

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2\(44\)-511-524](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-2(44)-511-524)

УДК 355.4+528.9+614.8

Тарас Володимирович Гуцул

кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича (Чернівці, Україна)

E-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7192-3289>

Scopus ID: [57204148923](https://scopus.org/authorid/57204148923). ResearcherID: [R-8012-2017](https://pubs.rsos.royalsocietypublishing.org/author/R-8012-2017)

ПОВЕРХНЕВЕ І ВЕРТИКАЛЬНЕ МІННЕ ЗАБРУДНЕННЯ: МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНКИ РИЗИКУ

Мінне забруднення глобальна загроза безпеки населення, відновлення господарської діяльності та екологічної стабільності у постконфліктних регіонах. Нещодавні бої у Сирії, Лівії та Ємені відбувалися переважно в міських середовищах, які значно складніші та включали не лише поверхневе (двовимірне) забруднення, але й вертикальне (тривимірне) мінування територій. Запропоновано підхід до інтегральної оцінки ризику, який враховує просторові та глибинні параметри забруднення, а також можливість застосування геоінформаційних технологій для зонування територій за рівнями небезпеки. Отримані результати можуть сприяти підвищенню ефективності планування заходів з протимінної діяльності.

Ключові слова: гуманітарне розмінування; мінне забруднення; геопросторові дані; оцінка ризику; карти небезпек; просторовий аналіз.

Табл.: 4. Бібл.: 25.

Актуальність теми дослідження. Мінне забруднення територій – одна з проблем людства глобального масштабу, а також одна з найгостріших проблем безпеки та післявоєнного відновлення держав, що зазнали збройних конфліктів. Насамперед воно створює безпосередню загрозу життю та здоров'ю людей. Безпека – основна соціальна цінність, яку повинна забезпечувати держава своєму населенню, а земля – основне національне багатство. Вибухи протипіхотних та протитанкових мін призводять до численних травм і смертей серед цивільних, часто дітей та людей похилого віку. Психологічний ефект мінного забруднення не менш значущий: постійний страх за власну безпеку обмежує пересування населення, перешкоджає нормальному життю та роботі. Люди на уражених територіях уникають відкритих просторів, змінюють маршрути пересування, що впливає на соціальну активність життя. Відсутність своєчасних заходів протимінної діяльності (ПМД) на забруднених територіях робить їх ізольованими, а мешканці таких районів починають відчувати себе покинутими державою.

Необхідність координації зусиль держав, міжнародних організацій і гуманітарних місій у сфері розмінування, мінної просвіти та допомоги постраждалим підкреслює її значущість як одного з ключових викликів сучасності. Мінна загроза має тісний і багатовимірний зв'язок із Цілями сталого розвитку ООН (ЦСР), оскільки безпосередньо впливає на здатність держав забезпечувати безпеку, розвиток і добробут населення. Вивільнення земельних ділянок прямо чи опосередковано стосується досягнення 14 (ЦСР: 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17) із поміж 17 ЦСР [1]. Заміновані території підривають реалізацію ЦСР у гуманітарній, соціальній, економічній та екологічній сферах, що робить ПМД важливою складовою глобальної політики сталого розвитку.

Традиційні підходи до оцінювання мінної небезпеки переважно орієнтовані на виявлення та аналіз поверхневого розташування вибухонебезпечних предметів (ВНП) [2]. Проте в реальних умовах значна частина мін і боеприпасів може змінювати своє положення в товщі ґрунту під впливом природних і техногенних факторів, таких як ерозійні процеси, сезонні промерзання та відтавання ґрунтів, зволоження, вібраційні впливи, переміщення ґрунтових мас, а також господарська діяльність людини [3]. За таких обставин, ВНП можуть змінювати глибину залягання, що ускладнює їх виявлення та підвищує рівень ризику для населення і саперів.

Недостатня врахованість вертикальної складової мінного забруднення у процесах оцінювання небезпеки може призводити до недооцінювання ризиків і зниження ефективності планування заходів з ПМД. Тому виникає необхідність у розробленні науково обґрунтованої методології оцінки ризику, яка б інтегрувала як поверхневі, так і вертикальні параметри розміщення ВНП з урахуванням просторових та природних особливостей досліджуваних територій.

Означене питання, як і сфера гуманітарного розмінування, є міждисциплінарним і актуальним для безпеки життєдіяльності, цивільного захисту, геоінформаційних технологій (просторовий аналіз у визначенні небезпечних ділянок за цифровими моделями, картування мінних полів та зон ризику), екології, військової інженерії та прикладного математичного моделювання. Воно поєднує технічні, екологічні та соціальні аспекти ризику мінного забруднення та має практичне значення для захисту населення й управління сталим розвитком постконфліктних територій.

Постановка проблеми. Оцінювання мінної небезпеки територій є одним із ключових аналітичних етапів ПМД, який передусє проведенню робіт із розмінування та забезпечує обґрунтоване планування таких робіт, і безпосередньо пов'язане з картографуванням ризику мінного забруднення. Результати оцінювання використовуються для створення просторових моделей небезпеки, які відображаються у вигляді карт ризику. Традиційно оцінювання мінної небезпеки територій базується переважно на аналізі поверхневого розміщення ВНП або на даних про щільність замінування, що виключає комплексний вплив взаємодії природних, техногенних та просторових факторів, а отже обмежує можливості об'єктивної оцінки ризику та планування заходів ПМД. У реальних природних умовах міни та інші боєприпаси не завжди залишаються у початковому положенні. Під впливом природних процесів – зволоження ґрунтів, ерозії, сезонного промерзання та відтавання, переміщення ґрунтових мас, а також механічних навантажень – можливе поступове переміщення ВНП у вертикальному напрямку. У результаті цього формується складна просторово-глибинна структура мінного забруднення, яка включає як поверхневий, так і підповерхневий (вертикальний) компоненти.

Наявність вертикального переміщення мін суттєво ускладнює прогнозування небезпечних зон та подальше виявлення, оскільки глибина залягання ВНП може змінюватися з часом і залежати від множини факторів та характеру попереднього мінування. У багатьох випадках діючі методики оцінювання мінної небезпеки не повною мірою враховують ці фактори, що може призводити до недостатньо точного визначення рівнів ризику та неефективного планування робіт з обстеження і очищення територій. Масштабне мінне забруднення значних територій України створює серйозні загрози для населення, інфраструктури та економічної діяльності, що зумовлює необхідність розроблення ефективних методів оцінки ризику та просторового планування робіт із гуманітарного розмінування.

Дослідження методологічних підходів до оцінки ризику поверхневого і вертикального мінного забруднення є важливим науковим і практичним завданням. Запропонований підхід пов'язаний із розвитком методів геоінформаційного аналізу та просторового моделювання, що застосовуються для визначення рівня мінної небезпеки територій. Використання геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє інтегрувати різні джерела геопросторових даних, виконувати багатокритеріальний аналіз факторів мінного забруднення (просторових та глибинних характеристик розміщення мін/ВНП з урахуванням факторів природного середовища) та формувати карти ризику, які можуть використовуватися для підтримки ухвалення управлінських рішень. Реалізація такого підходу сприятиме підвищенню точності оцінювання мінних ризиків та ефективності планування заходів з гуманітарного розмінування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема мінного забруднення територій, методів його виявлення та оцінки ризику активно досліджується у міжнародній і вітчизняній науковій літературі. Сучасні дослідження охоплюють декілька основних напрямів: просторове картування мінного забруднення, методи дистанційного виявлення мін, моделювання ризику та оптимізацію процесів гуманітарного розмінування. Проте інтегрований підхід до оцінювання мінної небезпеки з урахуванням як поверхневого, так і вертикального забруднення досі залишається мало висвітленим у науковій літературі.

ГІС стали ефективним і надійним інструментом інформаційного забезпечення актуальними просторовими даними на всіх етапах гуманітарного розмінування територій. Подальший їх розвиток пов'язано з активним пошуком просторових методів інтелектуального аналізу геоданих, одержаних на етапі технічного обстеження [4].

Збір даних залишається найдорожчою і найтривалішою частиною більшості ГІС-проектів. Він може вимагати до 60 %, а іноді навіть до 80 % наявного часу і коштів. Невідповідність між високими витратами на збір даних, з одного боку, і низьким рівнем використання, з іншого боку, викликає потребу в підході, який змінить цю ситуацію [5]. Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у процесах розмінування можна вважати передовим і таким, що по-новому відкриває можливості існуючих і перспективних методів і технологій. Різноманітний спектр моделей та конструктивних особливостей сучасних БПЛА дозволяє адаптувати їх для виконання будь-яких завдань, зокрема пошуку видимих індикаторів наземних мін та ВНП у забруднених зонах. Зростаючий інтерес до БПЛА створює тенденції до постійного вдосконалення: збільшується час перебування в повітрі та вантажопідйомність, оптимізуються процеси навігації та мінімізуються аварії [6]. У дослідженні українських науковців розглянуто можливості використання мультиспектральних зображень з БПЛА для ідентифікації мін, розташованих на поверхні або на невеликій глибині [7]. Наведено алгоритми обробки даних дистанційного зондування (ДЗЗ) у середовищі ГІС для попереднього визначення небезпечних ділянок, однак точність ідентифікації становить $\approx 70\%$, що свідчить про потребу подальшого вдосконалення методів оцінки мінного забруднення [8].

У роботах із геостатистичного аналізу застосовуються методи просторової регресії та географічно зваженої регресії для прогнозування зон із підвищеною ймовірністю наявності мін. Такі моделі дозволяють враховувати закономірності розміщення мін, особливості рельєфу, транспортну мережу та інші фактори, що впливають на формування мінних полів. Отримані результати використовуються для створення карт ризику та оптимізації планування робіт із розмінування [9].

Концепція «гарячих точок» (hot spots) забезпечує візуальне представлення впливу локацій з аномально високою концентрацією певних явищ, а отже у випадку гуманітарного розмінування спроможна представити «пріоритетні області для зосередження експертів з планування ПМД». Оцінювач щільності ядра (Kernel Density Estimation) пропонується як непараметричний метод кількісної оцінки масштабу просторового явища, і є основою для формування зон небезпеки на картах, вразливості та елементів під загрозою, пов'язаних з мінами та ВНП, що дозволяє створювати кінцевий результат – карту ризику [10]. Вибір використання KDE ґрунтується на внеску кожної точки у загальну щільність забруднення, показник якої зменшується зі збільшенням відстані від неї. Ця ідея узгоджується з першим законом географії Тоблера: «Все пов'язане з усім іншим, але близькі речі більш пов'язані, ніж віддалені» [11].

Важливим напрямом досліджень є застосування штучного інтелекту (ШІ) та аналізу геопросторових даних для прогнозування потенційно небезпечних територій [12]. Застосування методів ШІ дає змогу ідентифікувати складні нелінійні взаємозв'язки між факторами, які не завжди піддаються виявленню за допомогою класичних кореляційних або

регресійних підходів. Останніми роками кількість таких досліджень зросла, однак більшість з них зосереджена на розпізнаванні об'єктів, приділяючи обмежену увагу прогнозуванню ризику на основі просторової інформації, що залишає цей напрям перспективним. У роботі [13] наведено систему геопросторового ШІ для прогнозування зон потенційного мінного забруднення. Модель використовує різні типи геоданих – інформацію про попередні бойові дії, транспортну мережу, інфраструктуру та інші соціально-економічні фактори. Підхід полягає у змішаних стратегіях вибірки даних та збагачення контексту за допомогою історичних конфліктів та ключових багатодомених об'єктів (наприклад, будівель, доріг, медичних закладів). Наведений підхід не спрямований на точну локалізацію наземних мін, а радше на виявлення потенційної небезпеки в районах.

Окрему групу становлять дослідження, спрямовані на вдосконалення технологій виявлення поверхневих мін. Сучасні тренди демонструють можливість використання систем комп'ютерного зору та глибокого навчання для автоматичного розпізнавання мін на оптичних зображеннях. Такі підходи ґрунтуються на аналізі оптичних, мультиспектральних або інфрачервоних зображень, отриманих з БПЛА, наземних роботів або стаціонарних камер. Їхня основна мета – підвищення швидкості та безпеки процесів гуманітарного розмінування шляхом автоматичного виявлення ВМП. Розвиток глибоких згорткових нейронних мереж кардинально змінив стан речей у галузі оптичного виявлення, зробивши їх де-факто вибором номер один для більшості завдань класифікації, виявлення та сегментації об'єктів. У дослідженні [14] інструменти з відкритим вихідним кодом використовуються для побудови системи виявлення, а їхня ефективність оцінюється на базі обмеженої кількості даних. Тому проблема обмеженої кількості тренувальних даних може бути ефективно подолана нарощуванням даних. Сучасні системи комп'ютерного зору для виявлення мін часто використовують алгоритми детекції об'єктів, такі як YOLO, Faster R-CNN або SSD [2].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із використанням мультиспектральних та інфрачервоних зображень. У таких системах аналізується не лише форма об'єкта, а й температурні або спектральні характеристики поверхні. Зокрема, у дослідженні [15] запропоновано модель глибокого навчання для виявлення протипіхотних мін на інфрачервоних зображеннях довгохвильового діапазону методами transfer learning і attention-based multiple instance learning, які дозволяють ефективно працювати навіть із невеликими наборами навчальних даних. Використання мультиспектральних сенсорів, встановлених на БПЛА з одночасним отриманням RGB- та NIR-зображень дозволяє покращити виявлення мін, особливо в умовах часткового маскуванню рослинністю [16].

Пропонуються математичні моделі планування очищення територій, які враховують просторовий розподіл потенційно небезпечних ділянок, доступність території та безпеку саперів. Одна з таких включає індекс безпечної доступності (Safe Accessibility Index) для оцінки рівня небезпеки під час планування маршруту обстеження і очищення територій. Використання Safe Accessibility Index дозволяє перейти від простого визначення наявності мін до комплексної оцінки ризику використання території [17]. Для досліджень мінного забруднення його може бути поєднано із: просторовим моделюванням ризику, геостатистичним аналізом, даними ДЗЗ, моделями ШІ.

Водночас більшість досліджень зосереджується переважно на виявленні або просторовому прогнозуванні мін, приділяючи обмежену увагу комплексному аналізу факторів формування мінного забруднення. Зокрема, питання інтегрованого врахування поверхневого розподілу мін та їх можливого вертикального переміщення у ґрунтовому середовищі залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого наукового опрацювання.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри значну кількість досліджень у сфері гуманітарного розмінування, більшість із них зосереджена на технічних аспектах виявлення мін або на оптимізації процесів очищення територій. При цьому питання комплексного врахування поверхневого та вертикального мінного забруднення, а також розроблення методології інтегрованої оцінки ризику з урахуванням глибини залягання вибухонебезпечних предметів, фізико-механічних властивостей ґрунтів та природних процесів їх переміщення залишаються недостатньо дослідженими. Це зумовлює необхідність подальших наукових досліджень у цьому напрямі та розроблення комплексних методологічних підходів до оцінки мінної небезпеки територій.

Метою статті є розроблення та обґрунтування методологічного підходу до оцінки ризику, пов'язаного з поверхневим і вертикальним мінним забрудненням територій, з урахуванням просторового розподілу ВВП, глибини їх залягання та впливу природних і техногенних факторів на їх переміщення у ґрунтовому середовищі.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі основні завдання дослідження:

- провести аналіз сучасного стану наукових досліджень і підходів до оцінювання мінного забруднення територій та ризиків, пов'язаних із наявністю мін та ВВП;
- визначити основні характеристики та особливості формування поверхневого і вертикального мінного забруднення територій;
- з'ясувати природні та техногенні фактори, що впливають на переміщення мін і ВВП у вертикальному напрямку в товщі ґрунту.
- сформуванати систему показників, що характеризують рівень небезпеки територій з урахуванням поверхневого та вертикального розміщення мін;
- розробити методологічний підхід до комплексної оцінки ризику мінного забруднення, який інтегрує просторові та глибинні параметри розміщення мін та ВВП;
- обґрунтувати можливість застосування отриманого підходу для підвищення ефективності планування робіт з обстеження та гуманітарного розмінування територій;
- виявити ГІС-інструменти просторового аналізу для практичної реалізації наведених показників.

Реалізація поставлених завдань дозволить сформуванати комплексну систему оцінювання мінних ризиків, що враховує як поверхневу, так і вертикальну структуру мінного забруднення та може бути використана для підвищення ефективності управління безпекою територій.

Результати та обговорення. Міжнародні стандарти гуманітарного розмінування (IMAS) вимагали надзвичайно високої точності (понад 99,6 %) виявлення мін та ВВП, зокрема 100 % на певну встановлену глибину [18]. Згодом, сучасні стандарти почали базуватися на повному очищенні, а не на статистичному відсотку. Термін «очищення/розмінування (clearance)» у контексті ПМД, стосується завдань або заходів забезпечення видалення та/або знищення всіх небезпек, пов'язаних з мінами та ВВП, у визначеному районі на визначену глибину. У випадку виявлення значних об'єктів небезпеки (мін, касетних босприпасів, конкретних ВВП) організації повинні документувати ці об'єкти (якомога детальніше), глибину залягання, місце знаходження (з географічного погляду і стосовно інших пов'язаних пристроїв), а також стан об'єктів [19].

Поверхнєве мінне забруднення формується внаслідок бойових дій, використання інженерних загороджень, а також під впливом природних і антропогенних процесів. Аналіз факторів, що визначають просторове розміщення мін на поверхні (табл. 1), є ключовим для побудови моделей оцінки ризику та ефективного планування заходів гуманітарного розмінування.

Таблиця 1 – Фактори, що впливають на поверхнєве мінне забруднення території

Фактор	Механізм впливу	Наслідки для мінного забруднення
Рівень бойових дій	Масове використання мінно-вибухових загороджень та боеприпасів	Формування зон з високою щільністю мін
Тип мін та ВВП	Різні типи мають різні способи мінування (ручні, дистанційні та ін.)	Нерівномірний просторовий розподіл мін
Спосіб мінування	Ручне встановлення або дистанційне розсіювання (артилерія, РСЗВ, авіація)	Формування хаотичних мінних полів
Рельєф місцевості	Схили, долини, підвищення впливають на розподіл мін	Накопичення мін у локальних пониженнях рельєфу
Тип землекористування	Сільськогосподарські угіддя, ліси, населені пункти	Різна пріоритетність мінування
Транспортна мережа	Дороги, перехрестя, мости часто мінуються для блокування руху	Висока ймовірність мін поблизу шляхів
Рослинність	Густі рослинні покриви ускладнюють візуальне виявлення мін	Маскування мін на поверхні
Ерозійні процеси	Змивання верхнього шару ґрунту	Оголення або переміщення мін
Діяльність людини	Будівельні роботи, обробка землі, видобуток корисних копалин	Можливе переміщення мін
Метеорологічні умови	Вітер, опади, температурні коливання	Часткове зміщення або оголення мін

Джерело: розроблено автором.

Тип мін, а також умови місцевості визначають стандартну глибину очищення. Наприклад, протипіхотні міни зазвичай встановлюють на глибину (5-20 см), щоб тиск людини був достатнім для їх детонації (в чутливих мінах М14 та ПМН-2 зусилля від двох кілограм), тоді як протитанкові міни розраховані на вагу транспортних засобів, і закопуються глибше (20-50 см). Нерозірвані боеприпаси можуть знаходитися як на поверхні, так і під землею і визначаються типом боеприпасів та умовами їх падіння. Пісок, торф, каміння – занурюють міни глибше з часом через природні процеси. Рослинність та гумусний шар частково «прикривають» міну, тому виникає потреба очищення на більшу глибину. Неприятливі фізико-географічні явища та процеси можуть переміщувати міни (табл. 2), тому виникає потреба визначення додаткової глибини очищення.

Таблиця 2 – Фактори вертикального переміщення мін у ґрунті

Фактор	Механізм впливу	Наслідки для положення мін
Тип ґрунту	Різна щільність і гранулометричний склад ґрунтів визначає їхню здатність до ущільнення або просідання	У пухких піщаних ґрунтах міни можуть поступово заглиблюватися
Вологість ґрунту	Збільшення вологості знижує міцність ґрунтової структури	Міни можуть занурюватися глибше у вологих ґрунтах
Атмосферні опади	Інтенсивні дощі спричиняють ерозійні процеси та переміщення ґрунту	Міни можуть оголюватися або переміщуватися вниз
Промерзання і відтавання	Циклічне розширення і стискання ґрунту при замерзанні води	Можливе підняття мін в напрямку поверхні
Гравітаційні процеси	Схилі та ерозійні процеси	Міни можуть переміщуватися вниз по схилу
Біологічна активність	Діяльність тварин, кореневих систем рослин	Локальне переміщення мін у вертикальному напрямку
Антропогенний	Оранка, культивування, механічна обробка ґрунту, видобуток копалин, копання	Переміщення мін у верхніх шарах ґрунту
Вібраційні впливи	Робота техніки, вибухи, рух транспорту	Поступове заглиблення або зміщення мін
Ерозійні процеси	Водна та вітрова ерозія	Оголення мін на поверхні
Осідання ґрунту	Ущільнення ґрунтів з часом	Збільшення глибини залягання

Джерело: розроблено автором.

Вітчизняні стандарти встановлюють глибину очищення за замовчуванням не менше 15 см від поверхні, однак допускають її збільшення залежно від ризику й умов [20]. Дослідження [21] на вибірці з 1593 мін демонструє, що глибина залягання 87,5 % виявлених об'єктів коливалася в діапазоні 2,5...15,2 см, тоді як решта були або розкидані по поверхні або ще більше заглиблені в неї. Кожній країні притаманна унікальна специфіка концентрації мін, типів мін, ґрунтових умов, що впливає на те, яку глибину очищення встановлює для саперів і операторів національний орган з питань ПМД. Міжнародні доповіді та звіти не публікують даних про глибини очищення (середні показники) по країнах, а обмежуються площею розмінованої землі та кількістю вилучених мін та ВНП. Як правило, у гуманітарному розмінуванні глибина очищення визначається технічним оглядом або надійною інформацією про очікувану глибину міни/ВНП, а не однією «середньою» величиною для всієї країни. Якщо такої інформації немає, стандарт IMAS 09.10 радить приймати глибину не менше 13 см для мінімального рівня (наприклад, мінімальних металевих протипіхотних мін), а далі цей параметр може коригуватися під час операцій. Сучасні протипіхотні міни часто характеризуються мінімальним вмістом ($\leq 3-5\%$) металу, а основними пристроями для їх виявлення усе ще залишаються електромагнітні металодетектори, ефективні на глибину до 15 см за певних умов [22].

Інтегруючи поверхневе та вертикальне забруднення разом із просторовими та природними факторами через нормалізацію, вагові комбінації і просторові моделі, можна отримати кількісний індикатор ризику наземних мін, який служить основою для карт ризику та планування розмінування.

Індикатори ризику наземних мін та ВНП – двовимірні об'єктні ознаки, які підвищують ймовірність розміщення наземних мін/ВНП поблизу них, тоді як міни/ВНП – тривимірні об'єкти. Багато з цих індикаторів можна ідентифікувати за допомогою візуального огляду або аналізу зображень ДЗЗ (руїни будівель, кратери та ями, а також знищена військова техніка та ін.).

Для комплексної оцінки безпечності використання територій, забруднених мінами або іншими ВНП, доцільно застосовувати інтегральний показник Safe Accessibility Index (SAI). Запропонована модель враховує не лише просторове розташування мін, але й вертикальні характеристики їх залягання у ґрунті, що є важливим для оцінки ризику під час господарського використання територій. Під час формування інтегрального показника SAI використано систему вагових коефіцієнтів, що відображають відносну значущість окремих груп факторів у формуванні ризику, як зваженої суми нормалізованих компонентів: поверхневого мінного забруднення, вертикального мінного забруднення, вразливості території та її доступності. Його основна ідея – оцінити, наскільки безпечно починати очищення конкретної ділянки з урахуванням стану сусідніх ділянок. Загальну формулу SAI може бути представлено у вигляді:

$$SAI = w_1S + w_2V + w_3E + w_4A \quad (1)$$

де S – показник поверхневого мінного забруднення; V – показник вертикального мінного забруднення; E – фактор вразливості території; A – показник доступності території; w_1 , w_2 , w_3 , w_4 – вагові коефіцієнти, загальна сума яких повинна становити 1.

Вагові коефіцієнти та їх раціональні співвідношення формуються з урахуванням таких принципів:

1) $w_1 = 0,35$ (пріоритет прямої небезпеки підвищує вагу показників наявності мін або ВНП);

2) $w_2 = 0,25$ (складність, невизначеність та прихований характер факторів вертикального мінного забруднення потребують врахування експертної оцінки та геологічних умов);

3) $w_3 = 0,25$ (вразливість території, інфраструктури, землекористувань з урахуванням імовірностей контакту людей з небезпекою);

4) $w_4 = 0,15$ (фізична доступність території для робіт визначає пріоритетність проведення робіт із розмінування та організації подальшої логістики).

Такий розподіл пояснюється тим, що поверхневе мінне забруднення є основним прямим індикатором небезпеки, оскільки воно безпосередньо відображає просторову концентрацію мін або ВНП. Вертикальне забруднення має дещо меншу, але суттєву вагу, оскільки приховане залягання мін може створювати додатковий ризик для населення та саперів.

Наведені раціональні співвідношення ваг впливають із загальних методологічних підходів побудови композитних (інтегральних) індексів у багатокритеріальному аналізі. Їх формування ґрунтується на основі кількох методичних джерел [23], [24], [25].

У [23] вагові коефіцієнти визначаються через попарне порівняння факторів. Якщо застосувати таку логіку до задачі мінного ризику, то фактор прямої небезпеки (наявність мін або ВНП) отримує найбільшу вагу; складність, невизначеність та прихований характер факторів вертикальне мінного забруднення – дещо меншу; вразливість території, інфраструктури та землекористування – приблизно таку ж, а операційні умови фізичної доступності території – найменшу. Вагові коефіцієнти визначено у вигляді раціонального співвідношення, яке відображає ієрархію факторів ризику шляхом співвідношення: 0,35:0,25:0,25:0,15.

У [24] наведено методологію побудови композитних (інтегральних) індексів для ризик-аналізу, де з-поміж варіантів визначення ваг використовується посилення ваг ключових факторів ризику, що також відповідає наведеному співвідношенню.

Для просторових моделей ризику (у тому числі мінного) широко застосовується Weighted Linear Combination (WLC) [25]. В таких моделях найбільшу вагу одержують фактори, що безпосередньо визначають небезпеку, наступний рівень – умови формування ризику, подальші рівні – операційні або допоміжні фактори.

Розглянемо детальніше компоненти моделі:

1. Показник поверхневого мінного забруднення (S) – параметр, що характеризує ймовірність наявності мін на поверхні або у верхньому шарі ґрунту. Поверхневе забруднення неоднорідне. Міни можуть розташовуватись кластерами, коридорами або хаотично. Показник може враховувати: щільність виявлених мін; результати нетехнічного обстеження; інтенсивність бойових дій; відстань до лінії фронту; тип місцевості.

Узагальнено:

$$S = f(D_m, B, T) \quad (2),$$

де D_m – щільність мінного забруднення; B – інтенсивність бойових дій; T – тип місцевості (доступність поверхні для очищення).

2. Показник вертикального (прихованого) мінного забруднення (V) – відображає глибину залягання мін у ґрунті та ймовірність їх вертикального переміщення. Такі міни знаходяться під поверхнею ґрунту і не видимі без спеціальних технічних засобів. Показник може враховувати: глибину залягання мін; тип ґрунту (піски дозволяють мінам швидше «просідати», тоді як глини «фіксують»); процеси ерозії; сезонне промерзання ґрунту; вплив опадів.

Узагальнено:

$$V = f(Z, G, H) \quad (3),$$

де Z – середня глибина залягання мін; G – тип ґрунту; H – гідрологічні умови.

3. Показник вразливості території (E) – характеризує ступінь потенційного впливу мінної небезпеки на ймовірність контакту з мінами або ВНП населення, інфраструктури або транспорту. Його фактори включають: щільність населення (більше населення на території з мінним забрудненням збільшує ризик ймовірності жертв або інцидентів); сільськогосподарське використання (підвищує ризик контакту з прихованими мінами); наявність інфраструктури (високий рівень інфраструктури підвищує потенційний вплив мінної небезпеки, бо пошкодження таких об'єктів зумовлює серйозні наслідки); транспортної мережі (мінна небезпека на транспортних шляхах збільшує ризик порушення пересування та евакуації).

$$E = f(P, L, I) \quad (4),$$

де P – щільність населення; L – використання земель; I – інфраструктура.

4. Показник доступності території (A) визначає ступінь просторового доступу до потенційно небезпечної території. Він включає: відстань до доріг (забезпечення швидкого доступу до території); відстань до населених пунктів (логістичні переваги); перешкоди рельєфу (будь-які природні або штучні елементи місцевості, що ускладнюють фізичний доступ до ділянки або пересування саперів чи технічних засобів на ній).

$$A = f(R, D, M) \quad (5),$$

де R – транспортна мережа; D – відстань до населених пунктів (чим ближче територія до доріг, тим вищий показник доступності); M – морфологія рельєфу.

Інтерпретація значень індексу SAI може бути нормовано в діапазоні 0–1 (табл. 3).

Таблиця 3 – Класифікація рівнів безпеки території за значенням індексу SAI

Значення SAI	Рівень безпеки
0,8 – 1,0	безпечна територія
0,6 – 0,8	відносно безпечна територія
0,4 – 0,6	помірний рівень ризику
0,2 – 0,4	високий рівень ризику
0 – 0,2	дуже небезпечна територія

Джерело: сформованою за загальним принципом нормалізації композитних індексів.

Для побудови моделей оцінки ризику мінного забруднення може використовуватися комплекс інструментів просторового аналізу геоінформаційних систем (ГІС), які дозволяють обробляти, інтегрувати та аналізувати різноманітні просторові дані (табл. 4), що відображають як ймовірність наявності мін, так і потенційний вплив на населення та інфраструктуру. Інтеграція цих показників у ГІС дозволяє формувати карти ризику та визначати пріоритетні території для проведення робіт з гуманітарного розмінування.

Таблиця 4 – Показники оцінки ризику мінного забруднення для ГІС-моделі

Показник	Опис показника	Джерело даних	GIS-інструмент
Щільність мінного забруднення	Кількість виявлених мін або ВВП на одиницю площі	Дані розмінування, польові обстеження	Kernel Density (Ядерна оцінка щільності)
Відстань до зон бойових дій	Просторова близькість до районів активних бойових дій	Військово-аналітичні дані, історичні карти	Euclidean Distance (Евклідова відстань)
Тип землекористування	Категорії використання території (ліси, поля, населені пункти)	Кадастрові та супутникові дані	Land Use Classification (Класифікація землекористування)
Рельєф місцевості	Висота, крутизна схилів, морфологія поверхні	Цифрова модель рельєфу	Slope, Terrain Analysis (Аналіз схилів і рельєфу)
Тип ґрунтів	Фізико-механічні властивості ґрунту	Ґрунтові карти	Reclassification (Переключення класифікації)
Вертикальна міграція мін	Ймовірність переміщення мін у товщі ґрунту	Геологічні та гідрологічні дані	Spatial Modelling (Просторове моделювання)
Відстань до доріг	Просторова близькість до транспортної інфраструктури	Транспортні карти	Buffer / Distance Analysis (Буферний аналіз / аналіз відстаней)
Відстань до населених пунктів	Потенційна загроза для населення	Демографічні та картографічні дані	Buffer Analysis (Буферний аналіз)
Щільність населення	Рівень потенційної експозиції людей до ризику	Статистичні дані	Spatial Join (Просторове приєднання)
Результати розмінування	Інформація про очищені або підозрювані території	Оперативні дані розмінування	Overlay Analysis (Оверлейний аналіз)

Джерело: розроблено автором.

Запропонована модель має кілька важливих переваг:

- 1) дозволяє врахувати вертикальний компонент мінного забруднення;
- 2) дані легко можуть взаємодіяти з ГІС та системами управління інформацією для ПМД;
- 3) використання даних ДЗЗ дозволяє накопичувати значну інформацію про поверхневе забруднення;
- 4) верифіковані дані можна використати для машинного навчання та оптимальної оцінки параметрів у просторовому моделюванні ризиків.

Висновки. Порівняльний аналіз показує, що поверхневе та вертикальне мінне забруднення мають різні механізми формування та просторові характеристики. Якщо поверхневе мінне забруднення переважно визначається військово-тактичними факторами та проявляється у горизонтальному розподілі мін, то вертикальне забруднення формується під впливом природних процесів і характеризується зміною глибини їх залягання. Врахування вертикального компонента мінного забруднення суттєво підвищує точність оцінювання рівнів небезпеки. У традиційних підходах, які базуються переважно на аналізі поверхневого розміщення мін, є ймовірність недооцінювання ризиків у тих випадках, коли ВМП перебувають на значній глибині або змінюють своє положення внаслідок природних процесів. Запропонований підхід дозволяє більш повно відобразити реальний стан мінної небезпеки територій та підвищити ефективність планування заходів з їх обстеження і очищення.

Комплексне врахування обох типів забруднення є необхідною умовою для побудови адекватних моделей оцінки ризику мінної небезпеки та підвищення ефективності планування робіт із гуманітарного розмінування.

У межах дослідження запропоновано підхід до комплексної оцінки ризику мінного забруднення, який враховує як поверхневі, так і вертикальні характеристики розміщення мін. Основні параметри оцінки ґрунтуються на щільності мінного забруднення території, глибині залягання мін та ВМП, типу ґрунту, морфологічних особливостей рельєфу та рівнях антропогенного навантаження. Інтеграція зазначених параметрів дозволяє формувати узагальнений показник ризику, який може бути використано для класифікації територій за рівнями мінної небезпеки.

Отримані результати можуть бути використані для удосконалення системи управління мінними ризиками, зокрема під час визначення пріоритетності проведення робіт з гуманітарного розмінування, планування обстеження територій та розроблення заходів щодо мінімізації загроз для населення. Крім того, запропонований методологічний підхід може бути інтегрований у геоінформаційні системи для створення карт ризику мінного забруднення та підтримки прийняття управлінських рішень у сфері безпеки територій.

Обговорення результатів показує, що подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення моделей прогнозування вертикального переміщення мін у різних типах ґрунтів, а також на інтеграцію геопросторових даних, результатів польових обстежень і сучасних технологій дистанційного зондування Землі. Це сприятиме підвищенню точності оцінювання мінної небезпеки та ефективності заходів із розмінування територій.

Перспективи подальших досліджень полягають в оптимізації моделей прогнозування переміщення мін та ВМП у ґрунтовому середовищі, розширенні використання геоінформаційних технологій та інтеграції польових даних із результатами ДЗЗ для підвищення точності оцінки мінних ризиків.

Заява про використання генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Під час написання цього матеріалу автори не використовували генеративного ШІ та технологій на основі ШІ в процесі написання тексту статті.

Список використаних джерел

1. Hofmann, U., & Juergensen, O. (2017). Preparing for the future: How the SDGs impact mine action. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*, 21(3), Article 12. <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss3/12>.
2. Vivoli, E., Bertini, M., & Capineri, L. (2024). Deep Learning-Based Real-Time detection of surface landmines using optical imaging. *Remote Sensing*, 16(4), 677. <https://doi.org/10.3390/rs16040677>.
3. Krtalić, A., Divjak, A. K., & Župan, R. (2012). Thematic maps for humanitarian demining. *Kartografija i Geoinformacije (Cartography and Geoinformation)*, 11(17), 26–41. <https://kig.kartografija.hr/index.php/kig/article/view/41/74>.
4. Гуцул, Т. (2025). Геоінформаційні системи в гуманітарному розмінуванні територій: історія, розвиток, сучасність. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 3(63), 85–92. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.63.85-92>.
5. Hutsul, T., Lysko, B., Zhezhera, I., Tkach, V., & Tsvyk, T. (2025). Recommendations for planning UAV flight missions for geodata collection. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 119(1), 62–70. <https://doi.org/10.2478/rgg-2025-0007>.
6. Hutsul, T., Khobzei, M., Tkach, V., Krulikovskiy, O., Moisiuk, O., Ivashko, V., & Samila, A. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*, 10(7), e29142. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142>.
7. Зацерковний, В., & Ніколюк, І. (2025). Використання БПЛА для виявлення вибухонебезпечних предметів та побудови карт при гуманітарному розмінуванні. *Технічні науки та технології*, 1(39), 328–345. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-328-345](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-328-345).
8. Ляшенко, Д., Зобнів, І., & Цвик, О. (2025). Картографування мінної небезпеки за даними великомасштабних багатоспектральних знімачів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(108), 103–108. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.14>.
9. Schultz, C., Alegría, A. C., Cornelis, J., & Sahli, H. (2015). Comparison of spatial and aspatial logistic regression models for landmine risk mapping. *Applied Geography*, 66, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.11.005>.
10. Alegría, A. C., Zimanyi, E., Cornelis, J., & Sahli, H. (2017). Hazard mapping of landmines and ERW using Geo-Spatial techniques. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 06(02). <https://doi.org/10.4172/2469-4134.1000197>.
11. Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(sup1), 234–240. <https://doi.org/10.2307/143141>.
12. Гуцул, Т. (2025). Сучасні тенденції штучного інтелекту в гуманітарному розмінуванні територій та його інтеграції в геоінформаційні системи. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 4(64), 67–74. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.64.67-74>.
13. Cirillo, F., Solmaz, G., Peng, Y., Bizer, C., & Jebens, M. (2024, May 15). *Desk-Aid: Humanitarian Aid Desk Assessment with Geospatial AI for Predicting Landmine Areas*. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2405.09444>.
14. Саприкін, Є. (2024). Оптичне виявлення наземних мін з використанням глибокого навчання на основі обмеженого набору даних аерознімання. *Наукоємні технології*, 62(2), 107–115. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18708>.
15. Kim, J., & Kwon, G. (2025). Image-Level Anti-Personnel landmine detection using Deep Learning in Long-Wave Infrared Images. *Applied Sciences*, 15(15), 8613. <https://doi.org/10.3390/app15158613>.
16. Qiu, Z., Guo, H., Hu, J., Jiang, H., & Luo, C. (2023). Joint fusion and detection via deep learning in UAV-Borne multispectral sensing of scatterable landmine. *Sensors*, 23(12), 5693. <https://doi.org/10.3390/s23125693>.
17. Camacho-Sanchez, C., Yie-Pinedo, R., & Galindo, G. (2023). Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas. *Socio-Economic Planning Sciences*, 88, 101611. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611>.

18. United Nations Mine Action Service. (2013). *International Mine Action Standards (IMAS) 09.10: Clearance requirements* (Edition 1, Amendment 2). United Nations. www.mineactionstandards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_09.10_Ed.1_Am.2.pdf.
19. United Nations Mine Action Service. (2019). *International Mine Action Standards (IMAS) 07.11: Land release* (Edition 1, Amendment 5). United Nations. www.mineactionstandards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_07.11_Ed.1_Am.5.pdf.
20. Державна служба України з надзвичайних ситуацій. (2019). *СОП-09.10/ДСНС. Порядок проведення очищення (розмінування) територій, забруднених ВВП, ручним способом* (Окреме доручення № В-127, від 04.09.2019). <https://dsns.gov.ua/upload/2/6/8/9/6/4/w8U1FRIA8jtuJP1ay8pcIxPRJ1wwhOM75TYtsxSJ.pdf>.
21. Wilson, J. N., Chen, S., Reid, M., & Xu, L. (2007). A large-scale systematic evaluation of algorithms using ground-penetrating radar for landmine detection and discrimination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(8), 2560–2572. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.900993>.
22. Kryvova, O., Zimmer, M., Smethers, P., & Baur, J. (2025). *Field testing and evaluation: Challenges in subsurface detection* (Breakout session paper, GICHD Innovation Conference 2025). Geneva International Centre for Humanitarian Demining. https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Documents/Innovation_Conference_2025/Day3/Breakout_Field_Testing_GICHD_Innovation_Conference_2025.pdf.
23. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York, NY: McGraw-Hill.
24. Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffmann, A., & Giovannini, E. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. Paris: OECD Publishing.
25. Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. New York, NY: Springer.

References

1. Hofmann, U., & Juergensen, O. (2017). Preparing for the future: How the SDGs impact mine action. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*, 21(3), Article 12. <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol21/iss3/12>.
2. Vivoli, E., Bertini, M., & Capineri, L. (2024). Deep Learning-Based Real-Time detection of surface landmines using optical imaging. *Remote Sensing*, 16(4), 677. <https://doi.org/10.3390/rs16040677>.
3. Krtalić, A., Divjak, A. K., & Župan, R. (2012). Thematic maps for humanitarian demining. *Kartografija i Geoinformacije (Cartography and Geoinformation)*, 11(17), 26–41. <https://kig.kartografija.hr/index.php/kig/article/view/41/74>.
4. Hutsul, T. (2025). Heoinformatsiini systemy v humanitarnomu rozminuvanni terytorii: istoriia, rozvytok, suchasnist. [Geographic Information Systems in humanitarian demining: history, development and modernity.] *Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. Military special sciences - Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences*, 3(63), 85-92. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.63.85-92>.
5. Hutsul, T., Lysko, B., Zhezhera, I., Tkach, V., & Tsvyk, T. (2025). Recommendations for planning UAV flight missions for geodata collection. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 119(1), 62–70. <https://doi.org/10.2478/rgg-2025-0007>.
6. Hutsul, T., Khobzei, M., Tkach, V., Krulikovskiy, O., Moisiuk, O., Ivashko, V., & Samila, A. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*, 10(7), e29142. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142>.
7. Zatserkovnyi, V., & Nikoljuk, I. (2025). Vykorystannia BPLA dlia vyvavlennia vybukhonebezpechnykh predmetiv ta pobudovy kart pry humanitarnomu rozminuvanni. [Using UAVs to detect explosives and create maps in humanitarian demining]. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical Sciences and Technologies*, 1(39), 328–345. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-328-345](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-328-345).
8. Liashenko, D., Zobniv, I., & Tsvyk, O. (2025). Kartohrafuvannia minnoi nebezpeky za danymy velykomasshtabnykh bahatospektralnykh znyman. [Mapping mine risk using large-scale multispectral imagery]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Heolohiia – Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 103-108. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.14>.

9. Schultz, C., Alegría, A. C., Cornelis, J., & Sahli, H. (2015). Comparison of spatial and aspatial logistic regression models for landmine risk mapping. *Applied Geography*, 66, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.11.005>.
10. Alegría, A. C., Zimanyi, E., Cornelis, J., & Sahli, H. (2017). Hazard mapping of landmines and ERW using Geo-Spatial techniques. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 06(02). <https://doi.org/10.4172/2469-4134.1000197>.
11. Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 46(sup1), 234–240. <https://doi.org/10.2307/143141>
12. Hutsul, T. (2025). Suchasni tendentsii shtuchnoho intelektu v humanitarnomu rozminuvanni terytorii ta yoho intehratsii v heoinformatsiini systemy. [Modern trends of artificial intelligence in humanitarian territory demining and it's integration into geoinformation systems.] *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka. Viiskovo-spetsialni nauky - Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences*, 4(64), 67-74. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.64.67-74> [in Ukrainian]
13. Cirillo, F., Solmaz, G., Peng, Y., Bizer, C., & Jebens, M. (2024, May 15). *Desk-Aid: Humanitarian Aid Desk Assessment with Geospatial AI for Predicting Landmine Areas*. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2405.09444>
14. Saprykin, I. (2024). Optychne vyavlennia nazemnykh min z vykorystanniam hlybokoho navchannia na osnovi obmezhenoho naboru danykh aeroznimannia. [Optical deep learning landmine detection based on limited dataset of aerial imagery.] *Naukoiemni tekhnolohii - Science-Based Technologies*, 62(2), 107–115. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18708>.
15. Kim, J., & Kwon, G. (2025). Image-Level Anti-Personnel landmine detection using Deep Learning in Long-Wave Infrared Images. *Applied Sciences*, 15(15), 8613. <https://doi.org/10.3390/app15158613>.
16. Qiu, Z., Guo, H., Hu, J., Jiang, H., & Luo, C. (2023). Joint fusion and detection via deep learning in UAV-Borne multispectral sensing of scatterable landmine. *Sensors*, 23(12), 5693. <https://doi.org/10.3390/s23125693>.
17. Camacho-Sanchez, C., Yie-Pinedo, R., & Galindo, G. (2023). Humanitarian demining for the clearance of landmine-affected areas. *Socio-Economic Planning Sciences*, 88, 101611. <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101611>.
18. United Nations Mine Action Service. (2013). *International Mine Action Standards (IMAS) 09.10: Clearance requirements* (Edition 1, Amendment 2). United Nations. www.mineactionstandards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_09.10_Ed.1_Am.2.pdf.
19. United Nations Mine Action Service. (2019). *International Mine Action Standards (IMAS) 07.11: Land release* (Edition 1, Amendment 5). United Nations. www.mineactionstandards.org/fileadmin/uploads/imas/Standards/English/IMAS_07.11_Ed.1_Am.5.pdf.
20. Derzhavna sluzhba Ukrainy z nadzvychainykh sytuatsii. [State Service of Ukraine for Emergency Situations] (2019). *SOP-09.10/DSNS. Poriadok provedennia ochyshchennia (rozminuvannia) terytorii, zabrudnennykh VNP, ruchnym sposobom (Okreme doruchennia № V-127 vid 04.09.2019)* [Procedure for manual clearance (demining) of territories contaminated with explosive ordnance]. <https://dsns.gov.ua/upload/2/6/8/9/6/4/w8U1FRIA8jtuJP1ay8pcIxPRJIwwhOM75TYtsxSJ.pdf>.
21. Wilson, J. N., Chen, S., Reid, M., & Xu, L. (2007). A large-scale systematic evaluation of algorithms using ground-penetrating radar for landmine detection and discrimination. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(8), 2560–2572. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2007.900993>.
22. Kryvova, O., Zimmer, M., Smethers, P., & Baur, J. (2025). *Field testing and evaluation: Challenges in subsurface detection* (Breakout session paper, GICHD Innovation Conference 2025). Geneva International Centre for Humanitarian Demining. https://www.gichd.org/fileadmin/uploads/gichd/Documents/Innovation_Conference_2025/Day3/Breakout_Field_Testing_GICHD_Innovation_Conference_2025.pdf.
23. Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. New York, NY: McGraw-Hill.
24. Nardo, M., Saisana, M., Saltelli, A., Tarantola, S., Hoffmann, A., & Giovannini, E. (2008). *Handbook on constructing composite indicators: Methodology and user guide*. Paris: OECD Publishing.

25. Malczewski, J., & Rinner, C. (2015). *Multicriteria decision analysis in geographic information science*. NY: Springer.

Дата першого надходження статті до видання: 11.03.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.03.2026

UDC 355.4+528.9+614.8

Taras Hutsul

candidate of technical sciences, associate professor, senior research fellow
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University (Chernivtsi, Ukraine)
E-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7192-3289>
Scopus ID: 57204148923. ResearcherID: R-8012-2017

SURFACE AND SUBSURFACE MINE CONTAMINATION: RISK ASSESSMENT METHODOLOGY

Mine contamination of territories is one of the global threats to public safety and post-war recovery, as it creates a long-term hazard for the population, infrastructure, and economic activities. Traditional approaches to assess mine hazards are mainly based on the analysis of the surface distribution of explosive remnants of war or on data regarding mine density, which does not account for the complex processes of mine movement within the soil environment. In this regard, the development of comprehensive methods for assessing the risk of mine contamination that consider both surface and vertical processes is of particular relevance.

The aim of this study is to develop a methodology for assess the risk of mine contamination of territories based on geospatial analysis and the integration of indicators of surface and vertical contamination. The paper analyzes modern approaches to spatial modeling of mine hazards, the use of remote sensing data, geostatistical methods, and artificial intelligence (AI) tools for predicting potentially hazardous areas. A system of indicators for assessing the risk of mine contamination is proposed, including indicators of surface mine concentration, factors of vertical mine displacement in the soil, and spatial parameters of territorial accessibility. Geoinformation models and the integrated the Safe Accessibility Index approach are used to combine these indicators.

An approach to the integrated risk assessment is proposed, which takes into account both spatial and subsurface parameters of contamination, as well as the possibilities of applying geoinformation technologies for zoning territories according to hazard levels. The practical implementation of the proposed approach will contribute to improving the efficiency of planning humanitarian demining activities, optimizing resource allocation, and reducing risks for personnel and the population.

Keywords: humanitarian demining; mine contamination; geospatial data; risk assessment; hazard maps; spatial analysis.

Tables: 4. References: 25.