



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.3.271>

УДК 623.368:623.746–519

Методи виявлення мін для гуманітарного розмінування: огляд

І. Е. Ментус¹, В. А. Ясько¹, Є. Ю. Саприкін^{2*}

¹ Кафедра військової підготовки Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка

² ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Міжнародне співтовариство все глибше усвідомлює масштаби і гостроту проблем, породжуваних наземними мінами та вибухонебезпечними залишками війни, зокрема боеприпасами, що не вибухнули, погоджуючись з тим, що йдеться про глобальну проблему, яка потребує узгоджених заходів у відповідь. Водночас, досі немає методів виявлення мін, які б забезпечували стовідсоткову ефективність і відповідали всім критеріям, що застосовуються до гуманітарного розмінування. Існуючі методи суттєво відрізняються за такими параметрами, як безпека операторів, продуктивність, економічна ефективність, універсальність. Значна увага останнім часом приділяється дистанційним методам виявлення мін за допомогою БПЛА. Їх прогрес обумовлений бурхливим розвитком самих БПЛА, переносних сенсорів, а також методів аналізу даних. Незважаючи на значні успіхи в дослідженнях за останні роки, дистанційні методи досі не поставлені на потік і більшість із них перебувають на стадії досліджень на тестових полігонах. Трохи краща ситуація з наземними роботизованими платформами. Результати роботи різних груп дослідників не уніфіковані, не сформовані єдині підходи до верифікації методів. Наявність різних за принципом і фізичною природою сигналів напрямів досліджень не завжди дає змогу їх учасникам бути обізнаними в найновіших досягненнях у суміжних сферах, тому що відстежування розвитку всіх напрямів досліджень є доволі складним завданням. Однак, тільки поєднання декількох методів на різних фізичних принципах робить можливим появу дійсно надійного і універсального методу. Але для доведення концепції поєднання методів на різних фізичних принципах від ідеї до практичного втілення необхідне ґрунтовне розуміння дослідниками кожного методу, що мають бути поєднані. Методи, які раніше не вважалися перспективними, можуть отримати новий імпульс розвитку завдяки появі вдосконалених сенсорів. Отже, необхідні оглядові роботи, що розкриватимуть наявні методи в їх різноманітті, даватимуть базове розуміння фізичних принципів, що лежать у їх основі, і водночас не будуть перевантажені зайвими деталями. Саме таку мету і ставить ця стаття.

Ключові слова: вибухонебезпечні предмети (ВНП), методи виявлення ВНП, магнітометр, металодетектор.

© І. Е. Ментус, В. А. Ясько, Є. Ю. Саприкін. 2024

Постановка проблеми

З початком військових дій на Сході України постало питання щодо розмінування постраждалих територій. Наразі цю проблему розв'язують вітчизняні фахівці та вчені, а також залучаються закордонні фахівці з виявлення та знешкодження вибухонебезпечних предметів (ВНП). Методи виявлення ВНП, котрі нині застосовуються в Україні, є малоефективними з огляду на масштаб замінованих територій. Отже, необхідна розробка більш ефективних методів виявлення і знешкодження ВНП на основі досягнень технічного прогресу.

Аналіз останніх досліджень

У зарубіжних країнах розробили та використовують сучасні мобільні робототехнічні комплекси для розмінування і продовжують фінансувати роботи з розширення функціональних можливостей їх застосування в нових напрямках завдяки створенню

нових конструктивних схем або використанню уніфікованих підсистем.

Актуальність проблеми

Вибухові пристрої є небезпечними штучно створеними засобами, це серійні інженерні боеприпаси (міни) та саморобні, які містять снаряди, авіабомби тощо. Їх своєчасне виявлення – найважливіше завдання для забезпечення живучості особового складу та подальшого використання території.

Мета статті

Обґрунтування рекомендацій щодо застосування датчиків, методів та засобів виявлення ВНП.

Виклад основного матеріалу

Виявляти штучні об'єкти можна за допомогою активних та пасивних методів локації. У першому випадку до складу пошукової апаратури входить джерело зондувального (сканувального) поля, у другому – його немає, тому що використовуються

*E-mail: esap@ukr.net

фізичні поля об'єктів пошуку або аномалії магнітного поля Землі. Для локації можна використовувати різноманітні фізичні поля, зокрема чотири основних – електромагнітні, слабкі, ядерні та гравітаційні.

Основні методи виявлення об'єктів:

- Механічний
- Сейсмічний
- Оптичний
- Теплолокаційний
- Біофізичний
- Газоаналітичний
- Електромагнітний:
 - електричний контактний;
 - магнітометричний;
 - індукційний;
 - радіохвильовий;
 - радіолокаційний.

Метод механічного зондування ґрунту реалізується за допомогою щупів – зондів. Такі щупи є в більшості комплектів армійських міношукачів, як вітчизняних, так і зарубіжних. Останнім часом ці щупи стали робити з непровідних матеріалів (склопластику та ін.) – з метою виключення підриву сапера на міні-пастці з електричним контактним замикачем.

Можливість використання акустичного і сейсмічного методів заснована на наявності контрасту в механічних характеристиках (щільності і твердості) між матеріалом об'єкта пошуку і середовищем. Ці методи засновані на реєстрації сейсмоакустичних сигналів, що відбиваються від об'єктів пошуку в діапазоні звукових та інфразвукових частот.

Оптичне видиме випромінювання (0,4–0,76 мкм) переважно (крім чистої річкової або морської води) не проникає в середовище. Однак, виявляти прихований об'єкт можна за непрямыми ознаками – порушення структури природного фону навколишнього середовища в місці встановлення цього об'єкта (колір рослинності або ґрунту, мікрорельєфу тощо). Фізично тут реалізується, як правило, контраст у коефіцієнтах відображення окремих хвиль оптичного випромінювання Сонця або штучного підсвічування (елементами фону). Можливі методи пошуку при цьому: візуальний (зокрема оптичними засобами), багатоспектральний, фотографічний (аерофотографічний), телевізійний, лазерний.

Наприклад, для виявлення вибухових і підслуховувальних пристроїв (“жучків”), встановлених у будівельних конструкціях (мости, стіни, стелі офісів тощо), використовуються світлофільтри. Спостереженням через світлофільтри можна відрізнити нове забарвлення місця встановлення небажаного об'єкта (міни, “жучка”) від старого, якщо навіть нове забарвлення за своїм кольором збігається зі старим, але складене з інших фарбувальних речовин.

Більш ефективна реалізація оптичного методу аерофотозніманням. Об'єкт розпізнається за його геометричним обрисом. Геометричні обриси

прихованих під землею об'єктів (трубопроводів, кабельних ліній та ін.) можна встановити з повітря за характером рослинності над ними, станом ґрунту та невеликими змінами в рельєфі. Аерофотознімання найбільш ефективно в разі пошуку великих об'єктів, що мають характерну геометрію. Спектрозональне аерофотознімання часто дає змогу виявляти об'єкти, невидимі на звичайних аерофотознімках.

Однак, якщо малорозмірний об'єкт перебуває в середовищі на великій глибині або місце його встановлення ретельно замасковано – то використання оптичного методу часто малоефективне.

Варто зазначити, що оптичні методи безпосереднього виявлення боєприпасів мають свою нішу застосування. Встановлення прихованих мін потребує часу і відповідної кваліфікації персоналу, тоді як встановлення мін на поверхні можна автоматизувати, використовуючи роботизовані комплекси, також поява вибухонебезпечних предметів може бути результатом застосування касетних боєприпасів, і згадані види озброєнь під час війни дедалі ширше використовують.

У контексті оптичного виявлення об'єктів не можна оминати методи машинного навчання. Машинне навчання в його широкому сенсі може застосовуватися для аналізу інформації різного фізичного походження, не тільки оптичного, а й теплового і електромагнітного. (Popov et al., 2022) Найчастіше такі методи полягають в автоматичному виявленні аномалій, що можуть бути ознакою присутності вибухонебезпечних предметів. Деякі методи дають змогу отримати уявлення про розмір об'єкта. Глибоке ж навчання, тобто те, що відбувається у штучних нейронних мережах, особливо широко застосовується саме в оптичному виявленні мін і нерозірваних боєприпасів і дає змогу не тільки виявити видимий небезпечний предмет, а й із заданою точністю ідентифікувати його тип. Загальновідомо, що глибоке навчання потребує значної кількості даних для тренування нейронних мереж, а у випадку із мінами і боєприпасами збір достатньої кількості таких даних є окремим викликом. (Saprykin, 2024). Однак, варто зазначити, що дрібні риси зображень, що використовуються неймережами для виявлення штучних об'єктів на природному тлі, не є специфічними для вибухових пристроїв. Також сприятливою для розробників є обставина, яка у решті випадків справедливо вважається джерелом підвищеної безпеки. Йдеться про практику створення боєприпасів, схожих на звичні для людей предмети, що створює значну небезпеку, зокрема, для дітей у колишніх зонах конфліктів. Отже, для навчання нейронних мереж можуть бути використані загальнодоступні набори зображень побутових предметів, а кінцеве донавчання може бути виконане на обмеженому обсязі зображень боєприпасів. У результаті можна отримати навчені мережі, що виявляють боєприпаси із прийнятним рівнем достовірності, щоправда маючи і певний рівень хибних

тривог, передусім при спробах виявляти предмети малого розміру на межі чутливості мереж.

При встановленні будь-якого об'єкта в навколишнє середовище неминуче з'являється порушення його структури, насамперед у щільності навіть за найретельнішого маскування. Виникає відмінність у ступені теплового випромінювання маскувального шару, розташованого над об'єктом пошуку та іншого природного тла.

Основними недоліками теплового методу, що ускладнюють його широке використання для виявлення малорозмірних об'єктів штучного походження, є:

- значна кількість перешкод через неоднорідність верхнього шару ґрунту та рослинності;
- наявність порівняно великого проміжку часу протягом доби (до 6–8 годин), в якому тепловий контраст між місцем встановлення заглибленого об'єкта і тлом відсутній;
- дорожняча тепловізійної апаратури. Вартість "чутливих" зразків становить десятки тисяч доларів США.

Сутність біофізичного ефекту полягає в тому, що в руках деяких осіб відрізок вигнутого металевго дроту, роздвоєна гілка або інший індикатор поблизу підземних аномалій (залягання руд, порожнин, підземних вод та ін.) відхиляється або обертається. Однак, природа цього ефекту дотепер точно не встановлена. Основна сучасна робоча гіпотеза пояснює ефект як реакцію людини (оператора) на просторові градієнти природного електромагнітного поля, пов'язані з наявністю підземних аномалій.

Вибуховий пристрій містить, як правило, від кількох десятків грамів до кількох кілограмів вибухової речовини. Тому вибуховий пристрій можна виявити шляхом реєстрації газоподібних випарів продуктів повільного розкладання або випаровування вибухової речовини. Реєстрація може здійснюватися за допомогою хімічного, мас-спектрометричного та інших способів. Концентрація парів вибухівки досягає 10^{-7} – 10^{-8} г/л біля поверхні ґрунту над місцем установлення протитанкової міни (при позитивній температурі), що знаходиться на глибині 5 см. Без маскувального шару концентрація парів вибухової речовини може бути на кілька порядків вище. Відомий портативний детектор ЕД-70 (США), призначений для контролю багажу пасажирів, здійснює газовий аналіз повітря за допомогою детектора електронного захоплення. Як джерело електронів використовується нікель-63.

Слід зазначити, що нині найкращим детектором вибухової речовини є собачий ніс. Спеціально навчені собаки мінно-розшукової служби здатні вибірково виявляти дуже малі кількості вибухівки. Ефективність пошуку залежить від стану собаки, вона має постійно тренуватися. Пропуски в роботі або тренуванні більше 1–2 місяців неприпустимі. При високій температурі (понад +25–30°C) собаки здатні працювати не більше

30–40 хвилин, а потім потрібен відпочинок у тіні як мінімум протягом 1–2 годин. Бажано, щоб під час пошуку собаку не відволікали.

Контактні електричні методи виявлення об'єктів у ґрунті широко використовуються в електророзвідці корисних копалин з початку 20-х років ХХ ст. Сутність цих методів полягає у фіксації спотворень зовнішнього електричного або магнітного полів, що виникають при обтіканні струмом об'єкта пошуку, що знаходиться у ґрунті. Зовнішнє поле створюють за допомогою металевих електропроводів, що мають електричний контакт із ґрунтом. Для виявлення малорозмірних об'єктів у ґрунті доцільно використовувати метод опору. При цьому вимірюється опір масиву ґрунту між металевими зондами. Аномальна, порівняно із сусідніми ділянками, величина опору між зондами вказує на наявність об'єкта з аномально малим чи великим значенням питомого опору. Перший випадок характерний, наприклад, для великого металевго об'єкта, другий – для об'єкта, що погано проводить струм (дерев'яної бочки, скрині або просто великої порожнечі у ґрунті).

Електричний контактний метод дуже трудомісткий. Механізувати пересування зондів важко, жорстке кріплення їх на рамі неможливе, бо потрібний різний механічний тиск на зонди для правильного занурення їх у ґрунт.

Магнітометричний метод дає змогу зафіксувати просторове спотворення магнітного поля Землі, яке створюється феромагнітним об'єктом пошуку. Виявити діелектричні (пластмасові, дерев'яні тощо), а також діамагнітні (дюралюміній, золото, срібло, бронза тощо) об'єкти за цим методом неможливо. Однак, виявити локальні феромагнітні об'єкти (з чавуну, сталі, залізонікелевих сплавів та ін.) можна практично в будь-яких природних середовищах (глинистих і піщаних ґрунтах, прісній і морській воді, льодах тощо) на значних глибинах. Наприклад, стрілецька і холодна зброя, авіабомби, що не вибухнули і артилерійські снаряди, більшість інженерних протитанкових, протицесантних і протипіхотних мін, сталеві нафто- і газопроводи і т. ін.). Водночас, використання переносної апаратури на основі цього методу всередині або поблизу сучасних споруд (будівель, мостів, аеродромних покриттів і т. ін.) утруднене через вплив сталевих елементів їх конструкцій (арматури, балок, труб тощо).

Індукційний метод широко використовується для виявлення рукотворних об'єктів, які виконані з металу або мають окремі металеві елементи у своїй конструкції. Причому метал може бути як феромагнітним, так і діамагнітним.

Індукційний метод виявлення металевих тіл заснований на реєстрації вторинних полів вихрових струмів, що виникають у цих тілах під впливом первинного низькочастотного магнітного поля. Первинне магнітне поле створюється за допомогою котушок, що живляться змінним струмом. Вихрові струми залежать від сили струму збуджувальної

(генераторної) котушки, його частоти та конфігурації тіла (об'єкта пошуку).

В автогенераторних металошукачах використовується ефект зміни індуктивності пошукової котушки при наближенні її до металевго об'єкта пошуку. Фізично цей ефект обумовлений наявністю вторинного магнітного поля. Зміна індуктивності призводить до зміни частоти автогенератора, що реєструється.

Однією з основних причин, що перешкоджають збільшенню чутливості індукційних пошукових систем, є вплив некомпенсованого первинного сигналу, що заважає. В усіх індукційних шукачах джерело первинного магнітного поля не має явно вираженої спрямованості випромінювання. У цих шукачах магнітоприймач знаходиться в сильному первинному полі. Тому навіть невеликі взаємні переміщення джерела і приймача поля, що виникають через механічну нестабільність пошукової системи, викликають появу значного сигналу розкомпенсації, що знижує чутливість всього шукача.

Значно збільшити чутливість індукційної пошукової системи можна, використовуючи джерело поля, що створює зону мінімуму первинного магнітного поля в місці розташування магнітоприймача.

При опроміненні напівпровідних середовищ електромагнітним полем високої частоти, будь-які неоднорідності (порожнечі, металеві та пластмасові предмети), розміри яких можна порівняти з довжиною хвилі, будуть розсіювати це поле. Частина відбитої енергії може бути зафіксована приймальним пристроєм шукача. Фактично радіохвильовий метод є окремим випадком широко відомого радіолокаційного методу виявлення об'єктів. Основна відмінність полягає в тому, що в радіохвильовому методі відстань до об'єкта пошуку порівнянна з робочою довжиною хвилі електромагнітного поля. Процес виявлення відбувається на невеликих відстанях у ближній або проміжній зоні випромінювання передавальної антени шукача. Радіохвильовий метод використовується також для виявлення інженерних мін, що мають неметалеві корпуси (пластмасові, дерев'яні та ін.). Виявлення таких мін індукційними міношукачами утруднено.

Радіохвильовий метод виявлення неметалічних об'єктів базується на реєстрації відмінностей діелектричної проникності між об'єктом пошуку (міною) і ґрунтом. При падінні радіохвиль на поверхню розділу двох діелектриків частина енергії буде відображатися в зворотному напрямку, інша частина – проникати всередину іншого діелектрика. Радіохвильові та двоканальні міношукачі забезпечують виявлення інженерних мін, встановлених у ґрунті на глибині до 10 см.

Радіолокаційний метод є одним з найбільш перспективних з усіх відомих методів виявлення малорозмірних рукотворних об'єктів. Це пояснюється, насамперед, можливістю дистанційно виявляти і розпізнавати об'єкти незалежно від метеумов і природного освітлення землі. Крім того,

висоочастотні зондувальні електромагнітні поля мають проникну здатність через напівпровідні середовища (ґрунт, рослинність, сніг, воду), під якими можуть знаходитися об'єкти пошуку (Смольков О. Ю. та ін., 2020).

Методи виявлення мін

Демаскувальні ознаки мін та вибухових пристроїв обумовлені низкою факторів. Основні фактори, які є практично завжди:

- наявність вибухової речовини;
- наявність локально розташованої маси металу (навіть у так званих “неметалевих” мінах є до 0,1 г алюмінію);
- характерна форма міни;
- неоднорідності середовища (порушення поверхні ґрунту, дорожнього покриття, стіни будівлі, порушення кольору рослинності або снігового покриву та ін.).

Додаткові фактори, що демаскують, які можуть бути не завжди:

- наявність провідної лінії управління;
- наявність годинникового механізму чи електронного таймера;
- наявність сейсмічного, магнітного чи оптичного датчика цілі;
- наявність антени з радіоприймачем.

Отже, міна може виявлятися в основному за рахунок трьох факторів:

- наявності зосередженої маси вибухівки;
- характерної конструкції міни (форми, матеріалу корпусу тощо);
- порушення однорідності навколишнього фону (колір рослинності, щільності ґрунту та ін.).

Міни і вибухові пристрої розміщуються, як правило, в середовищах. Середовищами можуть бути:

- ґрунти різного складу та вологості (найбільш типовий випадок);
- прісна вода річок та озер;
- морська вода;
- рослинність;
- сніг, лід;
- будівельні матеріали (цегла, бетон тощо)

Вважається, що виявлення мін ведеться за двома напрямками:

- пошук окремих мін (характерні відстані тут від кількох сантиметрів до кількох метрів);
- розвідка мінних полів (характерні дальності від десятків метрів до кількох кілометрів).

В ідеалі бажано виявляти окрему міну на безпечній відстані (не менше ніж 70–100 метрів від сапера). Розвідку мінних полів бажано вести у будь-який час доби і в будь-яких метеумовах з повітря із швидкостями носія від десятків до сотень км/год. (Молочко С. М. та ін., 2021).

При виявленні міни головна проблема полягає в розпізнаванні корисного сигналу (від міни) на тлі

численних перешкод від неоднорідностей навколишнього середовища та різних завад.

Нині широко застосовуються такі методи: електромагнітні (індукційний, радіохвильовий, магнітометричний, нелінійний), ядерно-фізичні, тепलोкаційний і механічний (механічного зондування). Саме вони дають змогу створити польові технічні засоби, придатні для гуманітарного розмінування. Тут головне – це питання безпеки та зниження витрат на розмінування. Інші вимоги: кліматичні, щодо ефективності роботи в темний час доби, стійкості до ударних впливів, електромагнітної сумісності та ін. – менш жорсткі, ніж для військових міношукачів.

Для підвищення ефективності виявлення мін доцільно комплексувати різні методи пошуку в одному технічному засобі.

Один з нових перспективних методів виявлення мін – це параметричний. Він заснований на реєстрації взаємодії збуджувального (силового) та зондувального (інформаційного) фізичних полів, на об'єктах пошуку штучного походження (мінах). Поєднання цих полів може бути різним.

У світі є багато засобів, що застосовуються у військовій інженерній справі, які називають засобами інженерного озброєння. Застосування того чи іншого приладу залежить від багатьох чинників, одним з яких може бути тип вибухонебезпечного предмета, глибина залягання, їх кількість, наявність природних та штучних перешкод. Проаналізувавши вітчизняні та іноземні міношукачі і металодетектори з метою їх використання для пошуку мін квадрокоптерами (дронами) (Рис. 1), дійшли висновку, що для роботи найбільш доцільно використовувати пошукові рамки. Крім цього, необхідно додатково мати на рамці (коптері) засоби (форсунки з білою та червоною фарбою), які будуть забезпечувати маркування безпечної зони та відмічати місце знаходження мін, а також інформувати оператора про це.








Рис. 1. Дрон, обладнаний металошукачем

Для якісної розвідки найкраще мати на квадрокоптері багатоспектральну та тепловізійну апаратуру з відображенням смуги пошуку на екрані оператора.

Деякі характеристики вітчизняних та закордонних міношукачів та металодетекторів з пошуковими рамками наведені в Табл. 1 (Ментус І. Е., Ясько В. А., 2024).

Таблиця 1. Деякі характеристики вітчизняних та закордонних міношукачів та металодетекторів з пошуковими рамками

Назва	Розмір пошукового елемента	Глибина пошуку	Розмір об'єкта
Міношукач ImPULS T3 Цей міношукач призначений для встановлення на транспортний засіб	Пошукова рамка розміром від 2.4 до 7 м	До 3 м	Встановлення рамки на висоті 15–20 см – реагує на дрібні цілі, включаючи і гранату. Встановлюється на висоті 40–60 см – реагує на крупні цілі, як ТМ 62, максимально ігнорує дрібні та середнього розміру металеві цілі
Глибинний металошукач Clone PI-W (Клон ПВ)	Пошукова рамка розміром 40x60 см	До 3 м	Фляга – 85 см; сокира – 95 см; бочка – 180 см
Глибинний металошукач Коцій-51Г Рамка 45 на 45 см		До 1 м	Каска військава
Рамка 60 на 60 см		До 3 м	Каска військава – 115 см
Рамка 120 на 120 см		До 4 м	Каска військава – 150 см Бочка 200 л – 2,5 м
Рамка 150 на 150 см		До 5 м	Каска військава – 170 см Бочка 200 л – 2,9 м
Металодетектор Vallon VMX10 Активна пошукова котушка 2x1 м або 2x2 м		До 5 м	Підходить для пошуку відносно великих металевих частин усіх видів (таких як боєприпаси, що не вибухнули, суббоєприпаси тощо) на великій глибині

Назва	Розмір пошукового елемента	Глибина пошуку	Розмір об'єкта
Металошукач з великою петлею Ebinger UPEX 740 M	Пошукова котушка ø2.55 м	До 5 м	Підходить для пошуку відносно великих металевих частин
Металодетектор Foerster METEX 4.250	Рамка – 1055x1055x67 мм	До 3,3 м	Підходить для пошуку відносно великих металевих частин

Висновки

Проблема знешкодження та знищення протипіхотних та протитанкових мін має глобальний характер, але найбільш болюче це питання стоїть в Україні. Невирішеним лишається питання пошуку малогабаритних, фугасних неметалевих протипіхотних мін.

Для розв'язання проблеми необхідно створювати новітні засоби пошуку мін, які будуть об'єднувати декілька незалежних каналів виявлення з єдиним блоком обробки сигналів та засобами маркування обстеженої території.

У зв'язку з розвитком безпілотних літальних апаратів на сьогодні все більшої актуальності набуває ідея щодо їх застосування для ведення розвідки мінної обстановки, виявлення мін і дистанційного їх знищення.

Література

- Кириленко, В. А., Нероба, В. Р. (2019). Глобальна проблема розмінування: стан та підходи до розв'язання. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняховського*, 2(66). Взято з http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Znpcvsd_2019_2_19.
- Смольков, О. Ю., Коцюрба, В. І., Гунбін, К. Ю. (2020). Науково-методичний підхід щодо обґрунтування вимог до дистанційно-керованих радіолокаційних комплексів виявлення вибухових пристроїв з неконтактними датчиками цілі. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, 4(41), 145–150.
- Молочко, С. М., Башинський, В. Г., Каламурза, О. Г., Журахов, В. А. (2021). Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на БПЛА. *Збірник наукових праць державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, 2(8), 89.

METHODS OF MINE DETECTION FOR HUMANITARIAN DEMINING: SERVEY

I. E. Mentus¹, V. A. Jasko¹, I. Y. Saprykin²

¹ Kamianets-Podilskyi Ivan Ohienko National University, Ogienska str., 61, Kamianets-Podilskyi, Khmelnytskyi region, 32301, Ukraine

² State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine", Olesia Honchara Str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine

The international community is increasingly aware of the scale and severity of the problems posed by landmines and explosive remnants

Ментус, І. Е., Ясько, В. А. (2024). *Міношукачі та металодетектори*. Довідник. Кам'янець-Подільськ: Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка.

Popov, M. O., Stankevich, S. A., Mosov, S. P., Titarenko, O. V., Dugin, S. S., Golubov, S. I., Andreiev, A. A. (2022). Method for minefields mapping by imagery from unmanned aerial vehicle. *Advances in Military Technology*, 17(2), 211–229. doi: 10.3849/aimt.01722.

Saprykin, I. Y. (2024). Optical deep learning landmine detection based on limited dataset of aerial imagery. *Science-based technologies*, 62(2). DOI: 10.18372/2310-5461.62.18708.

References

- Kyrylenko, V. A., Neroba, V. R. (2019) Ghlobaljna problema rozminuvannja: stan ta pidkhody do rozv'jazannja. [The global problem of mine clearance: status and approaches to solving] *Collection of scientific works of the Center for Military and Strategic Studies of the National Defense University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky*, 2(66) Retrieved from http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=Znpcvsd_2019_2_19 (in Ukrainian).
- Smolkov, O. Y., Kotsiurba, V. I., Hunbin, K. Y. (2020) Naukovometodychnyj pidkhid shhodo obgruntuвання vymoĝ do dystancijno-kerovanykh radiolokacijnykh kompleksiv vyjavlennja vybukhovykh prystrojiv z nekontaktnymy datchykamy cili. [Scientific and methodological approach to substantiation of requirements for remote-controlled radar complexes for detection of explosive examples with non-contact target sensors] *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine: online scientific professional edition*, 4(41), 145–150 (in Ukrainian).
- Molochko, S. M., Bashynskiy, V. Gh., Kalamurza, O. Gh., Zhurakhov, V. A. (2021) Analiz suchasnogho stanu, kharakterystyk ta perspektiv rozvytku datchykyv vyjavlennja vybukhonebezpechnykh predmetiv, vstanovlenykh na BPLA. [Analysis of the current state, characteristics and prospects of development of explosive ordnance detection sensors mounted on unmanned aerial systems] *Collection of scientific works of the State Research Institute of Testing and Certification of Weapons and Military Equipment*, 2(8), 89 (in Ukrainian).
- Mentus I.E., Jasko V.A. (2024) *Minoshukachi ta metalodetektory*. *Dovidnyk*. [Mine detectors and metal detectors. Directory] Kamianets-Podilskyi Ivan Ohienko National University (in Ukrainian).
- Popov, M. O., Stankevich, S. A., Mosov, S. P., Titarenko, O. V., Dugin, S. S., Golubov, S. I., Andreiev, A. A. (2022). Method for minefields mapping by imagery from unmanned aerial vehicle. *Advances in Military Technology*, 17(2), 211–229. doi: 10.3849/aimt.01722.
- Saprykin, I. Y. (2024). Optical deep learning landmine detection based on limited dataset of aerial imagery. *Science-based technologies*, 62(2). DOI: 10.18372/2310-5461.62.18708.

of war, including unexploded ordnance, and agrees that it is a global problem that requires a concerted response. At the same time, there are still no mine detection methods that would ensure 100% efficiency and meet all the criteria applied to humanitarian demining. The existing methods differ significantly in terms of such parameters as operator safety, productivity, economic efficiency, and versatility. Much attention has recently been paid to remote mine detection methods using UAVs. Their progress is due to the rapid development of UAVs themselves, portable sensors, as well as data analysis methods. Despite the significant progress in research in recent years, remote methods have not yet been put into operation and most of them are at the stage of research at test sites. The situation is a little better with ground robotic platforms. The results of the work of different groups of researchers have not been unified, and no unified approaches to the verification of methods have been developed. The presence of research directions that are different in principle and physical nature of signals does not always allow their participants to be aware of the latest achievements in related fields, because tracking the development of all directions of research is quite a difficult task. At the same time, only the combination of several methods with different physical principles makes possible the emergence of a truly reliable and universal method. But in order to prove the concept of combining methods with different physical principles from an idea to a practical implementation, researchers need a thorough understanding of each of the methods to be combined. Methods that were not previously considered promising can receive a new impetus for development thanks to the appearance of improved sensors. Therefore, reviews are needed that will reveal the available methods in their diversity, will provide a basic understanding of the physical principles underlying them, and at the same time will not be overloaded with unnecessary details. This is the goal of this article.

Keywords: explosive objects, methods of detecting explosive objects, magnetometer, metal detector.

Рукопис статті отримано: 16.09.2024

Надходження остаточної версії: 20.09.2024

Публікація статті: 30.09.2024