

УДК 614.8

*Н. В. Рашкевич, PhD, доц. каф. (ORCID 0000-0001-5124-6068)**Р. С. Мележик, PhD, н.с. відділу (ORCID 0000-0001-6425-4147)**А. В. Перегін, PhD, н.с. відділу (ORCID 0000-0003-2062-5537)**В. А. Краснов, ад'юнкт (ORCID 0000-0002-8445-6843)**Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна*

ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ У РАЙОНАХ УРАЖЕННЯ РАКЕТНО-АРТИЛЕРІЙСЬКИХ СИСТЕМ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ

У статті розглянуто методологічні підходи до оцінювання забруднення ґрунтів у районах ураження ракетно-артилерійських систем на основі показників електропровідності. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оперативної оцінки стану територій після вибухових впливів, коли традиційні хімічні методи аналізу є надто тривалими або ресурсозатратними. Електропровідність водної витяжки запропоновано використовувати як індикатор сумарного вмісту розчинених іонів, зокрема металів та продуктів вибухових реакцій, що дозволяє оцінювати потенційну токсичність ґрунту та локальні екологічні ризики. Для збору експериментальних даних здійснено відбір проб за просторово-глибинною сіткою, що охоплює різні відстані від епіцентру вибуху та рівні залягання ґрунту, забезпечуючи репрезентативність оцінки техногенного навантаження. Вимірювання електропровідності дозволили побудувати базу для математичного опису просторово-глибинного розподілу іонного навантаження та запропонувати експоненційну модель згасання концентраційного ефекту. Модель дає змогу прогнозувати зміну рівня забруднення у проміжних точках, оцінювати масштаби впливу вибуху та поширення розчинних компонентів у товщі ґрунту з урахуванням гідрогеологічних і рельєфних умов. Результати створюють основу для експрес-оцінки техногенного навантаження, оперативного зонування територій та планування заходів цивільного захисту, а також для прогнозування довгострокових змін стану ґрунтового середовища. Запропонований підхід поєднує експериментальні вимірювання та математичне моделювання для побудови адаптивної системи моніторингу. Індексне узагальнення даних забезпечує порівняння рівнів забруднення між ділянками, визначення пріоритетних зон відновлення та прийняття управлінських рішень у післяконфліктних регіонах, а також сприяє швидкому реагуванню на потенційні надзвичайні екологічні ситуації.

Ключові слова: електропровідність, кондуктометрія, вибух, водний розчин ґрунтів, забруднення, просторово-глибинний аналіз, моніторинг

1. Вступ

Під час вибухів ракетно-артилерійських систем відбувається порушення структури ґрунту, переміщення його мас, а також потрапляння залишків боєприпасів, металевих фрагментів та продуктів згоряння. Це створює потенційні загрози не тільки для навколишнього середовища, а й для здоров'я населення. Своєчасна оцінка забруднення ґрунтів дозволяє визначити території з високим ризиком небезпеки, планувати відбір проб та моніторинг, а також приймати ефективні управлінські рішення для мінімізації наслідків небезпечної події, запобігання надзвичайних ситуацій.

Таким чином, з урахуванням сучасних військових конфліктів та потенційних техногенних загроз, відсутність оперативної інформації про стан ґрунту, проблема оцінки забруднення ґрунтів є актуальною для прогнозування небезпечних процесів, планування захисних заходів та організації робіт з ліквідації наслідків ураження територій. Відсутність оперативної інформації про стан ґрунтів у районах ураження ускладнює прогнозування небезпечних процесів, планування захисних заходів та організацію робіт із попередження надзвичайних ситуацій.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Дослідження забруднення ґрунтів на територіях, що зазнали ракетно-артилерійського ураження, охоплює низку взаємопов'язаних напрямів – фізико-хімічний аналіз забруднювачів, оцінку змін структури ґрунту та моніторинг електрофізичних параметрів. У роботі [1] досліджено вплив фізичних характеристик ґрунтів на інженерну стійкість територій, а також розроблено організаційно-технічний підхід до запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного характеру. Проте зазначений підхід здебільшого орієнтований на інженерну оцінку несучої здатності ґрунтів і не враховує специфіку їхнього техногенного забруднення після вибухів. Зміни в поровому середовищі, що безпосередньо впливають на проникність та електропровідність, залишаються недостатньо описаними.

Напрацювання [2] вказують на необхідність інтеграції інструментів експрес-оцінювання стану довкілля з адаптивними моделями прийняття рішень, орієнтованими на зниження ризику вторинного ураження. Водночас автори не пропонують практичних механізмів переведення результатів вимірювань електрофізичних параметрів у придатні для оперативного моніторингу показники, що обмежує застосування таких моделей у реальних умовах ураження територій.

Дослідниками [3] проведено моніторинг водного середовища з використанням фізико-хімічних та електрофізичних індикаторів, які можуть бути екстрапольовані на ґрунтові системи. Однак більшість цих підходів не враховує вертикальний профіль ґрунтів після вибухів, де спостерігаються складні просторово-глибинні зміни концентрацій забруднювачів і неоднорідність вологості, що впливають на точність оцінки електропровідності.

Окремий напрям досліджень стосується електропровідності як функції концентрації іонів у ґрунтовому розчині. У працях [4, 5] розглянуто точність експрес-методів визначення забруднювальних речовин у природних середовищах, зокрема у донних відкладах та водних витяжках. Водночас ці методики не адаптовано до умов післявибухових змін – наявності розчинних залишків вибухових речовин, продуктів корозії металевих елементів боєприпасів та структурних руйнувань ґрунтового профілю.

Розширення уявлень про електрофізичні властивості ґрунтів забезпечує спектральна модель комплексної електропровідності, запропонована в [6], яка враховує тип мінералів, морфологію порового простору та ступінь насичення середовища. Проте застосування таких моделей обмежене переважно лабораторними умовами й потребує адаптації до оперативних польових вимірювань у зонах вибухів, де неоднорідність середовища ускладнює інтерпретацію результатів.

У низці досліджень [7, 8] показано, що електропровідність може бути ефективним індикатором вологості, концентрації розчинених солей та органічних домішок. Однак відсутність узагальненої методики, яка б інтегрувала ці показники у систему оцінки екологічного стану після бойових дій, не дозволяє застосовувати отримані результати для прогнозування ризиків вторинного забруднення.

Огляд сучасних викликів щодо застосування георадарів і технологій електромагнітної індукції, поданий у [9], вказує на складність інтерпретації даних у неоднорідному середовищі. Це важливо для зон ураження, де ґрунт зазнає не лише механічних, а й хімічних трансформацій. Проте більшість робіт зосереджена на геофізичному аналізі.

У роботі [10] порівняно ефективність методів вимірювання електропровідності при співвідношенні ґрунт-вода 1:5, що є зручним для експрес-аналізу в

польових умовах. Водночас ці підходи не враховують неоднорідність проб, відстань до епіцентру вибуху та зміну властивостей ґрунту з глибиною. Аналогічно, профілювання електропровідності, застосоване у [11] для ґрунтів, демонструє потенціал методу, але потребує адаптації до умов високого техногенного навантаження та локальних термічних впливів вибухів.

У дослідженнях [12–14] розглянуто просторово-часову мінливість електропровідності для оцінки витоків важких металів і солей, зокрема з використанням електрорезистивної томографії та індукованої поляризації. Проте ці методи вимагають складного обладнання й не забезпечують оперативності, необхідної для моніторингу у районах бойових дій.

Таким чином, попри наявність значного масиву теоретичних і прикладних розробок, залишається відкритою проблема створення універсальної методики, здатної оперативно оцінювати стан ґрунтів у районах ураження ракетно-артилерійських систем за показниками електропровідності. Недостатньо дослідженими є просторово-глибинні закономірності зміни цього параметра, його зв'язок з відстанню до епіцентру вибуху та рівнем контамінації. Відсутня також єдина система інтерпретації результатів вимірювань для потреб цивільного захисту.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є сформулювати науково-методичні засади оцінки стану забруднення ґрунтів у районах ураження ракетно-артилерійських систем за показниками електропровідності, придатні для подальшого моніторингу й прийняття управлінських рішень цивільного захисту.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні завдання:

1. Провести просторово-глибинний аналіз електропровідності ґрунтів у межах району ураження ракетно-артилерійськими системами.
2. Розробити рекомендації щодо організації моніторингу ґрунтів та заходів цивільного захисту.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єктом дослідження є ґрунтовий покрив в районах ураження ракетно-артилерійських систем, а предметом – просторово-глибинні зміни електропровідності ґрунтів і їхній зв'язок із імовірним техногенним забрудненням як основою для швидкої оцінки ризику та прийняття управлінських рішень.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що у районах ракетно-артилерійського ураження електропровідність ґрунтів змінюється закономірно залежно від відстані до епіцентру вибуху та глибини залягання, що зумовлено перерозподілом іонів, вологості та продуктів вибуху у поровому середовищі. Таким чином, показник електропровідності може виступати індикатором рівня техногенного забруднення та використовуватися для оперативної діагностики стану ґрунтів.

Для дослідження зміни електропровідності ґрунтів у районах ракетно-артилерійського ураження відбиралися проби ґрунту на ділянці, що має ознаки локального вибухового впливу. Відбір здійснювався за структурованою сіткою, що включала чотири відстані від епіцентру вибуху: 0 м (вирва), 50 м, 100 м та 200 м. У кожній точці відбору проб виконували забір ґрунту з п'яти рівнів глибини: 0 м (поверхневий шар), 2 см, 50 см, 100 см та 200 см.

Визначення електропровідності проводилося кондуктометричним методом.

Зразки ґрунту попередньо змішували з дистильованою водою у співвідношенні 1:5 (маса/об'єм) та витримували за постійної температури. Після завершення процесу екстрагування здійснювалася фільтрація, а потім проводили вимірювання електропровідності отриманого розчину при температурі 25 °С.

Отримані дані використовувалися для побудови експоненційної математичної моделі та оцінки просторово-глибинних закономірностей забруднення ґрунтів у районах ураження ракетно-артилерійських систем.

5. Проведення просторово-глибинного аналізу електропровідності ґрунтів у межах району ураження

У ході експерименту проведено оцінку електропровідності як індикатора концентрації розчинених іонів у ґрунтовому середовищі. Такий підхід базується на припущенні, що вибухи з використанням боєприпасів із металевими елементами, призводять до локального збагачення ґрунту іонними формами важких металів та залишками вибухових речовин, здатних підвищувати електропровідність ґрунтових витяжок.

Для візуалізації та аналізу змін електропровідності були побудовані профілі водної витяжки ґрунтів на різних відстанях від епіцентру вибуху залежно від глибини відбору проб (рис. 1).

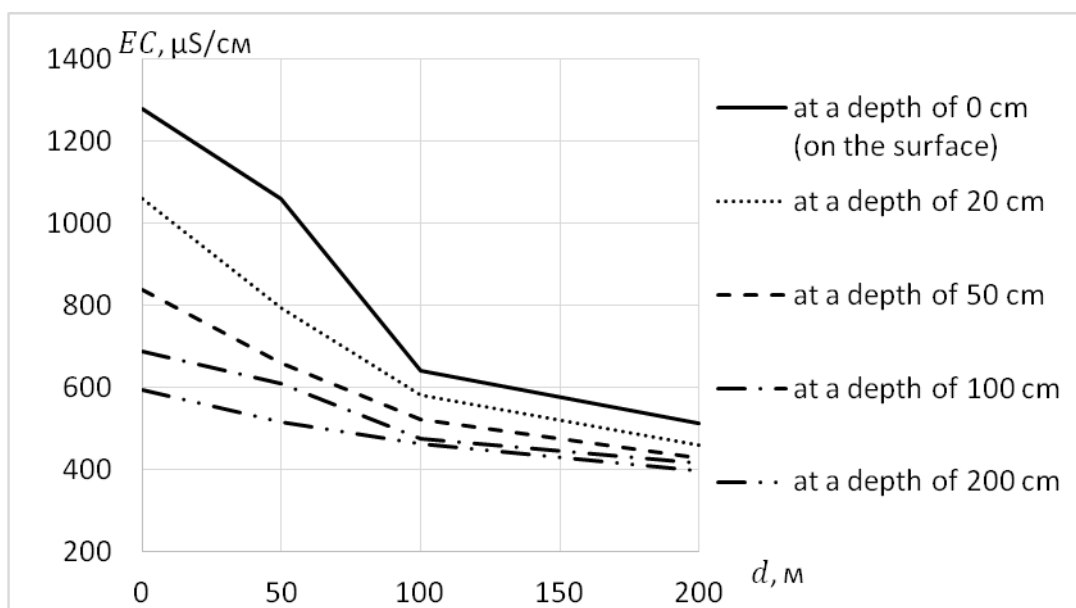


Рис. 1. Графік профілів електропровідності водної витяжки ґрунтів на різних відстанях від епіцентру вибуху залежно від глибини відбору проб

Електропровідність водної витяжки ґрунтів $EC(d, h)$ можна розглянути як функцію двох змінних – відстані від епіцентру вибуху d (м) та глибини відбору проби h (см):

$$EC(d, h) = A \cdot e^{-k_1 d} \cdot e^{-k_2 h}, \quad (1)$$

де A – емпіричний коефіцієнт, що відповідає максимальному значенню електропровідності у зоні вибуху на поверхні, k_1 , k_2 – коефіцієнти просторового згасання по горизонталі та вертикалі відповідно.

За результатами апроксимації експоненційної моделі для наявного масиву даних $A = 1280$ мкСм/см, $k_1 = 0.0065 \text{ м}^{-1}$, $k_2 = 0.011 \text{ см}^{-1}$.

Таким чином, аналітична модель набуває вигляду:

$$EC(d, h) = 1280 \cdot e^{-0.0065d} \cdot e^{-0.011h}. \quad (2)$$

Результати дослідження демонструють закономірне зменшення електропровідності водної витяжки ґрунтів як з віддаленням від епіцентру вибуху, так й зі збільшенням глибини залягання проби. Найвищі значення електропровідності (до 1280 мкСм/см) зафіксовано у вирві на поверхневому рівні, що свідчить про значну концентрацію розчинних іонів унаслідок хімічних залишків вибухових речовин або окиснених металевих компонентів боєприпасів.

Зі зростанням відстані від епіцентру (від 0 до 200 м) спостерігається експоненційне зниження електропровідності, що вказує на обмежену зону впливу джерела забруднення. Подібне зменшення простежується по вертикалі – з глибиною від 0 до 200 см електропровідність знижується майже втричі, підтверджуючи поверхневий характер основної маси іонного навантаження.

Інтегральний показник забруднення ґрунту з урахуванням просторового розподілу:

$$I = \frac{1}{H \cdot D} \int_0^H \int_0^D EC(d, h) dd dh, \quad (3)$$

де H – максимальна глибина відбору проб, D – максимальна відстань від епіцентру вибуху.

Підставляючи експоненційну форму $EC(d, h)$, інтеграл можна аналітично обчислити:

$$I = \frac{A}{H \cdot D} \int_0^H e^{-k_2 h} dh \int_0^D e^{-k_1 d} dd = \frac{A}{H \cdot D} \cdot \frac{1 - e^{-k_2 H}}{k_2} \cdot \frac{1 - e^{-k_1 D}}{k_1}. \quad (4)$$

Цей індекс дозволяє отримати узагальнену характеристику забруднення ґрунту по всьому масиву дослідження та використовувати її для порівняння між різними ділянками або для моніторингу динаміки зміни забруднення.

Оскільки спостерігається експоненційне згасання концентрації іонів з глибиною та відстанню, можна запропонувати використання моделі дифузії з урахуванням джерела забруднення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{\text{dif}} \nabla^2 C - \lambda C + S(d, h, t), \quad (5)$$

де C – концентрація забруднювача, D_{dif} – коефіцієнт дифузії у ґрунті, λ – коефіцієнт загасання (наприклад, через хімічне розкладання), S – джерело (вибухове ураження), локалізоване у просторі та часі.

Встановлення зв'язку між EC та концентрацією C дасть змогу будувати динамічні прогнози змін забруднення з часом, а також оптимізувати мережу спостережень.

Отримана математична модель дозволяє оцінювати рівень забруднення у проміжних точках, прогнозувати глибину проникнення розчинних залишків та корегувати сітку моніторингу під час екологічного обстеження місцевості після вибухових уражень.

6. Розробка рекомендацій щодо організації моніторингу ґрунтів та заходів цивільного захисту

З метою підвищення ефективності контролю екологічного стану територій після вибухового ураження розроблені відповідні рекомендації щодо планування системи моніторингу забруднення ґрунту в зоні вибухового впливу:

1. Зони контролю варто визначати виходячи з експоненційного згасання електропровідності з відстанню та глибиною. Встановлюється порогове значення $EC_{\min}$ (наприклад, 10 % від максимального значення – 128 мкСм/см). Радіус $d_{\max}$ та глибину $h_{\max}$ для моніторингу визначаються за рівняннями:

$$\begin{aligned} EC(d_{\max}, 0) &= 1280 \cdot e^{-0.0065d_{\max}} = EC_{\min} \Rightarrow \\ \Rightarrow d_{\max} &= -\frac{1}{0.0065} \ln \frac{EC_{\min}}{1280}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} EC(0, h_{\max}) &= 1280 \cdot e^{-0.0011h_{\max}} = EC_{\min} \Rightarrow \\ \Rightarrow h_{\max} &= -\frac{1}{0.011} \ln \frac{EC_{\min}}{1280}, \end{aligned} \quad (7)$$

2. Для забезпечення репрезентативності вимірювань пробовідбірні пункти слід розміщувати з кроком, що не перевищує відстань, при якій зміна електропровідності перевищує певний поріг (5–10 %). Інтервал по горизонталі Δd визначається за умов:

$$\frac{EC(d + \Delta d, h)}{EC(d, h)} = e^{-k_1 \Delta d} \approx 1 - 0.1 \Rightarrow \Delta d \approx \frac{-\ln(0.9)}{k_1} \approx \frac{0.105}{0.0065} \approx 16 \text{ м},$$

$$\text{Аналогічно по глибині: } \Delta h \approx \frac{-\ln(0.9)}{k_2} \approx \frac{0.105}{0.011} \approx 9.5 \text{ см.}$$

3. Оскільки концентрація забруднювачів знижується з глибиною, основний акцент моніторингу слід робити на верхніх 50 см ґрунту, де концентрація є найвищою. Додаткові проби можна відбирати на більших глибинах з меншим інтервалом, щоб оцінити потенційне проникнення забруднювачів.

4. Для відстеження динаміки деградації забруднення рекомендується проводити повторні заміри в однакових точках через встановлені часові інтервали, що дозволить оцінити темпи природного розкладання або міграції забруднювачів.

5. З урахуванням змінних умов (рельєф, гідрогеологія, вид боєприпасів) мережа моніторингу повинна бути адаптивною – з можливістю збільшення щільності відбору проб у зонах з підвищеним рівнем електропровідності та зменшення там, де показники стабільно низькі.

6. Рекомендується для прийняття управлінських рішень застосовувати інтегральний показник забруднення I, зокрема, у визначені пріоритетних ділянок відновлення чи проведення додаткових досліджень.

7. Обговорення формування науково-методичних засад оцінки стану забруднення ґрунтів у районах ураження

Дослідження показало, що електропровідність водної витяжки ґрунтів у районах ураження ракетно-артилерійських систем значно варіює в залежності від відстані до епіцентру вибуху та глибини залягання проб. Найвищі значення спостерігаються у приповерхневому шарі на відстані до 50 м, що свідчить про локальне накопичення розчинних іонів, ймовірно, залишків вибухових речовин і важких металів. У підповерхневих шарах спостерігається поступове зменшення електропровідності, що відображає розсіювання забруднюючих компонентів у глибині ґрунту.

Отримані дані демонструють ефективність кондуктометрії як оперативного індикатора забруднення ґрунтів, що дозволяє своєчасно визначати потенційно небезпечні ділянки та оцінювати хімічний склад порового середовища. Побудована експоненційна модель дозволяє кількісно описати закономірності зменшення електропровідності за просторовим та глибинним градієнтом, що є підґрунтям для прогнозування поширення забруднення на суміжні території та планування системи моніторингу.

Результати дають підстави для розробки рекомендацій щодо організації відбору проб: визначення меж контролю за пороговими значеннями електропровідності, оптимальна щільність пунктів, пріоритетний відбір у верхніх шарах ґрунту та регулярні повторні заміри для оцінки динаміки забруднення.

8. Висновки

1. Проведений просторово-глибинний аналіз електропровідності ґрунтів у межах району ураження ракетно-артилерійськими системами підтвердив, що електропровідність є ефективним індикатором концентрації розчинених іонів та рівня техногенного навантаження. Встановлено експоненційне зменшення електропровідності як із віддаленням від епіцентру вибуху, так і зі збільшенням глибини залягання проб. Максимальні значення зафіксовано у вирві на поверхні, що свідчить про локальне накопичення іонів металів і продуктів вибухових реакцій. Запропонована аналітична модель дозволяє кількісно описати закономірності поширення забруднення у просторі та глибині, а також використовувати її для розрахунку інтегрального індексу забруднення й побудови прогнозів міграції іонних компонентів у ґрунтовому середовищі.

2. На основі результатів моделювання розроблено рекомендації для організації моніторингу ґрунтів та заходів цивільного захисту, спрямованих на підвищення ефективності контролю стану територій після вибухових уражень. Визначено зони контролю відповідно до експоненційного згасання електропровідності та встановлено оптимальні параметри розміщення пунктів відбору проб. Запропоновано орієнтувати спостереження на верхні шари ґрунту, здійснювати повторні вимірювання у часі для відстеження деградації забруднення та застосовувати адаптивну сітку моніторингу залежно від локальних умов. Використання інтегрального показника забруднення рекомендовано для визначення пріоритетних ділянок відновлення та прийняття управлінських рішень у системі цивільного захисту.

Література

1. Rashkevich N., Shevchenko R., Khmyrov I., Soshinskiy A. Investigation of the Influence of the Physical Properties of Landfill Soils on the Stability of Slopes in the Contex. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1038. P. 407–416. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.407
2. Rashkevich N., Shevchenko R., Yeremenko S. 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*. 2025. Vol. 595. P. 717–747. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-90466-0_33
3. Myroshnychenko A., Loboichenko V., Divizynyuk M., Levterov A., Rashkevich N., Shevchenko O., Shevchenko R. 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*. 2022. Vol. 16. № 3. P. 50–59. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/16020>
4. Loboichenko V., Nikitina N., Leonova N., Konovalova O., Bondarenko A., Zemlianskyi O., Rashkevich N. Study of the features of determination of heavy metals in bottom sediments. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1348. № 1 012014. IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/1348/1/012014
5. Loboichenko V., Leonova N., Nikitina N., Savchenko Ye., Rashkevich N., Shevchenko O., Khmyrova A. Ensuring environmental safety during express determination of individual components of plant raw materials in aqueous solutions. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2025. Vol. 1491. 012027. doi: 10.1088/1755-1315/1491/1/012027
6. Revil A., Coperey A., Shao Z., Florsch N., Fabricius I., Deng Y., Delsman J., Pauw P., Karaoulis M., de Louw P., van Baaren E., Dabekaussen W., Menkovic A., Gunnink J. Complex conductivity of soils. *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53. № 8. P. 7121–7147. doi: 10.1002/2017WR020655
7. Broomandi P., Guney M., Kim J. R., Karaca F. Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. № 21. 9002. doi: 10.3390/su12219002
8. Doolittle J. A., Brevik E. C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*. 2014. Vol. 223. P. 33–45. doi: 10.1016/j.geoderma.2014.01.027
9. Pathirana S., Lambot S., Krishnapillai M., Cheema M., Smeaton C., Galagedara L. Ground-penetrating radar and electromagnetic induction: Challenges and opportunities in agriculture. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. № 11. 2932. doi: 10.3390/rs15112932
10. He Y., DeSutter T., Prunty L., Hopkins D., Jia X., Wysocki D. A. Evaluation of 1: 5 soil to water extract electrical conductivity methods. *Geoderma*. 2012. Vol. 185. P. 12–17. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.03.022
11. Singh P., Haritwal D. K., Seth S., Ramana G. V., Datta M. Electrical conductivity profiling for rapid contamination assessment in unsaturated zones: A case study of an MSW landfill. *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 951. 175773. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175773
12. Gonçalves L. A., de Souza E. G., Nóbrega L. H., Bier V. A., Maggi M. F., Bazzi C. L., Uribe-Opazo M. A. Spatial and temporal variability of soil apparent electrical conductivity. *Precision Agriculture*. 2025. Vol. 26. № 1. 10. doi: 10.1007/s11119-024-10209-x

13. Brahmi S., Baali F., Hadji R., Brahmi S., Hamad A., Rahal O., Zerrouki H., Saadali B., Hamed Y. Assessment of groundwater and soil pollution by leachate using electrical resistivity and induced polarization imaging survey, case of Tebessa municipal landfill, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021. Vol. 14. № 4. 249. doi: 10.1007/s12517-021-06571-z

14. Lech M., Fronczyk J., Radziemska M., Sieczka A., Garbulewski K., Koda E., Lechowicz Z. Monitoring of total dissolved solids on agricultural lands using electrical conductivity measurements. *Appl. Ecol. Environ. Res.* 2016. Vol. 14. № 4. P. 285–295. doi: 10.15666/aeer/1404_285295

N. Rashkevic, PhD, Associate Professor of the Department

R. Melezhyk, PhD, Researcher of the Department

A. Perehin, PhD, Researcher of the Department

V. Krasnov, Adjunct

National University of Civil Protection of Ukraine, Cherkassy, Ukraine

ASSESSMENT OF SOIL CONTAMINATION IN AREAS AFFECTED BY ROCKET-ARTILLERY STRIKES

The article examines methodological approaches to assessing soil contamination in areas affected by rocket and artillery systems based on electrical conductivity indicators. The relevance of the study is driven by the need for rapid assessment of territorial conditions after explosive impacts, when traditional chemical analysis methods are too time-consuming or resource-intensive. The electrical conductivity of the aqueous extract is proposed as an indicator of the total content of dissolved ions, including metals and products of explosive reactions, which makes it possible to evaluate the potential toxicity of the soil and local environmental risks. To collect experimental data, soil samples were taken using a spatial–depth grid covering various distances from the explosion epicenter and different soil layers, ensuring the representativeness of the assessment of technogenic impact. Electrical conductivity measurements provided a basis for the mathematical description of the spatial–depth distribution of ionic load and enabled the proposal of an exponential attenuation model of the concentration effect. The model makes it possible to predict changes in contamination levels at intermediate points, assess the scale of explosion impacts, and trace the spread of soluble components within the soil profile, taking into account hydrogeological and terrain conditions. The results form a foundation for rapid assessment of technogenic load, operational zoning of territories, planning of civil protection measures, and forecasting long-term changes in soil conditions. The proposed approach combines experimental measurements and mathematical modeling to develop an adaptive monitoring system. Index-based data generalization ensures the comparison of contamination levels between sites, the identification of priority restoration zones, and the support of decision-making processes in post-conflict regions, as well as facilitating prompt responses to potential environmental emergencies.

Keywords: electrical conductivity, conductometry, explosion, soil aqueous extract, contamination, spatial–depth analysis, monitoring

References

1. Rashkevich, N., Shevchenko, R., Khmyrov, I., Soshinskiy, A. (2021). Investigation of the Influence of the Physical Properties of Landfill Soils on the Stability of Slopes in the Context. *Materials Science Forum*, 1038, 407–416. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1038.407

2. 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. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-90466-0_33

3. Myroshnychenko, A., Loboichenko, V., Divizinyuk, 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. Available at: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/16020>
4. 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. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), 012014. IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/1348/1/012014
5. Loboichenko, V., Leonova, N., Nikitina, N., Savchenko, Ye., 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. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 1491, 012027. doi 10.1088/1755-1315/1491/1/012027
6. Revil, A., Coperey, A., Shao, Z., Florsch, N., Fabricius, I. L., Deng, Y., Gunnink, J. L. (2017). Complex conductivity of soils. *Water Resources Research*, 53(8), 7121–7147. doi: 10.1002/2017WR020655
7. 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. doi: 10.3390/su12219002
8. Doolittle, J. A., Brevik, E. C. (2014). The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*, 223, 33–45. doi: 10.1016/j.geoderma.2014.01.027
9. Pathirana, S., Lambot, S., Krishnapillai, M., Cheema, M., Smeaton, C., Galagedara, L. (2023). Ground-penetrating radar and electromagnetic induction: Challenges and opportunities in agriculture. *Remote Sensing*, 15(11), 2932.
10. He, Y., DeSutter, T., Prunty, L., Hopkins, D., Jia, X., Wysocki, D. A. (2012). Evaluation of 1: 5 soil to water extract electrical conductivity methods. *Geoderma*, 185, 12–17. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.03.022
11. Singh, P., Haritwal, D. K., Seth, S., Ramana, G. V., Datta, M. (2024). Electrical conductivity profiling for rapid contamination assessment in unsaturated zones: A case study of an MSW landfill. *Science of The Total Environment*, 951, 175773. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.175773
12. Gonçalves, L. A., de Souza, E. G., Nóbrega, L. H., Bier, V. A., Maggi, M. F., Bazzi, C. L., Uribe-Opazo, M. A. (2025). Spatial and temporal variability of soil apparent electrical conductivity. *Precision Agriculture*, 26(1), 10. doi: 10.1007/s11119-024-10209-x
13. Brahmi, S., Baali, F., Hadji, R., Brahmi, S., Hamad, A., Rahal, O., Hamed, Y. (2021). Assessment of groundwater and soil pollution by leachate using electrical resistivity and induced polarization imaging survey, case of Tebessa municipal landfill, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(4), 249. doi: 10.1007/s12517-021-06571-z
14. Lech, M., Fronczyk, J., Radziemska, M., Sieczka, A., Garbulewski, K., Koda, E., Lechowicz, Z. (2016). Monitoring of total dissolved solids on agricultural lands using electrical conductivity measurements. *Appl. Ecol. Environ. Res.*, 14(4), 285–295. doi: 10.15666/aeer/1404_285295

Надійшла до редколегії: 09.09.2025

Прийнята до друку: 13.10.2025