

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ МІН ТА ЗНАЧЕННЯ ВИВЧЕННЯ ГРУНТОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЛЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

В.М. ПОПЛАВСЬКИЙ, В.А. НІКОРИЧ, Т.В. ГУЦУЛ

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58012
e-mail: v.nikorych@chnu.edu.ua*

В огляді зроблена спроба проаналізувати проблему виявлення мін та окреслити перспективу використання тих ґрунтових властивостей, які можуть стати в нагоді при діагностиці вибухонебезпечних предметів та створенні нових алгоритмів обробки відповідних даних.

Проаналізовано п'ять основних напрямків, на які поділяються сучасні технології виявлення наземних мін. Виявлені їх головні переваги та окреслені недоліки.

На прикладі використання технології металодетекторів та георадарів обґрунтована доцільність детального вивчення головних фізичних властивостей ґрунтів, що дозволять більш ефективно використовувати відповідні технології виявлення наземних мін.

Ключові слова: методи виявлення мін, сенсори, фізичні властивості ґрунту, магнітна сприйнятливість ґрунту, електропровідність ґрунту, діелектрична проникність ґрунту, вологість ґрунту

Вступ. Згідно звітів Міжнародної кампанії із заборони наземних мін (ICBL), для понад 70 країн світу проблема мін і боєприпасів, що не розірвалися, є актуальною вже не перший рік. Кількість ідентифікованих жертв невпинно зростає. Згідно з Landmine Monitor (2023), у 2022 році 4710 людей отримали поранення або були вбиті від мін та вибухонебезпечних артефактів війн. 85% жертв, зареєстрованих у 2022 році, становили цивільні особи, половина з яких – діти (1171). Найбільші щорічні втрати фіксувались у Сирії (834) та Україні (608). З моменту повномасштабного вторгнення, в Україні, кількість постраждалих від підривів на мінах та інших видах первинно-нерозірваних боєприпасів зросла в десятки разів. Точна кількість випадків на даний момент не може бути верифікована. Очевидно, що і після закінчення війни, виявлення мін та боєприпасів, що не розірвалися, стане однією із першочергових гуманітарних задач. До вирішення проблеми мають долучитись і ґрунтознавці, як фахівці які знають ґрунтові властивості та їх динаміку в умовах присутності антропогенних включень різної природи, якими для ґрунту виступають вибухонебезпечні предмети (ВНП). У цій оглядовій публікації, нами зроблена спроба проаналізувати

проблему виявлення мін та окреслити перспективу використання тих ґрунтових властивостей, які можуть стати в нагоді при діагностиці ВНП та створенні нових алгоритмів обробки даних.

1. Огляд сучасних методів виявлення наземних мін та боєприпасів, що не розірвались. Серед всіх проаналізованих джерел, варто відмітити праці MacDonald et al. (2003) та Robledo et al. (2009) в яких досить системно описані історичні аспекти та технічні характеристики мін, а також проблематика їх виявлення різними методами.

Програми протимінної діяльності традиційно ґрунтуються на ручних методах, процедурах і навчанні, які є повільними і трудомісткими. Для успішного розмінування потрібно враховувати широкий спектр умов. У багатьох випадках ручний підхід може бути найбільш прийнятним та ефективним способом виявлення і знищення наземних мін. Однак, дедалі більше визнається, що ширше використання технологій може дозволити проводити виявлення мін, підготовку ґрунту і розмінування, а також інші елементи протимінної діяльності більш економічно, швидко і з меншим ризиком.

Для виявлення мін використовуються різні методи. На сьогоднішній день добре розробленими є п'ять основних напрямків, на які поділяються сучасні технології виявлення (Gooneratne et al., 2004):

- 1) Технології металодетекторів
- 2) Електромагнітні методи
- 3) Акустичні (сейсмічні) методи
- 4) Біологічні методи
- 5) Механічні методи

Технології металодетекторів включають використання металодетекторів, магнітних сенсорів та вимірювачів провідності.

Базовий металодетектор, який використовується для виявлення мін, вимірює порушення випромінюваного електромагнітного поля, викликаного присутністю металевих предметів у ґрунті (Daniels, 2008; Zhang et al., 2004). Популярний базовий металодетектор є легким та дешевим у використанні і має середню успішність виявлення. Індукційний котушковий сенсор – створює зображення об'єкта, що виявляється, замість того, щоб виробляти звуковий сигнал. У своїй поточній версії він здатний виявляти і бачити металеві частини розміром менше 1 см на глибині до 50 см. Але система не може використовуватися на новіших пластикових мінах, і прототип є досить важким [Gooneratne et al., 2004].

Магнітні сенсори вимірюють магнітне поле. Подача струму через дріт, обгорнутий навколо металевого стрижня або петлі, створює магнітне поле, яке проникає у ґрунт. Ґрунт значно порушує магнітне поле, що вимірюється магнітометром. Існує чотири типи магнітометрів: феррозондові (флюксгейт) магнітометри, протонні прецесійні магнітометри, атомні магнітометри з оптичною підкачкою та магнітометри зі звивистою обмоткою.

Недорогий, міцний та енергозберігаючий флюксгейт магнітометр вимірює величину та напрямок магнітного поля, але погано розрізняє металобрухт біля поверхні землі і міни, встановлені глибоко в ґрунті. Крім того, вони характеризуються аналоговий сигналом, який важко обробляти цифровим способом (Barnawi et al., 2022).

Більш чутливий, але повільніший протонний прецесійний магнітометр вимірює рух протонів у рідині. Коли ці протони поляризовані і піддаються впливу навколишнього магнітного поля, частота прецесії буде відхилятися від їхньої природної частоти пропорційно силі навколишнього поля. Він більш чутливий до шуму. Атомні магнітометри з оптичною підкачкою використовують той самий принцип, за винятком того, що вони використовують атом

певного газу-пари. Цей метод дорожчий, але швидший і чутливіший (Gooneratne et al., 2004).

Магнітометр зі звивистою обмоткою створює змінне магнітне поле, яке збуджує струми в металевих предметах, що вирівнюються в основному в одному напрямку і можуть бути прочитані детектором. Він має нижчий рівень хибних тривог у 5-10 разів, вартує так само, як і металодетектор, і в 10-20 разів швидший. Хоча він краще розрізняє міни від металевого сміття, ніж металодетектор, рівень хибних тривог все ще може бути знижений (Bruschini and Gros, 1998).

Вимірювачі провідності використовують магнітне поле для створення вихрового струму в об'єкті. Встановлюючи базовий стандарт у чистій зоні перед пошуком, можна виявити зміни провідності ґрунту, які можуть бути викликані провідниками, такими як міни (Eblagh, 1996). Серед переваг варто відмітити розумну глибину проникнення та можливість детектування пластикових мін. Поряд з цим, горизонтальний діапазон виявлення обмежений, а також повинна враховуватись природна варіація провідності ґрунту. Роздільна здатність зображення також погана, націлювання на окремі міни є непрактичним, тому і більше підходить для встановлення меж мінного поля.

Електромагнітні методи включають застосування ґрунтових радіолокаційних радарів, приладів, що використовують індукцію радіочастотних імпульсів, мікрохвилі, ультразвук, інфрачервоне чи рентгеновське випромінювання і т.п. Саме такий підхід можна вважати на сьогоднішній день найпоширенішим у середовищі фахівців з розмінування.

Ґрунтовий радіолокаційний радар (GPR) виявляє закопані об'єкти, випромінюючи радіохвилі в землю і аналізуючи зворотні сигнали, що утворюються внаслідок відбиття хвиль на межах матеріалів з різними показниками заломлення, викликаними відмінностями в електричних властивостях. Найнижчі частоти забезпечують найкраще проникнення, але широкосмугові техніки, ефективні для отримання високої деталізації та найкращого співвідношення сигнал/шум (Sato et al, 2012). GPR легкі та прості в експлуатації системи, що активно доповнюють звичайні металодетектори. Вони можуть знаходити міни з різними типами оболонок і також можуть створювати зображення міни або іншого закопаного об'єкта на основі варіацій діелектричної постійної. Однак продуктивність GPR може бути надзвичайно чутливою до складних взаємодій між вмістом металу в міні, частотою дослідження, рівнем вологості ґрунту та іншими його фізичними параметрами (Nicoud,

1996). На жаль, технологія не завжди дозволяє виявляти дуже маленькі пластикові міни на невеликій глибині (Metwaly, 2007.).

До електромагнітних методів відносять і технології виявлення на основі ядерного квадрупольного резонансу (NQR). Пристрій NQR індукуює радіочастотний імпульс відповідної частоти в підповерхневі шари через котушку, підвішену над землею. Цей радіочастотний імпульс змушує ядра вибухових речовин резонувати і індукувати електричний потенціал у приймальної котушці (Hibbs, 2003). В літературі є дані, що цей тип виявлення має 90% "специфічну для речовини" швидкість виявлення і менше 1% хибнопозитивних результатів. На відміну від багатьох інших технологій, рівень хибних тривог у NQR не обумовлений шумом ґрунту, а швидше його співвідношенням сигнал/шум. Позитивною характеристикою методу є стійкість до різноманітних ґрунтових умов. Основним недоліком застосування є вразливість до радіочастотних перешкод із навколишнього середовища, особливо в діапазоні 790–900 кГц (Ostafin and Nogaj, 2007.).

При використанні мікрохвильових методів, зображення створюється у комп'ютері з відбитих сигналів. Сильні сторони методу полягають у тому, що комп'ютер створює зображення особливостей рельєфу всіх морфологічних елементів ґрунту, в тому числі прихованими мінами, які мають визначену геометричну форму та розміри. Однак менш ефективний з пластиковими мінами.

Досить перспективним є використання різноманітних томографів. Наприклад, при застосуванні томографії електричного імпедансу (EIT), за допомогою електричного струму створюється карта провідності середовища. Ця технологія підходить для виявлення всіх типів мін. Особливо добре підходить для виявлення мін у вологих середовищах завдяки підвищеній провідності вологого середовища. Обладнання є відносно простим і недорогим, хоча має свої обмеження через необхідність фізичного контакту з ґрунтом, що може призвести до детонації міни. Технологія не може використовуватися на сухих, непровідних поверхнях і є надто чутливою до електричних шумів. Варто відмітити, що зі збільшенням глибини сканованого об'єкта є обмеження у використанні електродів фіксованого розміру (Bouchette, 2008).

Інфрачервоні (гіперспектральні) методи виявляють аномальні варіації в електромагнітному випромінюванні, відбитому або випромінюваному поверхневими мінами або

ґрунтом і рослинністю безпосередньо над закопаними мінами. Методи теплового виявлення використовують добові варіації температур в областях біля мін у порівнянні з навколишніми областями. Нетеплові методи виявлення ґрунтуються на тому, що області біля мін відбивають світло (як природне, так і штучне) інакше, ніж навколишні області. Ці методи безпечні, легкі та можуть сканувати великі площі. Коли вони використовуються з повітряних платформ, вони особливо ефективні для виявлення поверхневих мін. Однак їх продуктивність має значні варіації, залежно від динамічних характеристик навколишнього середовища. Алгоритми для обробки сигналів у інформативний спосіб є відносно нерозвиненими і не пов'язані з фізичними явищами. Теплові сигнатури наразі недостатньо зрозумілі, і відсутня комплексна прогностична модель (Makki et al, 2017).

Досить активно розробляються методи діагностики на основі зворотного розсіювання рентгенівських променів, що дають суттєву перевагу у діагностиці пластикових мін. Пластмаси, краще розсіюють рентгенівське випромінювання завдяки електронній густині. Однак, якщо потужність джерела випромінювання залишається низькою, щоб бути безпечною для портативної системи, час, необхідний для отримання зображення, може бути тривалим. Крім того, технологія чутлива до змін джерела/детектора та коливань поверхні землі, а вплив радіації може спричинити проблеми в майбутньому (Yuk et al, 2006).

Нейтронні методи, засновані на збудженні елементів ґрунту та будь-яких вибухових речовин гамма-променями або нейтронами. Фізичні властивості сповільнення нейтронів дозволяють використовувати джерела випромінювання низької сили, що зменшує екранування, необхідне для захисту працівників від радіаційного опромінення. Однак вони не можуть визначити, яка молекулярна структура присутня у об'єкті сканування. Коливання поверхні ґрунту та зміна висоти датчика також сприяють виникненню помилкових тривог у системах без зображення. Очевидно, що прилади матимуть велику вагу, що на мінному полі є досить небезпечним (Csikai et al, 2004).

Звичайне ультразвукове виявлення мін передбачає випромінювання в середовище звукової хвилі з частотою вище 20 кГц, яка відбивається на межі матеріалів з різними акустичними властивостями. Достатньо потужний ультразвуковий сигнал здатний глибше проникати в ґрунт і виявляти інородні

об'єкти (Martin et al., 2002). Він також здатний працювати на вологому ґрунті. Однак, ультразвукові системи стикаються з проблемами на межі повітря та землі (Rajesh et al, 2011).

Акустичні (сейсмічні) методи основані на використанні відповідних сенсорів, які випромінюють звукові хвилі у ґрунт і вимірюють відбиті. Серед сильних сторін можна відзначити успішне виявлення як металевих, так і пластикових мін. Вони характеризуються однією з найкращих глибин проникнення, однак є найчутливішими до навколишніх шумів та вібрацій. Апаратура детектування потребує нових алгоритмів обробки сигналів.

Біологічні методи базуються на використанні в якості детекторів живих організмів. Навчені собаки можуть виявити запах вибухівки в міні, закладеній у землю на глибину до 60 см (McLean et al, 2005). Як альтернативу використанню собак або в поєднанні з їх використанням, дослідники з Університету Антверпена навчили виявляти міни африканських гігантських мішкових щурів. Щурів навчали сигналізувати про наявність вибухівки, дряпаючи поверхню землі ногами. Обмеженням у використанні собак та щурів є труднощі їх переходу з рівня вибухових речовин під час навчання та польової діагностики (DeAngelo, 2018).

Ентомологи навчили бджіл виявляти різноманітні вибухові речовини та досліджують способи використання навчених бджіл у гуманітарному розмінуванні. Треновані бджоли виявляють вибухівку, тому вони не обмежені тими ж типами хибних тривог, якими страждають металошукачі. Вони також потенційно можуть обшукати відносно велику територію за короткий час. Що стосується хімічних і бактеріальних систем виявлення, необхідно більше зрозуміти про долю та транспортування вибухових речовин під поверхнею, перш ніж можна зрозуміти повний потенціал навчених бджіл для виявлення наземних мін (Gillanders et al, 2021; Filipi et al, 2022).

Досить перспективним у біодіагностиці вибухових речовин є використання бактерій. Принцип бактеріального виявлення мін передбачає розпилення окремих штамів на уражену мінами територію, з наступним інтервальним пошуком флуоресцентних сигналів. Цей метод може охоплювати великі території, але має екологічні обмеження (Habib, 2007).

Механічні методи засновані на застосуванні різноманітних зондів та щупів, а також машин для розмінування.

Основним підходом до виявлення мін є підштовхування. Використовуючи щупи, жорсткі металеві палиці довжиною близько 25 см, сапер сканує ґрунт під невеликим кутом, як правило, 30°. Кожного разу, коли він виявляє незвичайний предмет, він оцінює контур, який вказує, чи є предмет міною. Оператор зонду на досвіді вчиться відчувати або чути різницю між кожухом міни та іншими закопаними предметами. Зондування є усталеним етапом ручного розмінування. Удосконалені зонди можуть знизити ризики для саперів, надаючи зворотний зв'язок щодо характеру об'єкта. Крім того, теоретично зонд може забезпечувати будь-який із ряду різних методів виявлення (акустичний, електромагнітний, термічний тощо), а близькість зонда до наземної міни може підвищити ефективність. Але зондування небезпечне через механічний контакт ВВП (Kasban et al, 2010).

Швидке розмінування пов'язане із використанням відповідних машин. Збройні сили використовують кілька типів розміновувачів, які використовують махові ланцюги (щоб збивати землю), катки (щоб перекидати землю та підривати міни) і граблі або леза (щоб виорювати мінні поля, штовхаючи міни вбік). Класичними машинами цього типу є танки, оснащені певними пристроями для розмінування. Новий тип машин мають дистанційне керування, що мінімізує ризик для персоналу. Ці методи є швидкими та ефективними, і є менша ймовірність поранення людей під час розмінування. Однак таке розмінування знищує природне залягання генетичних горизонтів ґрунту, що унеможливорює ефективне використання цих територій на десятки та сотні років (Gooneratne et al, 2004).

Отже проведений аналіз методів виявлення мін та інших ВВП демонструє необхідність чіткого розуміння поведінки будь-якого сенсора у ґрунті, а також відгук ґрунтових властивостей на тип його дії.

2. Взаємозв'язок між властивостями ґрунтів і роботою сенсорів виявлення ВВП на прикладі металошукачів та георадарів.

Міни, особливо протипіхотні зазвичай закладаються неглибоко або просто під поверхнею й завжди оточені ґрунтом, тому на методи виявлення зазвичай впливають його властивості.

Магнітна сприйнятливість ґрунтів обумовлена наявністю феромагнітних мінералів, головним чином магнетиту, титаномагнетиту і маггеміту. Магнетит і титаномагнетит переважають в основних магнітних породах, і

концентрації цих мінералів можуть бути вищими в ґрунтах, ніж у пов'язаному материнському матеріалі породи через залишкове збагачення під час процесів ґрунтоутворення (Singer and Fine, 1989). Таке збагачення відбувається тому, що ці мінерали мають вищу стійкість до вивітрювання порівняно з різними іншими мінералами ґрунту (Friedrich et al., 1992). Маггеміт утворюється під час вивітрювання та генезису ґрунту та є продуктом окислення магнетиту (Schwertmann, 1988) або може утворюватися як новий мінерал шляхом кристалізації розчиненого заліза (Mullins, 1977). Магнетит і маггеміт також можуть утворюватися в результаті діяльності бактерій (Fassbinder et al., 1990), термічної трансформації оксидів заліза під час пожеж (Kletetschka and Banerjee, 1995) або можуть виникати в результаті антропогенного впливу атмосфери (Dearing et al., 1996).

Магнітна сприйнятливість вважається найбільш впливовою властивістю ґрунту на метод електромагнітної індукції, який використовується металодетекторами (Das, 2006).

Ґрунт із високою магнітною сприйнятливістю створює додаткову реакцію на металошукачі та може бути неправильно витлумачений як реакція на виявлення металу та/або заважає реакції наземних мін. Це може призвести до помилкових спрацьовувань і відсутності виявлення мін. Більшість сучасних металодетекторів мають функцію «компенсації ґрунту», спрямовану на зменшення впливу ґрунтових властивостей; однак надмірна компенсація або неправильні налаштування знижують чутливість детектора металу, що також призводить до пропусків виявлення мін.

Хоча магнітна сприйнятливість теоретично впливає на георадар, ефект має бути надзвичайно високим, щоб впливати на сигнал. Наприклад, Jol (2009) припускає, що вона повинна бути більшою за $30\,000\text{ SI}\cdot 10^{-5}$, щоб мати вплив, як діелектрична проникність. Ґрунти з такою високою магнітною сприйнятливістю надзвичайно рідкісні. Навіть тропічні ґрунти, які часто демонструють високу сприйнятливість, зі значеннями в цьому діапазоні є винятковими (Preetz et al, 2008; Igel et al., 2009). Таким чином, магнітна сприйнятливість практично не впливає на георадар у більшості ґрунтів.

Дослідження магнітної сприйнятливості ґрунту можна легко виконати за допомогою вимірювальних пристроїв на основі електромагнітної індукції як у полі, так і в лабораторії. Однак частотну залежність можна

виміряти лише в лабораторії (Takahashi et al, 2011).

Електропровідність ґрунтів. Ґрунт – трифазна система: тверда матриця, ґрунтовий розчин і ґрунтове повітря. Ці три фази викликають три механізми провідності, які визначають електропровідність. Перший – це електронна провідність, викликана вільними електронами в кристалічній решітці мінералів, а другий – електролітична провідність, викликана рідинами в поровому просторі, що містить розчинені іони. Ці два типи провідності не залежать від частоти в широкому діапазоні. Однак третя провідність, яка називається поверхневою провідністю, часто виявляє частотну залежність. Поверхнева провідність визначається внутрішньою поверхнею ґрунту та пов'язана з катіонообмінною здатністю матеріалу, яка зазвичай висока для глинистих мінералів і органічної речовини ґрунту (Igel, 2007; Knödel et al., 2007).

Електропровідність вважається впливовою властивістю ґрунту на металодетекторах, але меншою, ніж магнітна сприйнятливість, і лише якщо вона надзвичайно висока (Das, 2006). Однак електропровідність впливає на георадар у нормальному діапазоні. Властивість пов'язана в першу чергу з ослабленням електромагнітних хвиль, таким чином, що радарний сигнал не може поширюватися на велику відстань у середовищі з високою провідністю. Глибина загасання електромагнітного поля $1/e$ ($\sim -8,7$ дБ) називається глибиною скін-фактора і часто використовується для оцінки глибини проникнення.

Статичну електричну провідність в місці розташування і розподіл можна легко отримати в польових умовах шляхом вимірювання опору за допомогою електродів і зворотних розрахунків. Частотну залежність на низьких частотах можна виміряти методом спектральної індукованої поляризації в польових або лабораторних умовах (Takahashi et al, 2011).

Діелектрична проникність і вологість ґрунту. Рідку фазу складає вільна та зв'язана вода (рухливість обмежена через поглинання поверхнею ґрунтової матриці). Відносна діелектрична проникність повітря дорівнює 1, а для поширених мінералів у ґрунтах і гірських породах знаходиться в діапазоні від 4,5 до 10, тоді як діелектрична проникність води становить 78,5 при 25 °С. Таким чином, на діелектричну проникність водоносного ґрунту сильно впливає вміст води (Robinson et al., 2003).

Діелектрична проникність більшою мірою впливає на георадар, ніж на електропровідність (Lampe and Holliger, 2003; Igel, 2008).

Вимірювання діелектричної проникності можна легко виконати в польових умовах, наприклад, за допомогою датчика TDR. Просторовий розподіл можна отримати шляхом повторення вимірювань TDR у різних положеннях.

Гетерогенність ґрунту. Властивості ґрунту завжди демонструють просторову мінливість, як продемонстрували, наприклад, Butler (2003) та Igel and Preetz (2009) для магнітної сприйнятливості. Просторові зміни можна кількісно визначити за допомогою статистичних параметрів, наприклад, величини кореляції та мінливості. Ці параметри можна визначити шляхом розрахунку варіограми, яка є інструментом геостатистичного аналізу. Експериментальна варіограма описана (Deutsch and Journel, 1992).

Ґрунт можна вважати гомогенним, якщо виконується одна або декілька наступних умов:

1) величина кореляції значно менша або більша за цільовий розмір;

2) величина кореляції значно менша або більша за просторову роздільну здатність методу виявлення;

3) відносно невелика варіабельність.

Якщо жодна з перерахованих вище умов не виконується, ґрунт вважається гетерогенним і може мати додатковий вплив на роботу металодетектора. Наприклад, металодетектор компенсується в одному місці і не реагує на ґрунт у цьому місці. Однак компенсація може

бути недійсною в сусідніх місцях, де ґрунт має інші властивості, і, як наслідок, ґрунт спричиняє хибні спрацьовування. Для георадара просторові зміни діелектричної проникності генерують відбиття, які можуть спотворювати сигнатури мін і/або створювати додаткові реакції на радар. Крім того, деформується діаграма спрямованості антен (Lampe and Holliger, 2003; Holliger and Maurer, 2004).

Просторову варіацію для конкретної властивості можна визначити шляхом повторення однократних вимірювань у різних точках у поєднанні з аналізом. Ці вимірювання можна проводити лише в польових умовах, оскільки зразки ґрунту не можуть бути доставлені в лабораторію із збереженням природної просторової структури (Takahashi et al, 2011).

Висновок. У цьому огляді описано різні методи, які використовуються для виявлення наземних мін. Це стара проблема, і досі проводиться багато нових досліджень. Вивчення фізичних властивостей ґрунту, зокрема магнітної сприйнятливості, електропровідності, діелектричної проникності і вологості ґрунту є критично важливим для створення ефективних методів виявлення мін та інших вибухонебезпечних предметів.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють, що дослідження проводилося за відсутності будь-яких комерційних або фінансових відносин, які можна було б витлумачити як потенційний конфлікт інтересів.

Список літератури / References:

1. Barnawi, A., Kumar, N., Budhiraja, I., Kumar, K., Almansour, A., & Alzahrani, B. (2022). Deep reinforcement learning based trajectory optimization for magnetometer-mounted UAV to landmine detection. *Computer Communications*, 195, 441-450.
2. Bouchette, G., Gagnon, S., Church, P., Luu, T., & McFee, J. (2008). Electrical impedance tomography for underwater detection of buried mines. In *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIII* (Vol. 6953, pp. 179-190). SPIE.
3. Bruschini, C., & Gros, B. (1998). A survey of research on sensor technology for landmine detection. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, 2(1).
4. Butler, D.K., 2003. Implications of magnetic background for unexploded ordnance detection. *Journal of Applied Geophysics*. 54, 111-125.
5. Csikai, J., Doczi, R., & Kiraly, B. (2004). Investigations on landmine detection by neutron-based techniques. *Applied radiation and isotopes*, 61(1), 11-20.
6. Das, Y., 2006. Effects of soil electromagnetic

- properties on metal detectors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44, 1444-1453.
7. DeAngelo, D. (2018). Demilitarizing disarmament with mine detection rats. *Culture and Organization*, 24(4), 285-302.
8. Dearing, J.A., Hay, K.L., Baban, S.M.J., Huddleston, A.S., Wellington, E.M.H., Loveland, P.J. (1996). Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conflicting theories using a national data set. *Geophysical Journal International*. 127, 728-734.
9. Deutsch, C.V., Journel, A.G. (1992). *GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York.
10. Eblagh, K. (1996). Practical problems in demining and their solutions. In *EUREL International Conference on the Detection of Abandoned Land Mines*, Edinburgh, UK, No. 431, 1-5
11. Fassbinder, J.W.E., Stanjek, H., Vali, H., (1990). Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature* 343, 161-163.
12. Filipi, J., Stojnić, V., Muštra, M., Gillanders, R. N., Jovanović, V., Gajić, S., ... & Risojević, V. (2022). Honeybee-based biohybrid system for landmine detection. *Science of the total environment*, 803,

- 150041.
13. Friedrich, G., Marker, A., Kanig, M. (1992). Heavy mineral surveys in exploration of lateritic terrain. In: Butt, C.R.M., Zeegers, H. (Eds.), *Handbook of exploration geochemistry.*, 4. Elsevier, Amsterdam, pp. 483–498. Regolith exploration geochemistry in tropical and subtropical terrains.
 14. Gillanders, R. N., Glackin, J. M., Babić, Z., Muštra, M., Simić, M., Kezić, N., ... & Filipi, J. (2021). Biomonitoring for wide area surveying in landmine detection using honeybees and optical sensing. *Chemosphere*, 273, 129646.
 15. Gooneratne, C. P., Mukhopahyay, S. C., & Gupta, G. S. (2004). A review of sensing technologies for landmine detection: Unmanned vehicle based approach. In *2nd International Conference on Autonomous Robots and Agents* (pp. 401-407).
 16. Habib, Maki K. (2007). Controlled biological and biomimetic systems for landmine detection. *Biosens. Bioelectron.* 23 (1), 1–18
 17. Hibbs, A. D. (2003). Nuclear quadrupole resonance (paper i). Alternatives for Landmine Detection. *RAND Corporation*, 169-178.
 18. Holliger, K., Maurer, H. (2004). Effects of stochastic heterogeneity on ray-based tomographic inversion of crosshole georadar amplitude data. *Journal of Applied Geophysics* 56, 177–193.
 19. Igel, J. (2007). On the Small-Scale Variability of Electrical Soil Properties and Its Influence on Geophysical Measurements. Ph.D. Thesis, Frankfurt University, Frankfurt am Main, Germany.
 20. Igel, J. (2008). The small-scale variability of electrical soil properties — influence on GPR measurements. 12th International Conference on Ground Penetrating Radar. Birmingham, UK.
 21. Igel, J., Preetz, H., Altfelder, S. (2009). Predicting soil influence on the performance of metal detectors: Magnetic properties of tropical soils. *Journal of ERW and Mine Action* 13.1, 103–107.
 22. Kasban, H., Zahran, O., Elaraby, S. M., El-Kordy, M., & Abd El-Samie, F. E. (2010). A comparative study of landmine detection techniques. *Sensing and Imaging: An International Journal*, 11, 89-112.
 23. Kletetschka, G., Banerjee, S.K. (1995). Magnetic stratigraphy of Chinese loess as a record of natural fires. *Geophysical Research Letters* 22, 1341–1343.
 24. Knödel, K., Lange, G., Voigt, H.-J. (Eds.) (2007). *Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies*. Springer, Berlin.
 25. Lampe, B., Holliger, K. (2003). Effects of fractal fluctuations in topographic relief, permittivity and conductivity on ground-penetrating radar antenna radiation. *Geophysics* 68, 1934–1944.
 26. Landmine Monitor Report 2023. https://backend.icblcmc.org/assets/reports/Landmine-Monitors/LMM2023/Downloads/lm2023_briefing_ppt.pdf
 27. MacDonald, J., Lockwood, J.R., McFee, J.E., Altschuler, T., Broach, T., Carin, L., Harmon, R., Rappaport, C., Scott, W., Weaver, R. (2003). Alternatives for Landmine Detection. RAND/White House Office of Science and Technology Policy (OSTP) Mine Detection Task Force Report, RAND Science and Technology Policy Institute, Report Number MR-1608-OSTP (ISBN 0-8330-3301-8), February 2003.
 28. Makki, I., Younes, R., Francis, C., Bianchi, T., & Zucchetti, M. (2017). A survey of landmine detection using hyperspectral imaging. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 124, 40-53.
 29. Martin, J. S., Fenneman, D. J., Codron, F. T., Rogers, P. H., Scott Jr, W. R., Larson, G. D., & McCall II, G. S. (2002). Ultrasonic displacement sensor for the seismic detection of buried land mines. In *Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VII* (Vol. 4742, pp. 606-616). SPIE.
 30. McLean, I., Sargisson, R., & Mansfield, I. (2005). Detection of landmines by dogs: environmental and behavioural determinants.
 31. Metwaly, M. (2007). Detection of metallic and plastic landmines using the GPR and 2-D resistivity techniques. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(6), 755-763.
 32. Mullins, C.E. (1977). Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science: A review. *Journal of Soil Science* 28, 223–246.
 33. Nicoud, J.D. (1996). Post-conflict and sustainable humanitarian demining. In *Proceedings of the Technology and the Mine Problem Symposium* (pp. 4-63/4-66). Monterey, CA: Naval Postgraduate School.
 34. Ostafin, M., & Nogaj, B. (2007). 14N-NQR based device for detection of explosives in landmines. *Measurement*, 40(1), 43-54.
 35. Preetz, H., Altfelder, S., Igel, J. (2008). Tropical soils and landmine detection — an approach for a classification system. *Soil Science Society of America Journal* 72, 151–159.
 36. Rajesh, K. R., Murali, R., & Mohanachandran, R. (2011). Advanced acousto-ultrasonic landmine detector for humanitarian mine sweeping. In *2011 IEEE Global Humanitarian Technology Conference* (pp. 316-321). IEEE.
 37. Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D., Friedmann, S.P. (2003). A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal* 2, 444–475.
 38. Robledo, L., Carrasco, M., Mery, D. (2009). A survey of land mine detection technology. *Int. J. Remote Sens.* 30 (9), 2399–2410.
 39. Sato, M., Yokota, Y., Takahashi, K., & Grasmueck, M. (2012). Landmine detection by 3D GPR system. In *Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XVII* (Vol. 8357, pp. 322-330). SPIE.
 40. Schwertmann, U. (1988). Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: Stucki, J.W., Goodman, B.A., Schwertmann, U. (Eds.), *Iron in Soils and Clay Minerals.*, NATO ASI Series C217, D. Reidel, Dordrecht, pp. 267–308.
 41. Singer, M.J., Fine, P. (1989). Pedogenetic factors affecting magnetic susceptibility of Northern California soils. *Soil Science Society of America Journal* 53, 1119–1127.

42. Takahashi, K., Preetz, H., & Igel, J. (2011). Soil properties and performance of landmine detection by metal detector and ground-penetrating radar—Soil characterisation and its verification by a field test. *Journal of Applied Geophysics*, 73(4), 368-377.
43. Yuk, S., Kim, K. H., & Yi, Y. (2006). Detection of buried landmine with X-ray backscatter technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 568(1), 388-392.

ANALYSIS OF LANDMINE DETECTION METHODS AND THE IMPORTANCE OF STUDYING SOIL PROPERTIES FOR THEIR EFFECTIVE APPLICATION

V.M. Poplavskyi, V.A. Nikorych, T.V. Hutsul

*Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University,
Ukraine, 58012, Chernivtsi, Kotsiubynsky 2 Str.
e-mail: v.nikorych@chnu.edu.ua*

The review attempts to analyze the problem of mine detection and outline the prospects for using soil properties that are useful in detecting explosive objects and creating new algorithms for processing relevant data. The article analyzes five main areas in which modern landmine detection technologies are divided. Their main advantages and disadvantages are identified. Using the example of metal detectors and ground-penetrating radar technology, the necessity of a detailed study of the main physical properties of soils is justified, which will enable more efficient use of appropriate technologies for detecting landmines.

Keywords: methods of mine detection, sensors, physical properties of soil, magnetic susceptibility of soil, electrical conductivity of soil, dielectric permittivity of soil, soil moisture

Отримано редколегією 03.06.2024 р.

ORCID ID

Володимир Нікорич: <https://orcid.org/0000-0001-5006-4027>

Тарас Гуцул: <https://orcid.org/0000-0002-7192-3289>