

Формування умов існування математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження

Formulation of the Conditions for the Existence of a Mathematical Model for Emergency Prevention in Areas Contaminated by Residues of Rocket and Artillery Strikes

Ніна Рашкевич^A

Corresponding author: PhD, доцент кафедри, e-mail: nine291085@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5124-6068

Ольга Шевченко^A

к.т.н., докторант, e-mail: shevchenkoolga2008@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2106-5009

Іван Рушчак^A

здобувач, e-mail: feirmen3@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-6654-7863

Володимир Крадожон^A

здобувач, e-mail: kradozhon.volodymyr_2024phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8037-9636

Вячеслав Краснов^A

здобувач, e-mail: krasnov.viacheslav_2022phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8445-6843

Nina Rashkevich^A

Corresponding author: PhD, Associate Professor of the Department, e-mail: nine291085@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5124-6068

Olga Shevchenko^A

Candidate of Technical Sciences, Doctoral Student, e-mail: shevchenkoolga2008@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2106-5009

Ivan Rushchak^A

PhD Student, e-mail: feirmen3@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-6654-7863

Volodymyr Kradozhon^A

PhD Student, e-mail: kradozhon.volodymyr_2024phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8037-9636

Viacheslav Krasnov^A

PhD Student, e-mail: krasnov.viacheslav_2022phd@nuczu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-8445-6843

^A Національний університет цивільного захисту України, м. Черкаси, Україна

^A National University of Civil Defence of Ukraine, Cherkasy, Ukraine

Received: October 11, 2025 | Revised: October 26, 2025 | Accepted: October 31, 2025

DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2025.15.5.12>

Мета роботи. Сформувати умови існування математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження шляхом вибору геометричних розмірів ділянки проведення комплексної оцінки ґрунтів.

Метод дослідження. Поєднання математичного моделювання, стратифікованого відбору проб ґрунтів та побудови індексної оцінки небезпеки з урахуванням просторової структури забруднення та взаємодії забруднювачів.

Результати дослідження. Запропоновано умови існування математичної моделі, які базуються на виборі оптимальних геометричних розмірів ділянки комплексної оцінки ґрунтів (100×100 м горизонтально та стратифіковані шари глибиною до 2 м).

Теоретична цінність дослідження. Отримані результати розширюють підходи до оцінки небезпеки ґрунтів, інтегруючи багаторівневий аналіз просторового розподілу та типологію взаємодій забруднювачів.

Практична цінність дослідження. Отримані результати дозволять планувати проведення моніторингу, визначати пріоритетні ділянки оцінки небезпеки та заходи з відновлення ґрунтів.

Цінність дослідження. Запропоновано новий підхід до математичного опису поширення загроз у зоні ураження з урахуванням як концентраційного профілю забруднювачів, так і їхньої взаємодії.

Обмеження дослідження. Обмеження стосуються точності початкових даних щодо типу, кількості та складу забруднювачів; дослідження спрямовані на розробку

Purpose. To formation the conditions for the existence of a mathematical model for emergency prevention in areas contaminated by residues of rocket and artillery strikes through the selection of geometric dimensions for the site of comprehensive soil assessment.

Method. The study employs an approach combining mathematical modeling, stratified soil sampling, and the construction of a risk index assessment, taking into account the spatial structure of contamination and pollutant interactions.

Findings. The study proposes the conditions for the existence of a mathematical model based on the selection of optimal geometric dimensions of the comprehensive soil assessment area (100×100 m horizontally and stratified layers up to 2 m deep). Formulas for hazard indices have been established, accounting for different types of pollutant interactions.

Theoretical implications. The results expand existing approaches to soil contamination risk assessment by integrating multilevel analysis of spatial distribution and pollutant interaction typology.

Practical implications. The results support the planning of monitoring activities, identification of priority areas for hazard assessment, and implementation of soil reclamation measures.

Originality/Value. A novel approach is proposed for the mathematical description of threat propagation in the affected zone, considering both pollutant concentration profiles and their interactions.

Research limitations/Future research. Limitations relate to the accuracy of initial data concerning the type, quantity, and composition

математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження.

Тип статті. Теоретичний.

of pollutants. Future research is aimed at the development of a mathematical model for emergency prevention in areas contaminated by residues of rocket and artillery strikes.

Paper type. Theoretical.

Ключові слова: початкові умови, граничні умови, вертикальні розміри, горизонтальні розміри, ґрунт, надзвичайна ситуація.

Key words: initial conditions, boundary conditions, vertical dimensions, horizontal dimensions, soil, emergency situation.

Вступ

Воєнні дії, що супроводжуються застосуванням ракетно-артилерійських систем (РАС), призводять до масштабного забруднення компонентів довкілля, зокрема ґрунтів [1, 2], які здатні тривалий час акумулювати токсичні речовини. Такий тип забруднення характеризується складною просторово-часовою структурою, високою варіабельністю та значним потенціалом до пролонгованого фізіологічного впливу на населення. Небезпеку становлять синергетичні та адитивні ефекти взаємодії забруднювачів у поєднанні з ускладненими умовами їх міграції в ґрунтового середовищі. Для проведення комплексної оцінки ступеня забруднення необхідно враховувати як фактори оточуючого середовища, так й типологію взаємодії забруднюючих речовин.

Теоретичні основи дослідження

Забезпечення достовірної оцінки рівня забруднення ґрунтів вимагає обґрунтованого визначення параметрів спостереження – просторового охоплення.

В роботі [3] виділені фактори, що впливають на розподіл важких металів у ґрунтах уражених територій, серед яких тип ґрунту, гранулометричний склад, гідрологічні умови та антропогенне навантаження.

Дослідниками [4–6] висвітлені підходи оптимізації пробовідбору в умовах надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру на територіях, що постраждали внаслідок бойових дій. Запропоновано алгоритм поетапного формування математичної моделі прогнозування забруднення та пов'язаних з цим небезпек.

Показано, що у межах одного поля ґрунтові характеристики можуть значно варіювати, що ускладнює отримання репрезентативних проб та знижує достовірність оцінок без адаптації до локальних умов [7]. З цією метою розробляються спеціалізовані схеми пробовідбору, що враховують локальну гетерогенність, дають змогу підвищити точність картографування сільськогосподарських угідь [8].

У роботі [9] запропоновано метод оптимізації сітки відбору проб для класифікації земель за рівнями забруднення, що базується на супутникових спостереженнях та враховує різні сценарії забруднення. Це дозволяє мінімізувати кількість проб при збереженні високої якості результатів. Додатково, ефективність прогнозування просторового розподілу важких металів можна покращити шляхом використання інтерполяційних моделей з адаптивною точністю, які комбінують дані різної надійності [10].

Моделювання на популяційному рівні мікроорганізмів [11] розширює традиційні підходи до оцінки забруднення, оскільки дозволяє враховувати не лише концентраційні показники, а й просторову структуру впливу забруднювачів та відповідні біологічні реакції організмів.

Проведено порівняння точності кригінг-інтерполяції при використанні двох схем пробовідбору: регулярної сітки та випадкового розподілу. Показано переваги систематичного підходу для забезпечення точності [12].

У роботі [13] запропоновано просторово-часову стратегію пробовідбору, спрямовану на підвищення ефективності оцінювання гідралічних характеристик ґрунтів. Увагу приділено необхідності поєднання високої просторової щільності та частоти спостережень для

забезпечення достовірності результатів в умовах вираженої гетерогенності ґрунтового середовища.

Дослідниками [14] проаналізовано вертикальний розподіл важких металів у ґрунтовому профілі та оцінено потенційні ризики забруднення підземних вод. Встановлено диференційовану глибину проникнення окремих елементів, що підкреслює доцільність впровадження вертикально-стратифікованого моніторингу для раннього виявлення загроз.

У дослідженні [15] визначено оптимальні параметри глибини пробовідбору та просторової дискретизації для моніторингу важких металів у сільськогосподарських ґрунтах. Отримані результати свідчать про доцільність адаптивного підходу, що враховує тип ґрунту та специфіку міграційної поведінки окремих елементів-забруднювачів.

Запропоновано метод оптимізації схеми пробовідбору для цифрового картографування ґрунтів [16]. Показано, що інтеграція методів машинного навчання сприяє підвищенню точності просторових прогнозів при одночасному зменшенні обсягу вибірових даних. В огляді [17] представлені сучасні тенденції у картографуванні та управлінні ґрунтами з використанням геостатистичних методів, інтегрованих алгоритмів машинного навчання й дистанційного зондування.

Постановка проблеми

Складність та масштабність забруднення ґрунтів унаслідок бойових дій створюють низку викликів для його просторової оцінки, класифікації рівнів небезпеки та прогнозування наслідків. Наявність значного обсягу вхідних змінних – типів забруднювачів, особливостей ґрунту, гідрогеологічних умов, воєнного навантаження, структури землекористування – вимагає комплексного підходу до аналізу.

Традиційні методи оцінки стану ґрунтів базуються переважно на локальному відборі проб та лабораторному аналізі, що є трудомістким, затратним й потенційно небезпечним у зонах активних бойових дій або поблизу критичної інфраструктури. У зв'язку з цим актуальним є розроблення методу попередження НС в основі якого має бути математична модель з початковими та граничними умовами, що визначають просторові межі небезпеки, забезпечуючи достовірність подальших оцінок та прогнозів.

Методологія дослідження

Мета дослідження – сформулювати умови існування математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження шляхом вибору геометричних розмірів ділянки проведення комплексної оцінки ґрунтів.

Для досягнення поставленої мети необхідно визначити початкові та граничні умови математичної моделі, враховуючи базові межі ділянки для проведення комплексної оцінки ґрунтів.

Об'єктом дослідження є процес попередження надзвичайних ситуацій на територіях із підтвердженням техногенним забрудненням, зокрема в умовах пролонгованої небезпеки.

Предметом дослідження є фактори небезпеки поширення надзвичайних ситуацій на території ураження.

Результати

Початковими умовами існування математичної моделі будемо вважати наявність у поверхневому шарі ґрунту хімічно-небезпечних сполук ρ_{saf} на рівні гранично допустимої концентрації (ГДК):

$$\rho_{saf}^i(x_0, y_0, z_0, t) = \text{ГДК}^i, \quad (1)$$

де x_0, y_0, z_0 – початкові координати джерела забруднення;
 i – хімічно-небезпечна сполука, яка досягла своєї межі ГДК^{*i*}.

Початкові умови математичної моделі визначають просторовий розподіл воєнного навантаження, яке генерує вхідну концентрацію забруднюючих речовин у поверхневих шарах ґрунту на момент початку моделювання ($t = 0$). Це навантаження відображає наслідки бойового впливу (вибух, горіння тощо), що формує зону первинного забруднення.

Таким чином, у початковий момент часу в точці джерела забруднення концентрація кожного компонента задається на рівні його нормативного граничного значення, що слугує вихідною точкою для подальшого моделювання розповсюдження забруднювачів у ґрунтовому середовищі та визначення меж ділянки для проведення комплексної оцінки.

Основним підходом визначення базових горизонтальних меж ділянки комплексної оцінки ґрунтів на територіях забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження (РАУ) є використання універсального кратного розміру ділянки 100×100 метрів, що забезпечує баланс між точністю та практичною придатністю.

Умови визначення таких розмірів включають три основні фактори:

1. Характер та калібр застосованих засобів РАУ. Різні види боєприпасів та калібри зумовлюють масштаби забруднення ґрунту. Горизонтальні розміри ділянки 100×100 м є доцільними для охоплення більшості типових зон ураження, що виникають при застосуванні боєприпасів середнього калібру.

Умова охоплення зони ураження:

$$A_r \geq A_{in} \Rightarrow L \cdot B \geq \pi \cdot R_{in}^2, \quad (2)$$

де A_r – площа досліджуваної ділянки (м²);
 A_{in} – площа зони ураження (м²);
 R_{in} – характерний радіус зони ураження (м), що залежить від типу/калібру;
 L, B – горизонтальні розміри досліджуваної ділянки (м).

2. Типовий розподіл землекористування. Згідно з Державним земельним кадастром, у міських районах приватні ділянки становлять 0,05–0,25 га, а в сільській місцевості – до 0,5–1,0 га. Вибір ділянки розміром 100×100 м дозволяє забезпечити покриття щонайменше кількох суміжних землеволодінь або однієї великої садибної чи присадибної території, що робить такий підхід практично орієнтованим.

Умова узгодженості з масштабом землекористування:

$$A_r = L \cdot B \in [A_{max}^{city}, A_{max}^{villeg}], \quad (3)$$

де A_{min}, A_{max} – типові мінімальні та максимальні площі землеволодінь (м²),
 для міста: $A_{min} = 500 \text{ м}^2, A_{max} = 2500 \text{ м}^2$;
 для села: $A_{max}^{villeg} = 10000 \text{ м}^2$.

3. Технічна сумісність з ГІС-технологіями. Горизонтальні розміри ділянки 100×100 м забезпечують зручність інтеграції результатів дослідження в геоінформаційні системи, дозволяючи ефективно зберігати, обробляти, візуалізувати та аналізувати просторові дані.

Для забезпечення сумісності з типовими осередками цифрових карт та алгоритмами просторового аналізу рекомендується: $L = B = 100 \text{ м}$, або як варіант, кратні значення:

$$L = B = n \cdot 100, n \in \mathbb{N} \quad (4)$$

Система базових умов має вид:

$$\begin{cases} L \cdot B \geq \pi \cdot R_{in}^2 \\ L \cdot B \in [2500, 10000] \\ L = B = n \cdot 100, n \in \mathbb{N} \end{cases} \quad (5)$$

$$L = B = 100 \text{ м}, A_r = 10000 \text{ м}^2.$$

Таким чином, базовими горизонтальними межами ділянки комплексної оцінки ґрунтів є 100×100 м, оскільки така площа дозволяє повною мірою охопити зону ураження, спричинену більшістю типів боєприпасів ракетно-артилерійських систем; відповідає типовим розмірам земельних ділянок у сільській місцевості (присадибні, садибні, сільськогосподарські угіддя), а також є узгодженою з агрегованими осередками просторового аналізу у межах міських забудов; крім того, даний розмір масштабується в рамках геоінформаційних систем, забезпечуючи кратність сітки, необхідну для точного картографування та оцінки небезпеки.

Основним підходом визначення вертикальних меж ділянки комплексної оцінки ґрунтів на територіях забруднених залишками РАУ є врахування вимог нормативних документів щодо вибору глибини відбору проб, що враховують як характеристики потенційного забруднення, так й цільове призначення дослідження. Необхідно забезпечувати дотримання гігієнічних нормативів, визначених чинним законодавством України.

Відповідно до Наказу Міністерства охорони здоров'я України від 14.07.2020 № 1595, яким затверджено Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті [18], встановлено ГДК для хімічних сполук, небезпечних для здоров'я людини. До переліку регламентованих речовин входять як неорганічні забруднювачі (зокрема кадмій, свинець, ртуть), так й органічні токсиканти. У разі наявності цих речовин у ґрунтового середовищі необхідне проведення просторового аналізу поширення забруднення, включно з оцінкою вертикального розподілу, що потребує обґрунтованого визначення глибини відбору проб.

Технічне та методичне обґрунтування вертикальних розмірів ділянки відбору проб ґрунту здійснюється відповідно до положень серії стандартів, які стосуються якості ґрунту та відбору проб ДСТУ ISO 10381 [19–22]. Відповідно до цих документів, глибина відбору проб визначається з урахуванням мети дослідження, фізико-хімічних властивостей забруднювачів, типу джерела забруднення, типу ґрунту, геоморфологічних умов місцевості та гідрогеологічної ситуації. Однією з вимог є застосування стратифікованого підходу, який передбачає поділ ґрунтового профілю на послідовні шари (горизонти), з кожного з яких окремо відбираються проби для встановлення вертикального розподілу забруднення.

Крім того, у документах окреслено особливості відбору проб на урбанізованих та техногенно навантажених ділянках, де глибина пробовідбору повинна враховувати історичне використання території, наявність покриттів (асфальт, бетон), техногенне ущільнення, гідродинамічні бар'єри та можливість накопичення токсикантів на глибших рівнях.

Стандарти передбачають відбір проб із типових глибин:

0–0,1 м – є зоною безпосереднього контакту з людиною, використовується для оцінки поверхневого забруднення внаслідок атмосферного осідання або поверхневого розливу (h_0);

0,1–0,3 м – біологічно активний шар, де зосереджена більшість корневих систем рослин та мікроорганізмів (h_1);

0,3–0,5 м та 0,50–1 м – перехідні та підґрунтові шари, де відбувається акумуляція забруднювачів внаслідок вертикальної міграції (h_2) та (h_3);

понад 1 м – використовується при глибокому просочуванні забруднювачів або у випадках близького залягання ґрунтових вод (h_4).

Система базових умов має вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_0 = 0 - 0,10 \text{ м} \\ h_1 = 0,10 - 0,20 \text{ м} \\ h_2 = 0,30 - 0,50 \text{ м} \\ h_3 = 0,50 - 1,00 \text{ м} \\ h_4 = 1,00 - 2,00 \text{ м (за потреби)} \\ H_{max} = h_4^{up} \end{array} \right. , \quad (6)$$

де H_{max} – максимальна глибина, за умови загрози глибинного поширення.

Додаткова умова:

$H_{max} \in [1,00; 2,00]$ м, якщо $Z_{GW} \leq 2,00$ м або $Z_{cap} \leq 2,00$ м, де Z_{GW} – глибина залягання ґрунтових вод; Z_{cap} – глибина зони капілярного підняття.

З огляду на вище зазначене, глибина пробовідбору визначається сукупністю стратифікованих шарів:

$$H = \sum_{i=0}^n (h_i^{up} - h_i^{low}), \quad (7)$$

де n – це число рівнів стратифікації. Вибір значення n залежить від глибини з якої потрібно отримати репрезентативну інформацію про забруднення.

У межах вирішення задачі з визначення базових вертикальних меж ділянки відбору проб доцільним є застосування багаторівневої схеми стратифікованого пробовідбору: проби слід брати з поверхневого шару (0–10 см) – прямого контакту людини з ґрунтом; біологічно активного шару (10–30 см) – коренева зона рослинності; перехідного шару (30–50 см) – зона стійкого накопичення забруднювачів; підґрунтя (50–100 см), а за потреби – з глибших рівнів (100–200 см), зокрема поблизу зони капілярного підняття або рівня ґрунтових вод. Такий підхід забезпечує репрезентативність результатів, що потрібні для комплексної оцінки ґрунтів на територіях забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження.

Якщо розглядати задачу орієнтовану на комплексу оцінку ґрунтів, то доцільно обмежити базові вертикальні межі ділянки рівнем залягання ґрунтових вод. Це зумовлено тим, що саме ця глибина визначає межу потенційного вертикального поширення забруднення та виникнення пролонгованої небезпеки на населення. Такий підхід спрощує структуру оцінки, дозволяючи зосередитися на уразливих горизонтах без втрати загальної аналітичної точності при картографуванні та оцінці небезпеки.

В об'ємі (території) поширення НС Ω^H відбувається **взаємодія забруднювачів**.

Ізольована дія забруднювачів передбачає, що кожен компонент забруднення ґрунтового середовища впливає незалежно, без взаємного впливу на інші речовини. У цьому випадку токсичний ефект одного елемента не змінюється в присутності інших, а загальний вплив оцінюється як сукупність окремих дій. Ізольована дія на територіях, уражених РАС, можлива при фрагментарному забрудненні, наприклад, за умови локального влучання боєприпасів одного типу або в разі обмеженої хімічної взаємодії компонентів.

$$I_{iso}(x, y, z) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i(x, y, z)}{C_{i,norm}} \cdot w_i \right), \quad (8)$$

де $I_{iso}(x, y, z)$ – індекс небезпеки в точці з координатами (x, y, z) ;

n – кількість забруднювачів у моделі;

$C_i(x, y, z)$ – фактична концентрація i -го забруднювача у точці (x, y, z) (мг/кг);

$C_{i,norm}$ – нормативна гранично допустима концентрація (ГДК) для i -го забруднювача;

w_i – ваговий коефіцієнт токсичності або екотоксикологічної небезпеки для i -го елементу.

I_{iso} використовується як **базовий варіант**, коли всі забруднювачі діють незалежно. Радіус зони небезпеки R встановлюється при $I_{iso}(x, y, z) \geq 1$. $I_{iso} \geq 1$ означає, що хоча б один або кілька забруднювачів у точці (x, y, z) перевищують свій допустимий рівень з урахуванням токсикологічної ваги – тобто зона **небезпечна**.

Адитивна дія характеризується тим, що сумарний ефект кількох забруднювачів дорівнює арифметичній сумі ефектів кожного з них окремо. Така взаємодія виникає, коли забруднювачі мають схожі токсикологічні властивості, наприклад, важкі метали, які викидаються внаслідок вибухів техніки або руйнування інфраструктури. У цьому випадку початкова умова для сумарного індексу небезпеки I_{sum} може мати вигляд:

$$I_{sum}(x, y, z) = \sum_{g=1}^G \left(\sum_{i \in g} \frac{C_i(x, y, z)}{C_{i, norm}} \cdot w_i \right), \quad (9)$$

де g – група забруднювачів із подібним механізмом дії;

G – кількість таких груп.

Синергетична дія виникає тоді, коли спільна присутність кількох забруднювачів призводить до значно вищого токсичного ефекту, ніж можна було б очікувати на основі простої суми їхніх індивідуальних впливів. Така взаємодія може значно посилювати проникнення забруднень у ґрунтовий профіль, змінювати їхню біодоступність, прискорювати міграцію у ґрунтові води або викликати стійкі біохімічні зміни в біоценозах. Її актуальна для вибухонебезпечних речовин, продуктів горіння, залишків палива та важких металів, які можуть взаємно підсилювати токсичний ефект.

$$I_{syn}(x, y, z) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{i \in g} \frac{C_i(x, y, z)}{C_{i, norm}} \cdot w_i \right) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\gamma_{ij} \cdot \frac{C_i \cdot C_j}{C_{i, norm} \cdot C_{j, norm}} \right), \quad (10)$$

де $\gamma_{ij} > 0$ – коефіцієнт синергічної взаємодії між компонентами i та j .

Антагоністична дія спостерігається тоді, коли один забруднювач знижує токсичність або біодоступність іншого шляхом фізико-хімічної взаємодії, осадження, сорбції чи конкурентного зв'язування в ґрунтовій фазі. може проявлятися у районах з природною буферною здатністю ґрунтів або за наявності мінеральних компонентів, що зв'язують токсиканти. Тоді модель передбачає зменшення ефективної концентрації:

$$I_{anta}(x, y, z) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{i \in g} \frac{C_i(x, y, z)}{C_{i, norm}} \cdot w_i \right) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(\beta_{ij} \cdot \frac{C_i \cdot C_j}{C_{i, norm} \cdot C_{j, norm}} \right), \quad (11)$$

де $\beta_{ij} > 0$ – коефіцієнт антагоністичного гальмування дії між компонентами i та j .

Врахування типології взаємодій забруднювачів забезпечує підвищення точності прогнозу небезпеки, дозволяє уточнити межі небезпечних зон та обґрунтувати параметри моніторингу й подальших заходів з відновлення ґрунтів.

Висновки

Сформовано початкові та граничні умови математичної моделі попередження надзвичайних ситуацій на територіях забруднених залишками ракетно-артилерійського ураження, яка описує стан ґрунтового середовища на момент початку поширення небезпеки та проведення комплексної оцінки ґрунту.

Початкові умови моделі визначають наявність у поверхневому шарі ґрунту хімічно-небезпечних сполук на рівні гранично допустимої концентрації.

Граничні умови моделі визначають геометричні межі ділянки комплексної оцінки ґрунтів у горизонтальному та вертикальному напрямках.

Горизонтальні межі обґрунтовано на основі: типових масштабів ураження від засобів ракетно-артилерійського ураження; відповідності стандартам землекористування в межах міських та сільських територій; технічної сумісності з геоінформаційними системами (ГІС) та можливості масштабування. Визначено доцільність використання розміру ділянки 100×100 м.

Вертикальні межі визначено на основі положень серії стандартів ДСТУ ISO 10381, що регламентують стратифікований підхід. Запропоновано п'ятирівневу стратифіковану схему, яка враховує: зону прямого контакту з людиною, біологічно активний шар, зони вертикальної міграції та накопичення забруднювачів, глибини можливого просочування до рівня ґрунтових вод. У випадку виявлення ознак глибокого проникнення забруднювачів рекомендовано проводити оцінку до рівня залягання ґрунтових вод.

У межах об'єму поширення надзвичайної ситуації забруднювачі можуть взаємодіяти між собою за різними типами механізмів: ізолювано, адитивно, синергетично або антагоністично.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Список використаних джерел

1. 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. — С. 118–119.
2. Рашкевич Н. В. Визначення основних джерел забруднення ґрунтів та водних ресурсів під час військових конфліктів // *Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції "Problems of Emergency Situations"*. — Черкаси: НУЦЗ України, 2025. — С. 119–120.
3. 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. — С. 217–218.
4. 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. — С. 93–94.
5. Бондаренко А. Ю., Рашкевич Н. В., Шевченко Р. І. Методи дослідження стану ґрунтів у контексті вирішення завдань цивільного захисту територіальних громад // *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, ад'юнктів (аспірантів) "Наука про цивільний захист як шлях становлення молодих учених"* (м. Черкаси, 16 травня 2024 р.). — Черкаси: ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2024. — С. 12–14.
6. Рашкевич О. С., Рашкевич Н. В., Шевченко Р. І., Хмирова А. О. Етапи формування математичної моделі попередження надзвичайної ситуації в зоні бойових дій // *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції "Innovative Development of Science, Technology and Education"* (1–3 серпня 2024 р., Ванкувер, Канада). — С. 145–149.

7. Kardanpour Z., Jacobsen O. S., Esbensen K. H. Local versus field scale soil heterogeneity characterization – a challenge for representative sampling in pollution studies. *Soil*. 2015. Vol. 2(1). P. 619–645.
8. Wang Y., Qi Q., Bao Z., Wu L., Geng Q., Wang J. A novel sampling design considering the local heterogeneity of soil for farm field-level mapping with multiple soil properties. *Precision Agriculture*. 2023. Vol. 24(4). P. 1–22.
9. Gao B., Lu A., Pan Y., Huo L., Gao Y., Li X., ... Chen Z. Additional sampling layout optimization method for environmental quality grade classifications of farmland soil. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2017. Vol. 10(12). P. 5350–5358.
10. Ju L., Guo S., Ruan X., Wang Y. Improving the mapping accuracy of soil heavy metals through an adaptive multi-fidelity interpolation method. *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 330. 121827.
11. Meli M., Auclerc A., Palmqvist A., Forbes V. E., Grimm V. Population-level consequences of spatially heterogeneous exposure to heavy metals in soil: An individual-based model of springtails. *Ecological Modelling*. 2013. Vol. 250. P. 338–351.
12. Houlong J., Daibin W., Chen X., Shuduan L., Hongfeng W., Chao Y., ... Lina G. Comparison of kriging interpolation precision between grid sampling scheme and simple random sampling scheme for precision agriculture. *Eurasian Journal of Soil Science*. 2016. Vol. 5(1). P. 62–73.
13. Yu D., Zha Y., Shi L., Bolotov A., Tso C. H. M. Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2021. Vol. 35. P. 737–757.
14. Wang Y., Song Y., Li T. Vertical distribution of heavy metals in soil profile and implications for groundwater pollution. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 254. 113083.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113083>
15. Zhang X., Wang H., Li J. Optimal sampling depth and grid resolution for heavy metal monitoring in agricultural soils. *Science of The Total Environment*. 2020. Vol. 709. 136111.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136111>
16. Wadoux A. M. C., Brus D. J., Heuvelink G. B. M. Sampling design optimization for soil mapping with random forest. *Geoderma*. 2019. Vol. 355. 113913.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113913>
17. De Caires S. A., Martin C. S., Atwell M. A., Kaya F., Wuddivira G. A., Wuddivira M. N. Advancing soil mapping and management using geostatistics and integrated machine learning and remote sensing techniques: a synoptic review. *Discover Soil*. 2025. Vol. 2. 53.
18. Міністерство охорони здоров'я України. Наказ від 14 липня 2020 р. № 1595 “Про затвердження Гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті”. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>
19. ДСТУ ISO 10381-1:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 1. Настанови щодо складання програм відбирання проб (ISO 10381-1:2002, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=58984
20. ДСТУ ISO 10381-2:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 2. Настанови щодо методів відбирання проб (ISO 10381-2:2002, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=58855
21. ДСТУ ISO 10381-4 Настанови щодо методів дослідження природних, майже природних і оброблюваних ділянок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=52991
22. ДСТУ ISO 10381-5:2009 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 5. Настанови з процедури дослідження міських і промислових ділянок щодо забрудненості ґрунту

(ISO 10381-5:2005, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77011

References

1. Rashkevych, N. V. (2023). *The relevance of determining soil hazard for the restoration of affected areas*. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Problems of Emergency Situations"* (pp. 118–119). Kharkiv: National University of Civil Protection of Ukraine.
2. Rashkevych, N. V. (2025). *Identification of the main sources of soil and water pollution during military conflicts*. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Problems of Emergency Situations"* (pp. 119–120). Cherkasy: National University of Civil Protection of Ukraine.
3. Rashkevych, N. V. (2022). *Factors influencing the distribution of heavy metals in the soil environment*. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Problems of Emergency Situations"* (pp. 217–218). Kharkiv: National University of Civil Protection of Ukraine.
4. Rashkevych, N. V., Shevchenko, R. I., & Rebrov, O. V. (2024). *Justification of soil sampling optimization procedures to prevent technogenic emergencies*. In *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Problems of Emergency Situations"* (pp. 93–94). Kharkiv: National University of Civil Protection of Ukraine.
5. Bondarenko, A. Yu., Rashkevych, N. V., & Shevchenko, R. I. (2024, May 16). *Methods for studying soil conditions in the context of solving civil protection tasks of territorial communities*. In *Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Cadets, Students, and Postgraduates "Science of Civil Protection as a Way of Formation of Young Scientists"* (pp. 12–14). Cherkasy: Chornobyl Heroes Cherkasy Institute of Fire Safety.
6. Rashkevych, O. S., Rashkevych, N. V., Shevchenko, R. I., & Khmyrova, A. O. (2024, August 1–3). *Stages of forming a mathematical model for emergency prevention in the combat zone*. In *Proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference "Innovative Development of Science, Technology and Education"* (pp. 145–149). Vancouver, Canada.
7. Kardanpour, Z., Jacobsen, O. S., & Esbensen, K. H. (2015). Local versus field scale soil heterogeneity characterization – A challenge for representative sampling in pollution studies. *Soil*, 2(1), 619–645.
8. Wang, Y., Qi, Q., Bao, Z., Wu, L., Geng, Q., & Wang, J. (2023). A novel sampling design considering the local heterogeneity of soil for farm field-level mapping with multiple soil properties. *Precision Agriculture*, 24(4), 1–22.
9. Gao, B., Lu, A., Pan, Y., Huo, L., Gao, Y., Li, X., ... Chen, Z. (2017). Additional sampling layout optimization method for environmental quality grade classifications of farmland soil. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(12), 5350–5358.
10. Ju, L., Guo, S., Ruan, X., & Wang, Y. (2023). Improving the mapping accuracy of soil heavy metals through an adaptive multi-fidelity interpolation method. *Environmental Pollution*, 330, 121827.
11. Meli, M., Auclerc, A., Palmqvist, A., Forbes, V. E., & Grimm, V. (2013). Population-level consequences of spatially heterogeneous exposure to heavy metals in soil: An individual-based model of springtails. *Ecological Modelling*, 250, 338–351.
12. Houlong, J., Daibin, W., Chen, X., Shuduan, L., Hongfeng, W., Chao, Y., ... Lina, G. (2016). Comparison of kriging interpolation precision between grid sampling scheme and simple random sampling scheme for precision agriculture. *Eurasian Journal of Soil Science*, 5(1), 62–73.

13. Yu, D., Zha, Y., Shi, L., Bolotov, A., & Tso, C. H. M. (2021). Spatiotemporal sampling strategy for characterization of hydraulic properties in heterogeneous soils. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 35, 737–757.
14. Wang, Y., Song, Y., & Li, T. (2019). Vertical distribution of heavy metals in soil profile and implications for groundwater pollution. *Environmental Pollution*, 254, 113083. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113083>
15. Zhang, X., Wang, H., & Li, J. (2020). Optimal sampling depth and grid resolution for heavy metal monitoring in agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 709, 136111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136111>
16. Wadoux, A. M. C., Brus, D. J., & Heuvelink, G. B. M. (2019). Sampling design optimization for soil mapping with random forest. *Geoderma*, 355, 113913. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113913>
17. De Caires, S. A., Martin, C. S., Atwell, M. A., Kaya, F., Wuddivira, G. A., & Wuddivira, M. N. (2025). Advancing soil mapping and management using geostatistics and integrated machine learning and remote sensing techniques: A synoptic review. *Discover Soil*, 2, 53.
18. Ministry of Health of Ukraine. (2020, July 14). Order No. 1595 “On approval of hygienic regulations for permissible content of chemical substances in soil”. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>
19. State Standard of Ukraine (DSTU ISO 10381-1:2004). (2004). *Soil quality. Sampling. Part 1: Guidance on the development of sampling programs (ISO 10381-1:2002, IDT)*. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=58984
20. State Standard of Ukraine (DSTU ISO 10381-2:2004). (2004). *Soil quality. Sampling. Part 2: Guidance on sampling techniques (ISO 10381-2:2002, IDT)*. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=58855
21. State Standard of Ukraine (DSTU ISO 10381-4). (n.d.). *Guidelines for the investigation of natural, near-natural and cultivated sites*. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=52991
22. State Standard of Ukraine (DSTU ISO 10381-5:2009). (2009). *Soil quality. Sampling. Part 5: Guidance on the procedure for investigation of urban and industrial sites with regard to soil contamination (ISO 10381-5:2005, IDT)*. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77011