
ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 623.3

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.18>

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ МІН ЗА ЇХ ТЕПЛОВИМ СЛІДОМ

Ларьков С.М.¹, Васишин Ю.Б.¹, Мариношенко О.П.¹, Шевченко О.В.², Піскун О.М.³

¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

пр. Берестейський, 37, 03056, м. Київ

²Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

вул. Іоанна Павла II, 17, 01042, м. Київ

³Національний центр управління та випробувань космічних засобів

вул. Князів Острозьких, 8, 02000, м. Київ

sergelarkov@ukr.net, jura265@gmail.com, shev19761976@gmail.com,

a_marin@ukr.net, piskun@nkau.gov.ua

Констатовано, що у світовій практиці по закінченню активних бойових дій залишаються значні території, забруднені вибухонебезпечними предметами, спостерігається тенденція збільшення площ замінованих територій: за орієнтовними оцінками станом на сьогодні не розміновано до 100 мільйонів мін в 68 країнах світу. З урахуванням даних щодо вартості мінування та розмінування, що різняться приблизно на порядок, зроблено висновок щодо необхідності формування дешевої та високоефективної системи виявлення наявності мін. Оскільки основними жертвами залишків мін та нерозірваних снарядів є цивільні особи, зокрема й діти. Як наслідок неспровокованої агресії російської федерації проти України, наша країна стала однією з найбільш замінованих країн світу, випередивши Сирію та Афганістан. Наголошено на актуальності гуманітарного розмінування та важливості задач з виявлення вибухонебезпечних предметів для післявоєнного відновлення України.

Висвітлена класифікація мін та інших вибухонебезпечних предметів за їх походженням, окреслені особливості технологій визначення мін та інших під-поверхневих об'єктів за їхніми фізичними ознаками. Наголошено на проблемі відсутності технологій, що забезпечують потрібну вірогідність виявлення мін із задовільним рівнем хибних спрацювань. Зазначено, що комп'ютеризована обробка даних сенсорів, які працюють на різних фізичних принципах, може істотно допомогти на шляху створення недорогих методів виявлення мін. Розглянуті основні сучасні рішення з технологій та сенсорів виявлення мін, актуалізована необхідність їх інтеграції у напрямку вирішення завдань із визначення місць розташування мін та якості розмінування.

Вивчені основні ознаки мін та зроблені висновки щодо можливості визначення місць закладення мін на невеликій глибині під поверхню землі за ознаками теплових аномалій, що проявляються при добових змінах температур внаслідок відмінності теплофізичних характеристик вибухових речовин від ґрунтів. Відмінність теплофізичних характеристик мін та навколишнього ґрунту призводить до появи «теплого сліду» на поверхні, що може бути зафіксований тепловізійною камерою в діапазоні довжин хвиль 8–12 мкм.

Для перевірки гіпотези було виготовлено імітатор міни з теплофізичними характеристиками, подібним до теплофізичних характеристик тротилу, та проведено експеримент з визначення можливості детектування теплового сліду тепловізором з мікроболометричною матрицею та температурним еквівалентом шуму NETD=50 мК. Визначено, що за сприятливих умов різниця температур на поверхні Землі достатня для виявлення підповерхневого об'єкта, а також продемонстровано, що тонкостінні металеві конструкції (корпуси, уламки, сміття) не дають хибних спрацювань. Розроблено пропозиції щодо побудови системи виявлення мін на основі аналізу теплових знімків, отриманих з використанням БПЛА в якості носія тепловізора. Означені вимоги до технічних показників тепловізора та окреслені основні характеристики продуктивності запропонованої системи. *Ключові слова:* виявлення мін, тепловий слід, тепловізор, безпілотний літальний апарат

Assessment of the landmine detection possibility based on its thermal tracks. Larkov S., Vasylyshyn Yu., Shevchenko O., Marinoshenko O., Piskun O.

It was established that after the end of active hostilities, significant territories remained contaminated by explosive objects. The general global trend has become an increase in the area of mined territories: according to preliminary estimates, up to 100 million mines are undetected in 68 countries of the world. Taking into account the information about the cost of mining and demining, which differ by about an order of magnitude, a conclusion about the need for a cheap and highly efficient system for detecting the presence of mines was made. Since the main victims of the mines and unexploded ordnance are civilians, primarily children, and in the course of the unprovoked aggression of the Russian Federation, Ukraine became one of the most mined countries in the world, ahead of Syria and Afghanistan, a conclusion about the relevance of humanitarian demining and the importance of the task of finding explosive objects for post-war reconstruction of Ukraine was made.

The classification of mines and other explosive objects according to their origin is presented, the possibilities of technologies for identifying mines and other subsurface objects based on their physical characteristics are evaluated. It was concluded that there are no

technologies that provide the required probability of detecting mines with a satisfactory level of false positives. It is considered that computerized data processing of multiple sensors that work on different physical principles can provide the creation of inexpensive mine detection methods. The basic solutions for mine detection technologies and sensors were reviewed, and a conclusion was made about the need to integrate basic solutions to solve the problems of determining the locations of mines and the quality of delineation.

The main signs of mines were analyzed and a conclusion was made about the possibility of determining the places of laying mines at a shallow depth below the surface of the earth by signs of thermal anomalies, which are manifested during temperature changes due to the difference in thermophysical characteristics of explosives from soils. The difference in thermophysical characteristics of mines and the surrounding soil leads to the appearance of a «thermal trail» on the surface, which can be recorded by a thermal imaging camera in the wavelength range of 8–12 micrometers.

To test the hypothesis, a mine simulator with thermophysical characteristics similar to the thermophysical characteristics of TNT was manufactured, and an experiment was conducted to determine the possibility of detecting a thermal trace with a thermal imager with a microbolometric matrix and a temperature equivalent of noise NETD=50 mK. It was determined that, under favorable conditions, the temperature difference on the surface of the earth is sufficient to detect a subsurface object, and it was also demonstrated that thin-walled metal structures (hulls, debris, debris) do not give false positives. Proposals have been developed for the construction of a mine detection system based on the analysis of thermal images obtained using a UAV as a thermal imager carrier. The requirements for the characteristics of the thermal imager were determined and the main performance characteristics of the proposed system were evaluated. *Key words:* landmine detection, thermal track, thermal imager, unmanned aerial vehicle.

Постановка проблеми. Актуальність проблеми розмінування територій після закінчення бойових дій постійно підвищується, що обумовлено як розвитком засобів збройної боротьби, особливо в напрямках техніки дистанційного мінування, так і підвищенням інтенсивності бойових дій в ході збройних конфліктів.

За оцінками Міжнародного Комітету Червоного Хреста до 2010 року [1], кількість жертв щорічно від мін перевищує 26 000 осіб, з них щомісяця гине близько 800 осіб і 1200 отримує каліцтва різної тяжкості. Основними жертвами при цьому стають цивільні особи, серед яких особливо страждають діти. За оцінками Департаменту ООН з гуманітарних питань [2] станом на 2014 рік понад 100 мільйонів мін були розкидані в 68 країнах, при цьому щорічні темпи розмінування набагато повільніші утворення нових замінувань.

На теперішній час Україна стала найбільш замінованою країною в світі та випередила такі країни, як Сирія та Афганістан. Внаслідок високої інтенсивності бойових дій, широкому застосуванню засобів дистанційного мінування потенційно замінованими в Україні є близько 30% території держави [3] – близько 174 тисяч квадратних кілометрів, що більше площі території Греції або половини площі території Германії. Окрім загрози для життя та здоров'я людей, важливим наслідком замінування є позбавлення доступу до земельних ресурсів. Також суспільно важливими є медичні, соціальні та екологічні наслідки.

Актуальність дослідження. Варто зазначити, що більша частина вибухонебезпечних предметів виявляється в ході стандартизованих процедур по розмінуванню, які виконуються переважно ручним способом з використанням індукційних міношукачів та щупів [4]. Серед вибухонебезпечних предметів на територіях бойових дій найбільш поширеними є протипіхотні міни, адже вони є ефективним, легким у виготовленні та встановленні засобом запобігання пересування військових підрозділів. Собівартість протипіхотної міни становить від 3 до 30 дола-

рів США, а з урахуванням вартості знешкодження однієї міни, що коливається в межах 300–1000 доларів США (залежить від площі замінованої території і кількості хибних спрацювань обладнання по виявленню мін [1]) розмінування є на порядок більш вартісною процедурою, ніж встановлення мінних полів.

Таким чином, розмінування території України традиційними методами вимагає значних фінансових ресурсів та тривалого часу, а тому питання розвитку технологій виявлення підповерхневих об'єктів на різних фізичних принципах та забезпечення прискорення розмінування територій України є однією з пріоритетних науково-практичних задач.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Під час досліджень авторами закладені теоретичні основи виявлення мін за множиною їх ознак, що сприймаються сенсорами, що працюють на різних фізичних принципах. Проведено експериментальну перевірку можливості виявлення підповерхневих об'єктів та сформульовано вимоги до тепловізійної камери та її носія як складової частини системи виявлення мін та нерозірваних снарядів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Після закінчення активної фази бойових дій та первинного розмінування військовими саперами на територіях залишається значна кількість вибухонебезпечних предметів та речовин, які за їх походженням можливо класифікувати як:

а) залишені або загублені боєприпаси, набої та вибухові пристрої. Як правило такі об'єкти знаходяться в транспортному стані на поверхні;

б) неспрацьовані боєприпаси (артилерійські снаряди та міни, бомби, суббоєприпаси), що знаходяться у зведеному стані на значній глибині (до декількох метрів);

в) міни (протитанкові та протипіхотні), що налаштовані на спрацювання від датчику цілі, що знаходиться у зведеному стані. Як правило, міни знаходяться на глибині декількох сантиметрів або на поверхні (при постановці засобами дистанційного мінування).

До окремої категорії можуть бути віднесені мініпастки, які формуються у вигляді замінованих предметів (цінні речі, труп солдат і т. ін.) або замінованих приміщень. З урахуванням того, що такі види мінування виявляються та знешкоджуються військовими саперами [4], в якості предмету такі види мінування в цій статті не розглядаються.

Таким чином, перспективні технології виявлення вибухонебезпечних предметів мають бути орієнтованими на їх пошук в приповерхневих та заглиблених шарах ґрунту, а також безпосередньо на поверхні за ознаками, що можуть бути класифіковано у вигляді:

а) спотворення природного фону (пожухла трава, порушення шару ґрунту і т.ін.) в місці установки мін;

б) спотворення фізичних полів природного або штучного походження (наприклад електромагнітного поля індукційного датчику) корпусом міни або її вибуховою речовиною;

в) витоки хімічних речовин, характерних для вибухівки (наприклад, оксиди азоту).

Враховуючи, що корпуси мін тривалий час виготовлялися зі сталі, широке застосування отримали індукційні металощукачі для пошуку мін. Індукційні металощукачі забезпечують якісне виявлення мін в металевому корпусі, але виявлення сучасних мін з пластиковим корпусом за допомогою металощукачів, як правило, ускладнено. Також міни можуть знаходитися на місці тривалий час, внаслідок чого корпус та детонатор може проіржавіти, просочитись вологою або брудом, що також знижує вірогідність їх виявлення металощукачем. Крім того, пошук мін за допомогою індукційних металощукачів дає велику кількість хибних спрацьовувань на уламках та металевих фрагментах, що сповільнює швидкість виявлення до неприйнятно низького рівня. Таким чином, портативні ручні міношукачі є повільними і небезпечними для саперів. Так, за 2022–2024 роки в Україні, близько 20% від загальної кількості загиблих працівників ДСНС – це саме піротехніки і близько 40% отримали поранення [5].

Для безпечного використання території необхідно мати щонайменше 99,6% (стандарт Департаменту ООН з гуманітарних питань) успішного виявлення і знешкодження мін, і 100% на певній глибині відповідно до Міжнародних стандартів протимінної діяльності (IMAS) [6].

Наразі відсутні рішення, що забезпечують високу вірогідність виявлення мін при низькому рівні хибних спрацьовувань при різних типах ґрунту, різних погоді, для різних типів мін. Привабливою є ідея синтезу мультисенсорних рішень на основі обробки інформації від датчиків на різних фізичних принципах в комп'ютерних системах з застосуванням передових методів обробки сигналів. Кінцевою метою є створення системи, яка забезпечує виявлення і розпізнавання підповерхневих об'єктів для задач знешкодження вибухонебезпечних предметів.

Критично важливою функцією мультисенсорної обробки для рішення задач розмінування є здатність розрізняти уламки, каміння або предмети штучного походження від об'єкту пошуку за комплексом ознак в режимі реального часу. Об'єднання сенсорів з використанням методів м'яких обчислень, таких як нечітка логіка, нейронні мережі і теорія грубих множин створює перспективи розробки недорогих в обчислювальному плані методів об'єднання сенсорних даних.

Таким чином, для задач пошуку вибухонебезпечних предметів можуть бути застосовані датчики, що працюють на різних фізичних принципах, серед яких можливо приділити увагу наступних технологіям: металодетектори на принципі електромагнітної індукції, радіолокаційне та акустичне зондування, інфрачервона візуалізація та газоаналізатори (електронний ніс).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. В сучасних умовах під час розв'язання проблем розмінування території доводиться вирішувати декілька задач:

а) виявлення вибухонебезпечних об'єктів;

б) ідентифікація та класифікація вибухонебезпечних об'єктів;

в) знешкодження вибухонебезпечних об'єктів [7–11].

Кожна з цих задач вирішується принципово різними методами [11].

Для виявлення вибухонебезпечних об'єктів можуть бути використані наступні методи: метод електромагнітної індукції (металодетектори), метод рентгенівського випромінювання, метод гамма-випромінювання, газоаналітичний метод, магнітометричний метод, акустичний метод [9]. Слід зауважити, що магнітометричний та акустичний методи дозволяють не тільки виявляти вибухонебезпечні об'єкти, але й отримувати їхні зображення. Натомість ці зображення, як правило, є непридатними для чіткої ідентифікації типу боєприпасів внаслідок обмеженої роздільної здатності існуючих приладів. Крім того, магнітометричний метод не дозволяє виявляти боєприпаси з неметалевим корпусом. Такий же самий недолік притаманний методу електромагнітної індукції. Методи рентгенівського випромінювання та гамма-випромінювання дозволяють виявляти будь-які вибухонебезпечні об'єкти, але вони є малоефективними для виявлення мінних полів значної площини з використанням БПЛА [11]. Газоаналітичні методи відрізняються тим, що вони дозволяють встановлювати апаратуру для виявлення вибухівки (газові аналізатори) на компактні та малогабаритні БПЛА та виявляти за рахунок цього мінні поля значної площини. Сучасні газові аналізатори мають дуже високу чутливість та невелику вагу і здатні виявляти будь-який тип вибухівки [12].

Для ідентифікації та класифікації вибухонебезпечних об'єктів використовуються такі методи:

радіохвильовий метод, метод ультрафіолетового випромінювання, метод випромінювання у видимому спектрі, метод інфрачервоного випромінювання [7]. Радіохвильовий метод передбачає застосування георадарів, у тому числі мікрохвильових радарів, радіолокаторів підповерхневого зондування або підповерхневих радіолокаторів. Усі ці пристрої мають дуже невисоку дальність дії – не більше 1 метра, що унеможливило їхнє використання разом з БПЛА для ідентифікації боєприпасів на мінних полях значної площини [13], [14]. Метод реєстрації випромінювання в ультрафіолетовому та видимому спектрі дозволяє ідентифікувати лише ті вибухонебезпечні об'єкти, що знаходяться на поверхні ґрунту [7].

Керуючись рішеннями стосовно знешкодження вибухонебезпечних предметів, можна зробити висновок щодо необхідності тісної інтеграції систем виявлення вибухонебезпечних предметів як для виявлення місць розташування, так і для контролю якості розмінування.

Новизна. Використання реєстрації інфрачервоного випромінювання для ідентифікації вибухонебезпечних об'єктів базується на наявності різниці теплових характеристик між підповерхневими об'єктами та навколишнім ґрунтом, що призводить до різниці температур між підповерхневим об'єктом і ґрунтом. Цей температурний контраст вимірюється за допомогою термографічної камери, яка виявляє випромінювання в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру. Перевагами методу є те, що він пасивний, отже, не впливає на системи керування вибухонебезпечних об'єктів, які можуть спричинити вибух; також цей метод дозволяє підвищувати швидкість обстеження за допомогою використання БПЛА [15]. За певних умов зображення вибухонебезпечних об'єктів в інфрачервоному спектрі можуть мати високу контрастність, що у більшості випадків дозволяє здійснювати їхню надійну ідентифікацію [15]. Враховуючи суттєво відмінні теплофізичні характеристики вибухівки [16] та ґрунту [17], виявлення потенційних місць розташування підповерхневих об'єктів може бути забезпечено шляхом детектування їх теплового сліду на поверхні Землі в умовах зміни температури навколишнього середовища за рахунок реєстрації зображення в дальній ІЧ частині спектру (діапазон 8–14 мкм) [15].

Методологічне та загальнонаукове значення. У пропонованій методиці виявлення підповерхневих об'єктів за їх тепловим слідом розглянуто поєднання інформації від сенсорів, що реєструють поля різної фізичної природи, з комп'ютеризованою обробкою масивів даних по виявленню замаскованих та прихованих вибухонебезпечних об'єктів.

Методика має рекомендаційний характер та пропонується для застосування з урахуванням діючих нормативно-методичних документів по виявленню та знешкодженню вибухонебезпечних об'єктів Міністерства з надзвичайних ситуацій України.

Викладення основного матеріалу. Фізичною основою цього методу є різниця в теплофізичних властивостях вибухових речовин, матеріалів корпусу мін та ґрунту. Оскільки більша частина маси та об'єму міни займає вибухова речовина (ВР), порівняння теплофізичних параметрів ґрунту доцільно здійснювати саме з ВР, а враховуючи, що найбільш застосованою ВР на сьогодні є тринітротолуол/тротил/ТНТ з густиною $\rho_{ВР}=1663 \text{ кг/м}^3$, теплопровідністю $\lambda_{ВР}=0.23...0.26 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ та, відповідно, об'ємною теплоємністю $c_{ВР}=2.14...2.53 \text{ МДж/(К}\cdot\text{м}^3)$. Ці теплофізичні характеристики суттєво відрізняються від усереднених характеристик ґрунту: густиною $\rho_{Г}=1200 \text{ кг/м}^3$, теплопровідністю при вологості 20% буде дорівнювати $\lambda_{Г}=0.61 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ та об'ємною теплоємністю приблизно $c_{Г}=1.7 \text{ МДж/(К}\cdot\text{м}^3)$. З аналізу теплофізичних характеристик видно, що об'ємна теплоємність тротилу є щонайменше на 25% більша, ніж ґрунту, а коефіцієнт теплопровідності приблизно на 50% менше, що свідчить про те, що об'єкти з наповненням тротилом та ґрунт будуть мати різні швидкості нагріву та охолодження протягом доби. Ця різниця температур підповерхневого об'єкту та ґрунту має бути проявлена при невеликих глибинах встановлення, що характерно для протипіхотних мін, що дозволить ідентифікувати місцезонашування міни за різницею температур за допомогою тепловізійної камери. Додатковою перевагою цього методу є можливість детектування розташування мін в пластмасовому корпусі або безкорпусних (тобто з мінімальним вмістом металу) що дозволить ефективно доповнювати існуючі методи виявлення мін.

Для створення високопродуктивної системи виявлення мін за їх тепловим слідом доцільно розташування тепловізійної камери на носії, що забезпечує політ на відносно невеликій висоті (до 30...50 м) з розміром пікселя на місцевості, достатнім для детектування підповерхневих об'єктів з розміром від 50...100 мм. В якості носія вбачається безпілотний літальний апарат (БПЛА) мультикоптерного типу з обробкою отриманих тепловізійних знімків в напівавтоматичному або автоматичному режимі для виявлення потенційних місць розташування вибухонебезпечних об'єктів.

Побудову системи можливо вести на основі:

а) комерційно доступного БПЛА з ручним керуванням та польотом на висоті 10...15 м з використанням тепловізійної камери з NETD близько 50 мК (типу DJI Mavic 3T вартістю ~5 тис. \$), ширина смуги захвату складе близько 5 м на місцевості;

б) спеціально розробленого БПЛА з можливістю польоту в автоматичному режимі на висоті >50 м. В якості корисного навантаження пропонується тепловізійна камера з NETD <10–15 мК (з охолоджуваною матрицею), при цьому забезпечується суттєвий зріст продуктивності системи завдяки полосі захвату на місцевості близько 30 м.

Виготовлення теплового імітатору протипіхотної міни та дослідження його теплового сліду. В якості прототипу була вибрана міна типу ПМН (рис. 1).



Рис. 1. Зовнішній вигляд міни ПМН

Міна має габаритні розміри $\varnothing 110$ мм та висоту 53 мм, загальна маса – 550 г, оснащена тротиловою шашкою вагою 200 г.

Об'ємна теплоємність матеріалу може бути визначена як:

$$c_v = C \cdot \rho$$

де C – питома теплоємність, кДж/кг*К;

ρ – питома вага, кг/м³.

Оцінка об'ємної теплоємності матеріалів дає:

Таблиця 1

Теплофізичні характеристики матеріалів

Назва	ρ , кг/м ³	C , кДж/кг*К	c_v , кДж/м ³ *К
Тротил [16]	1.663	1.372	2281
Ґрунт [17]	1.92	1.093	2098
Парафін [16]	0.786	2.89	2276
Сталь	7.8	0.46	3437

Таким чином, для імітації міни типу ПМН необхідно виготовлення імітатору з матеріалу, який має приблизно рівну об'ємну теплоємність з теплоємністю тротилової шашки. В якості матеріалу було вибрано парафін та виготовлено імітатор тротилової шашки:

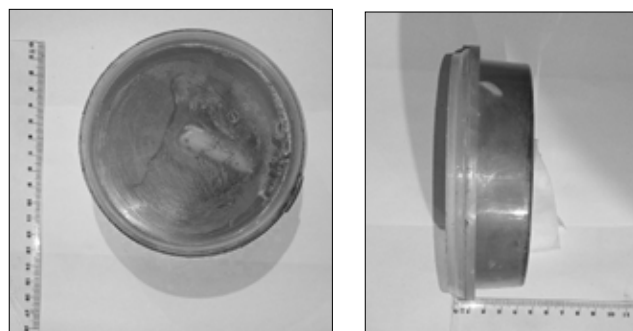


Рис. 2. Зовнішній вигляд імітатора

Для підтвердження теоретичних висновків щодо пошуку мін за їх тепловим слідом було здійснено експеримент з пошуком теплового сліду виготовленого імітатору міни шляхом використання тепловізійної камери Waveshare Thermal Imaging 80x62 USB Camera (рис. 3) з неохолоджуванним мікроболометричним сенсором.



Рис. 3. Тепловізійна камера Waveshare Thermal Imaging 80x62 USB Camera

Враховуючи невисокі параметри сенсору (шумовий еквівалент різниці температур NETD 150 мК RMS при частоті оновлення 1 Гц), а також приблизно в два рази меншу різницю в об'ємних теплоємностях пар «ґрунт-тротил» та «ґрунт-імітатор», експеримент проведено в часи найбільшого градієнту температур (близько 9:00 ранку та 20:00 ввечері).

Об'єкти заглиблені на глибину 1.5 см під поверхнею ґрунту, висота закріплення камери над поверхнею складала приблизно 0.5 м. Глибина об'єктів під землею дорівнює приблизно 1,5 см.

Для проведення експерименту використовувалися два об'єкти з різними тепловими характеристиками:

а) об'єкт № 1 – тонкостінний пустотілий сталевий об'єкт циліндричної форми з товщиною стінки 0.5 мм, діаметром 100 мм та висотою 50 мм.;

б) об'єкт № 2 – імітатор міни в пластмасовому корпусі з товщиною стінки 0.8 мм, заповнений парафіном, діаметром 140 мм та висотою 45 мм.

Результати зйомок об'єктів наведено на рис. 4 та рис. 5. Як видно з рисунків, запропонований метод забезпечує ефективне розрізнення підповерхневих об'єктів штучного походження з різних матеріалів, та демонструє нечутливість до сталевих зразків.

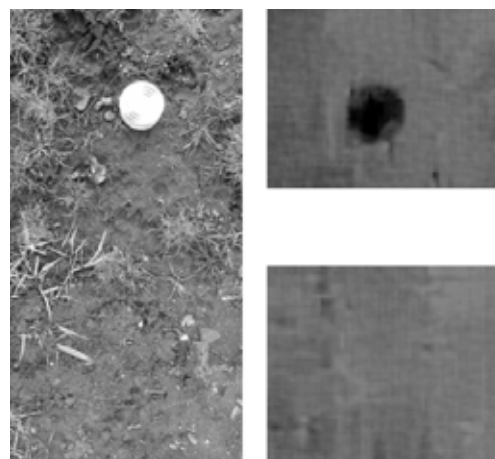


Рис. 4. Зйомки об'єкту № 1 (вверху – відкрите розташування, внизу – заглиблене)

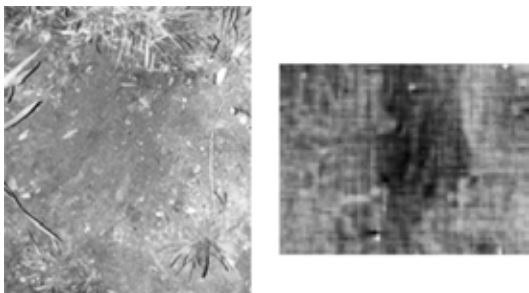


Рис. 5. Зйомки об'єкту № 2, заглиблене розташування

Проведений експеримент успішно підтвердив теоретичні висновки щодо можливості виявлення підповерхневих об'єктів за рахунок їх теплового сліду. На основі результатів проведеного експерименту можна зробити такі висновки:

а) в умовах добового перепаду температур тепловий слід від підповерхневих об'єктів типу шашок ВР

достатній для їх виявлення тепловізійними камерами з невисокими технічними характеристиками;

б) тонкостінні металеві об'єкти не заважають виявленню підповерхневих об'єктів;

в) завади від металевих поверхонь, що віддзеркалюють, в ІЧ та видимому діапазонах можуть бути відфільтровані при сумісній обробці зображень у видимому та ІЧ діапазонах.

Перспективи використання результатів дослідження. Проведена робота дає підстави для формування пропозицій щодо подальшого розвитку запропонованої технології у вигляді створення системи виявлення підповерхневих об'єктів з безпілотним літальним апаратом мультикоптерного типу, оснащеного тепловізором та високоточним навігаційним RTK (від англ. RTK (Real Time Kinematic – високоточне позиціонування у режимі реального часу) GNSS (англ. глобальні навігаційні супутникові системи) обладнанням, та засобів обробки зображень у видимому та ІЧ діапазоні.

Література

1. Landmine Monitor Report 2008 URL: <https://reliefweb.int/report/world/landmine-monitor-report-2008> (дата звернення 12/05/2024).
2. Habib MK. Humanitarian Demining: Reality and the Challenge of Technology – The State of the Arts. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2007; 4(2). doi: 10.5772/5699.
3. US Department of State (1994). Hidden Killers: The Global Landmine Crisis. Report to Congress, Washington D. C., Publication 10225, December 1994.
4. СОП 09.10/ДСНС «Порядок проведення органами та підрозділами цивільного захисту очищення (розмінування) територій, забруднених вибухонебезпечними предметами, ручним способом»: Офіційний текст. Київ: ДСНС, 2019. 78 с.
5. В Україні заміновано 30% території, на розмінування підуть десятки років – ДСНС URL: <https://suspilne.media/366982-v-ukraini-zaminovano-30-teritorii-na-rozminuvannya-pidut-desatki-rokiv-dsns/> (дата звернення 12/05/2024).
6. The International Mine Action Standards URL: <https://www.mineactionstandards.org/standards/> (дата звернення 12/05/2024).
7. Молочко С. М., Башинський В. Г., Каламурза О. Г., Журахов В. А. Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на БпАК. Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. 2021. № 2 (8). С. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.8.2021.09>.
8. Г. Федоренко, Г. Фесенко, В. Харченко. Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2022. No. 4(22). С. 20–30. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.21.020>.
9. Filipi J., Stojnić V., Muštra M., Gillanders R. N., Jovanović V., Gajić S., Turnbull G. A., Babić Z., Kezić N., Risojević V. Honeybee-based biohybrid system for landmine detection. Science of The Total Environment. 2022. Vol. 803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150041>.
10. Robledo L., Carrasco M., Mery D. A survey of land mine detection technology. International Journal of Remote Sensing. 2009. Vol. 30. Issue 9. P. 2399–2410. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802549435>.
11. Kasban H., Zahran O., Elaraby S. M., El-Kordy M., Abd El-Samie F. E. A comparative study of landmine detection techniques. Sensing and Imaging. 2010. Vol. 11. Issue 3. P. 89–112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11220-010-0054-x>.
12. А.В. Іщенко, М.В. Кобець. Засоби і методи виявлення вибухових речовин та пристроїв у боротьбі з тероризмом. Навчально-практичний посібник. – К.: Національна академія внутрішніх справ України, 2005. 148 с.
13. Van Verre W., Podd F. J., Daniels D. J., Peyton A. J. A Review of Passive and Active Ultra-Wideband Baluns for Use in Ground Penetrating Radar. Remote Sensing. 2021. Vol. 13. Issue 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13101899>.
14. Song X., Liu T., Xiang D., Su Y. GPR Antipersonnel Mine Detection Based on Tensor Robust Principal Analysis. Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Issue 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11080984>.
15. ЗСУ використовують тепловізори для виявлення мін, https://censor.net/ua/video_news/3437668/zsu_vykorystovuyut_teplovizory_dlya_vuyavlennya_min_cnn_video (дата звернення 12/05/2024).
16. Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. Л.: Химия, 1981. 312 с., ил.
17. Басок Б.І., Воробйов Л.Й., Михайлик В.А., Луніна А.О. «Теплофізичні Властивості Природного Ґрунту». *Пром. теплотехніка*, 2008, т. 30, № 4, с. 77–85.
18. Х.Р. Козак, В.М. Желих. Оцінка та аналіз характеристик теплових акумуляторів для повітряних геліосистем. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Вип. 19, 2016, с. 65–70.