, створюючи теплові карти для ідентифікації зон підвищеного ризику. Оперативне оновлення даних забезпечує ефективну адаптацію моделі до умов воєнного конфлікту та мінливих погодних умов.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Novakovska, I., Belousova, N., & Hunko, L. (2025). Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 24(1), 129–145.
2. Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*, 12(21), 9002.
3. Рашкевич Н. В., Шевченко Р. І., Ребров О. В. Обґрунтування процедур з оптимізації відбору проб ґрунту з метою попередження надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations». Харків: НУЦЗ України, 2024 р. С. 93–94.
4. Rashkevich, N., Shevchenko, R., & Yeremenko, S. (2025). Development of an Organizational and Technical Method of Emergency Prevention of Technological Character On the Territory Which Was Attacked by Rocket and Artillery Impacts. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control*, 595, 717–747. Springer, Cham.
5. Бондоренко А. Ю., Рашкевич Н. В., Шевченко Р. І. Методи дослідження стану ґрунтів в контексті вирішення задач цивільного захисту територіальних громад. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) «Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих вчених» Черкаси: ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля, 16 травня 2024 р. С. 12–14.
6. Bai, J., & Zhao, X. (2020). Ecological and human health risks of heavy metals in shooting range soils: A meta assessment from China. *Toxics*, 8(2), 32.
7. Black, O., Smith, S. C., & Roper, C. (2021). Advances and limitations in the determination and assessment of gunshot residue in the environment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 208, 111689.
8. Рашкевич Н. В. Фактори впливу на розподіл важких металів у ґрунтовому середовищі. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations». Харків: НУЦЗ України, 2022 р. С. 217–218.
9. Рашкевич Н. В. Питання актуальності визначення небезпеки ґрунтів для потреб відновлювання уражених територій. Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Problems of Emergency Situations». Харків: НУЦЗ України, 2023 р. С. 118–119.
10. Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. 3rd Edition. Springer.
11. Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., & Bi, J. (2018). A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of the total environment*, 642, 690–700.
12. Yi, S., Chen, W., Li, X., & Dong, J. (2024). Decoding the terrain of soil heavy metal (oid) s: Health risk assessment through a bibliometric analysis of trends, hotspots, and future horizons. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 16, 100471.

13. Panqing, Y., Abliz, A., Xiaoli, S., & Aisaiduli, H. (2023). Human health-risk assessment of heavy metal-contaminated soil based on Monte Carlo simulation. *Scientific Reports*, 13(1), 7033.
14. Aradhi, K. K., Dasari, B. M., Banothu, D., & Manavalan, S. (2023). Spatial distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in topsoil around oil and natural gas drilling sites, Andhra Pradesh, India. *Scientific Reports*, 13(1), 10614.
15. Rintoul-Hynes, N., Carey, J., Splodytel, A., & Ferguson, C. (2024, December). Environmental Pollution from the Russia-Ukraine Conflict: Results from a Large-Scale Field Study. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2024, No. 334, pp. GC33O-0334).
16. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614.
17. Altahaan, Z., & Dobslaw, D. (2024). The impact of war on heavy metal concentrations and the seasonal variation of pollutants in soils of the conflict zone and adjacent areas in Mosul city. *Environments*, 11(11), 247.
18. Yakymchuk, A., Balanda, O., & Bzowska-Bakalarz, M. (2024). Assessment of soil contamination of Ukraine with heavy metals during the war. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization & Management/Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie*, 196.
19. Shit, P. K., Adhikary, P. P., & Sengupta, D. (2023). GIScience applied to soil-agricultural health and environmental risk assessment. *Environmental science and pollution research*, 30(55), 116413–116420.
20. USEPA Risk Assessment Guidance for Superfund, 2004. https://www.epa.gov/risk/superfund-risk-assessment?utm_source=chatgpt.com
21. Kumar, V., Pandita, S., Sharma, A., Bakshi, P., Sharma, P., Karaouzas, I., ... & Cerda, A. (2021). Ecological and human health risks appraisal of metal (loid)s in agricultural soils: A review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 5(3), 173–185.
22. Hu, G., Liu, H., Chen, C., Li, J., Hou, H., Hewage, K., & Sadiq, R. (2021). An integrated geospatial correlation analysis and human health risk assessment approach for investigating abandoned industrial sites. *Journal of Environmental Management*, 293, 112891.
23. Wu, Y., Xia, Y., Mu, L., Liu, W., Wang, Q., Su, T., ... & Zhang, Y. (2024). Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils based on multi-receptor modeling combined with Monte Carlo simulation. *Toxics*, 12(9), 643.
24. Дівізінюк М. М., Єременко С. А., Левтеров О. А., Пруський А. В., Стрілець В. В., Стрілець В. М., Шевченко Р. І. *Теоретичні засади парадигми «Цивільний захист»: монографія. Під заг. редакцією М.М. Дівізінюка та Р.І. Шевченка. Київ: ТОВ «АЗИМУТ-ПРИНТ», 2022. 335 с.*
25. Лобойченко В. М., Дівізінюк М. М., Шевченко Р. І., Федорчук-Мороз В. І., Рашкевич Н. В. *Методи попередження надзвичайних ситуацій техногенного та медико-біологічного характеру на об'єктах критичної інфраструктури за використання ідентифікації водних розчинів: монографія. Луцьк: Вежа-Друк, 2025. 324 с.* <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25384>

REFERENCES

1. Novakovska, I., Belousova, N., & Hunko, L. (2025). Land degradation in Ukraine as a result of military operations. *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum*, 24(1), 129–145. [in English].
2. Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*, 12(21), 9002. [in English].
3. Rashkevich, N. V., Shevchenko, R. I., & Rebrov, O.V. (2024). Obgruntuvannya protsedury z optymizatsiyi vidboru prob obgruntovanosti z pryznachenniam poperedzhennya nadzvychaynykh sytuatsiy tekhnohennoho kharakteru. *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy»*. Kharkiv: NUTSZ Ukrainy, 93–94. [in Ukrainian].
4. Rashkevich, N., Shevchenko, R., & Yermenko, S. (2025). Development of an Organizational and Technical Method of Emergency Prevention of Technological Character On the Territory Which Was Attacked by Rocket and Artillery Impacts. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control*, 595, 717–747. Springer, Cham. [in English].
5. Bondorenko, A. Yu., Rashkevich, N. V., & Shevchenko, R. I. (2024). Metody doslidzhennya stanut' obgruntovanyymi v konteksti vyryshennya zavdan' tsyvil'noho zakhystu terytorial'nykh hromad. *Materialy Vseukrayins'koyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi kursantiv, studentiv, ad'yunktiv (aspirantiv) «Nauka pro tsyvil'nyy zakhyst yak shlyakh stanovlennya molodykh vchenykh»*. Cherkasy: CHIPB im. Heroyiv Chornobylya, 12–14. [in Ukrainian].
6. Bai, J., & Zhao, X. (2020). Ecological and human health risks of heavy metals in shooting range soils: A meta assessment from China. *Toxics*, 8(2), 32. [in English].
7. Black, O., Smith, S. C., & Roper, C. (2021). Advances and limitations in the determination and assessment of gunshot residue in the environment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 208, 111689. [in English].
8. Rashkevich, N.V. (2022). Faktory vplyvu na rozpodil vazhkykh metaliv u obgruntovanomu seredovyshchi. *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy»*. Kharkiv: NUTSZ Ukrainy, 217–218. [in Ukrainian].
9. Rashkevich, N.V. (2023). Pytannya aktual'nosti vyznachennya nebezpeky obgruntuvan' dlya potreb vidnovlennya urazhenykh terytoriy. *Materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi «Problemy nadzvychaynykh sytuatsiy»*. Kharkiv: NUTSZ Ukrainy, 118–119. [in Ukrainian].
10. Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. 3rd Edition. Springer. [in English].
11. Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., & Bi, J. (2018). A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of the total environment*, 642, 690–700. [in English].
12. Yi, S., Chen, W., Li, X., & Dong, J. (2024). Decoding the terrain of soil heavy metal (oid)s: Health risk assessment through a bibliometric analysis of trends, hotspots, and future horizons. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 16, 100471. [in English].
13. Panqing, Y., Abliz, A., Xiaoli, S., & Aisaiduli, H. (2023). Human health-risk assessment of heavy metal-contaminated soil based on Monte Carlo simulation. *Scientific Reports*, 13(1), 7033. [in English].

14. Aradhi, K. K., Dasari, B. M., Banothu, D., & Manavalan, S. (2023). Spatial distribution, sources and health risk assessment of heavy metals in topsoil around oil and natural gas drilling sites, Andhra Pradesh, India. *Scientific Reports*, 13(1), 10614. [in English].
15. Rintoul-Hynes, N., Carey, J., Splodytel, A., & Ferguson, C. (2024, December). Environmental Pollution from the Russia-Ukraine Conflict: Results from a Large-Scale Field Study. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2024, No. 334, pp. GC33O-0334). [in English].
16. Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. [in English].
17. Altahaan, Z., & Dobslaw, D. (2024). The impact of war on heavy metal concentrations and the seasonal variation of pollutants in soils of the conflict zone and adjacent areas in Mosul city. *Environments*, 11(11), 247. [in English].
18. Yakymchuk, A., Balanda, O., & Bzowska-Bakalarz, M. (2024). Assessment of soil contamination of Ukraine with heavy metals during the war. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization & Management/Zeszyty Naukowe Politechniki Slaskiej. Seria Organizacji i Zarzadzanie*, 196. [in English].
19. Shit, P. K., Adhikary, P. P., & Sengupta, D. (2023). GIScience applied to soil-agricultural health and environmental risk assessment. *Environmental science and pollution research*, 30(55), 116413–116420. [in English].
20. USEPA Risk Assessment Guidance for Superfund, 2004. https://www.epa.gov/risk/superfund-risk-assessment?utm_source=chatgpt.com
21. Kumar, V., Pandita, S., Sharma, A., Bakshi, P., Sharma, P., Karaouzas, I., ... & Cerda, A. (2021). Ecological and human health risks appraisal of metal (loid) s in agricultural soils: A review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 5(3), 173–185. [in English].
22. Hu, G., Liu, H., Chen, C., Li, J., Hou, H., Hewage, K., & Sadiq, R. (2021). An integrated geospatial correlation analysis and human health risk assessment approach for investigating abandoned industrial sites. *Journal of Environmental Management*, 293, 112891. [in English].
23. Wu, Y., Xia, Y., Mu, L., Liu, W., Wang, Q., Su, T., ... & Zhang, Y. (2024). Health risk assessment of heavy metals in agricultural soils based on multi-receptor modeling combined with Monte Carlo simulation. *Toxics*, 12(9), 643. [in English].
24. Divizynyuk, M. M., Yermenko, S. O., Lyevtyerov, O. O., Prus'kyi, O. V., Strilets', V. V., Strilets', V. M., & Shevchenko, R. I. (2022). Teoretychni zasidky paradyhmy «Tsyvil'nyy zakhyst»: monohrafiya. Pid zah. redaktsiyeyu M.M. Divizynyuka ta R.I. Shevchenka. Kyiv: TOV "AZIMUT-PRINT", 335 s. [in Ukrainian].
25. Loboychenko, V. M., Divizynyuk, M. M., Shevchenko, R. I., Fedorchuk-Moroz, V. I., & Shevchenko, R. I. (2022). Teoretychni zasidky paradyhmy «Tsyvil'nyy zakhyst»: monohrafiya. Pid z Rashkevich N. V. (2025). Metody poperedzhennya nadzvychaynykh sytuatsiy tekhnohennoho ta medyko-biologichnoho kharakteru na ob'yektyakh krytychnoyi infrastruktury dlya vykorystannya identyfikatsiyi vodnykh rozchyniv: monohrafiya. Luts'k: Vezha-Druk, 324 s. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/25384> [in Ukrainian].

FORMATION OF THE FUNCTIONAL FIELD OF INFORMATION AND TECHNICAL METHODS FOR PREVENTING MEDICAL AND BIOLOGICAL EMERGENCIES CAUSED BY SOIL CONTAMINATION IN COMBAT ZONES

N. Rashkevich, O. Rashkevich, M. Divizynyuk, R. Shevchenko, O. Shevchenko

¹*National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine*

²*Main Department of the State Service of Ukraine for Emergency Situations in the Kharkiv region, Ukraine*

³*Center for Information, Analytical and Technical Support for Monitoring of Nuclear Energy Facilities of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine*

KEYWORDS: ANNOTATION

soil
contamination,
functional
field,
information
and technical
method,
medical-
biological
emergency
situation,
toxicity.

The article addresses the problem of forming the functional field of information and technical methods for preventing emergencies caused by hazardous environmental impacts and areas contaminated with toxic remnants of military ordnance, particularly soil contamination with toxic substances that can remain toxic for extended periods of time. Due to the challenges of conducting classical monitoring in conflict zones, a method of indirect risk assessment is proposed, based on geospatial analysis of the quantity and distribution of impacts, taking into account natural factors that influence the spread of hazardous substances in the soil. The territory is divided into discrete cells, within which the total intensity of toxic impact is calculated, considering spatial interactions of contamination zones, geological characteristics of the soil, and meteorological conditions. Analytical formulas are proposed to describe the intensity of impact, modified by geological vulnerability and meteorological coefficients, as well as the calculation of a relative toxicity index for each cell. The scientific novelty lies in the development of a geospatial approach to modeling toxic contamination in conflict zones, integrating geological and meteorological factors, and combining spatial and social parameters to assess risks to public health. The intensity of impact from each event is modeled using an analytical linear function that takes into account the spatial dependence of the distance from the impact center. The modeling results are presented as risk heatmaps, which help identify critical zones for monitoring, evacuation, or preventive measures, which is especially important under conditions of limited access to field studies. The model also accounts for changes in toxicity over time due to degradation or accumulation of pollutants, making it an effective tool for risk assessment and the development of preventive strategies in emergency situations related to soil contamination in combat zones.