

УДК 528.9:004.05
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.14>

Дмитро ЛЯШЕНКО, д-р. геогр. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-5588-0322
e-mail: uageog@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Іванна ЗОБНІВ, студ.
ORCID ID: 0000-0003-0365-4547
e-mail: ivannazobniv333@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Олександр ЦВИК, асп.
ORCID ID: 0009-0006-5464-2078
e-mail: tsvik1603@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

КАРТОГРАФУВАННЯ МІННОЇ НЕБЕЗПЕКИ ЗА ДАНИМИ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЗНІМАНЬ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)

Вступ. Наслідком повномасштабної збройної агресії проти України є значні зміни природних та антропогенних ландшафтів. Це негативно впливає на безпеку населення та розвиток економіки країни. Надзвичайну загрозу становлять міни, нерозірвані боєприпаси та інші вибухонебезпечні об'єкти. Для ідентифікації мін проаналізовано можливості використання спектроскопічних знімків, отриманих з БПЛА для картографування.

Методи. Для завдань картографування використано отримані з БПЛА зображення високого розрізнення тестових знімків полігону, розташованого в Хмельницькій області (Україна), з муляжами мін, розміщеними на поверхні та невеликій глибині. Оброблення даних виконано в ArcGIS PRO з використанням програмування мовою Python.

Результати. У роботі виконано порівняння методів дистанційної ідентифікації мін різними сенсорами за літературними джерелами. Апробовано методику дешифрування геозображень високого просторового розрізнення, отриманих з БПЛА у видимому та тепловому діапазонах спектра для виявлення мін на відкритих ділянках для завдань гуманітарного розмінування. Набув подальшого розвитку алгоритм оброблення знімків для ідентифікації мін, аналізу та інтерпретації результатів за допомогою мови Python.

Висновки. Порівняльний аналіз та експериментальні роботи підкреслюють ефективність використання багатоспектральних зображень, зокрема, розрахованого на їх основі індексу вологості ґрунту (Soil Water Index – SWI) для ідентифікації мін на багатоспектральних зображеннях, отриманих з БПЛА. Використання SWI забезпечує точність ідентифікації мін лише близько 70 % і може бути використаний лише для попередньої оцінки забруднення територій вибухонебезпечними предметами.

Ключові слова: гуманітарне розмінування, БПЛА, ДЗЗ, вегетаційні індекси, дешифрування, автоматизація, картографування.

Вступ

Збройні конфлікти в різних частинах світу зумовлюють значні зміни у природних та антропогенних ландшафтах. Сучасні війни справляють значний вплив на суспільство та природу: у воєнних діях беруть участь численні збройні формування; значною є чисельність людських втрат; від воєнних дій потерпають великі площі; боєприпаси завдають значних руйнувань; ландшафти зазнають масштабних змін (Нуру, 2008).

Накопичений досвід свідчить, що крім фізичного впливу: порушення рельєфу (Стецюк, & Ковальчук, 2019), ущільнення ґрунтів, зміни гідрологічного режиму поверхневих та підземних вод, зміни вмісту хімічних речовин у воді та ґрунтах (Bonchkovskiy et al, 2023) – зростає небезпека життя і здоров'я людей через мінування та значну кількість боєприпасів, що не розірвалися. Наземні міни та інші вибухонебезпечні пристрої не тільки встановлюються вручну але й дистанційно. На жаль, розроблення засобів протимінної боротьби перебуває у стані затяжної системної кризи (Горбулін, 2022). Вибухонебезпечні предмети (ВНП) на території України, де відбувалися бої, становлять довгострокову гуманітарну та економічну загрозу для постраждалих громад (Baur et al., 2020).

Ці обставини зумовлюють актуальність завдання пошуку та ідентифікації мін та інших вибухонебезпечних предметів на території України, про що йдеться в Національній стратегії протимінної діяльності на період до 2033 р. (Про схвалення Національної стратегії, 2024).

Огляд останніх досліджень і публікацій та формулювання цілей статті. Засоби протимінної боротьби та

розмінування доволі різноманітні. Робота із звичайними ручними міношукачами з металодетекторами (Alqudsi et al., 2021) супроводжується підвищеним ризиком для сапера. Як носії обладнання використовуються наземні безпілотні платформи та безпілотні літальні апарати (БПЛА) (Baghbadorani et al, 2022). В роботі (Довбня, 2024) виконано детальний порівняльний аналіз функціональних можливостей наземних дронів для розмінування території.

Розпізнавання мін відбувається на основі тематичного дешифрування, процесу виявлення, розпізнавання та інтерпретації різної інформації за зображеннями земної поверхні (Довгий та ін., 2019). Використовують сенсори, що працюють у різних діапазонах спектра, явище електромагнітної індукції, а також тварин для пошуку мін: собак, гризунів і навіть бджол (Kasban et al., 2010). У роботі (Alqudsi et al., 2021) детально проаналізовано принципи та складність розпізнавання мін залежно від використаних технологій.

Зазначається про успішне використання радіолокаційних знімків радаром із синтезованою апертурою (можна створити тривимірні моделі поверхні Землі високої просторової розрізненості (Baghbadorani et al., 2022). Натомість радар з проникаючим випромінюванням (георадар) дає змогу реконструювати образи підземних цілей, враховуючи різну швидкість поширення ЕМХ в повітрі та ґрунті різної щільності та захованих під землею предметів. Зображення профілю ґрунту та похованих у ньому об'єктів виконують за допомогою алгоритмів, але швидкість ЕМХ в ґрунті має бути правильно оцінена для забезпечення

© Ляшенко Дмитро, Зобнів Іванна, Цвик Олександр, 2025

добре сфокусованого зображення та зменшення помилкових ідентифікацій (Fernández et al., 2018).

Вибухонебезпечні предмети та процес їх виявлення можна класифікувати за типом (протипіхотні, протитанкові міни, міни-"пелюстки"); матеріалом корпусу (метал, пластик); зовнішніми умовами середовища, зокрема: глибиною залягання; порою року, коли відбувається пошук мін, часом доби та погодними умовами (сонячна, хмарна погода, дощ); фізико-географічними умовами місцевості (вологість ґрунту, його механічний склад, наявність рослинності тощо) (Miller et al., 2022); використаними технологіями (георадари, магнітometri, металодетектори, ультразвукові сенсори, аналізатори випарів вибухових речовин, зображення у видимому та інфрачервоному діапазоні). Транспортуванням сенсорів може здійснювати піший оператор, наземний дрон, БПЛА тощо. На нашу думку, найбільш точна ідентифікація мін у різних умовах зовнішнього середовища може бути досягнута шляхом комбінації різних методів та залежатиме від типу мін і стану середовища.

Позитивні результати також дає використання багатоспектральних сенсорів, зокрема класифікація на основі модифікованого фільтру виявлення обмеженої мінімізації енергії (Constrained Energy Minimization – CEM) (Elbakary, & Alam, 2008).

Ефективність знімання в тепловому (інфрачервоному) діапазоні залежить від стану середовища на момент знімання, а його недоліком є те, що виявляються лише об'єкти, закладені на глибині менш ніж 15 см (Kasban, 2010). Повідомляється (Deans et al, 2006) про метод виявлення закопаних сурогатних наземних мін за допомогою імпульсного термографічного методу, керованого потужним інфрачервоним нагрівачем, унаслідок дії якого на поверхні утворювався сухий шар піску, за температурою якого визначалася наявність міни в певному місці (Deans et al, 2006). Теоретичні моделі розподілу температури в ґрунті, розроблені для визначення його теплових сигнатур для пошуку заглиблених наземних мін, розробили (Lamorski, et al, 2002).

Лідарні знімання передбачають використання коротких імпульсів випромінювання в оптичному діапазоні. В результаті отримують хмару точок з просторовими координатами, на основі якої будують цифрову модель рельєфу і цифрову модель місцевості, які можуть бути допоміжним засобом ідентифікації мін, особливо якщо міни розміщені на поверхні або на поверхні залишилися сліди (борозни, заглиблення, вирви) від їх закладання.

Вибір технологічних рішень виявлення мін у підсумку має забезпечити оптимальні умови для проведення спостережень у різних діапазонах спектра. Для цього автори (Porov et al, 2022) запропонували розробити цільову базу даних із спектральними портретами об'єктів різних видів ВНП і типовими спектральними характеристиками ґрунтових покривів для підвищення ефективності дистанційного автоматизованого виявлення мін.

Зважаючи на викладене, одним з актуальних завдань є складання карт замінованих українських територій, потрібних для планування проведення робіт з їх розмінування (Горбулін, 2022). Вітчизняні дослідження (Porov et al., 2022) показали, що частота помилкових спрацьовувань при виявленні мін сенсорами, побудованими лише на базі оптичних датчиків, доволі висока. Тому вдосконалення методології ідентифікації мін за багатоспектральними зображеннями є актуальним.

Мета роботи: опрацювати теоретичні та методологічні питання дешифрування даних ДЗЗ високого просторового розрізнення у видимому та інфрачервоному

діапазонах і картографування мінних полів. Досягнення цієї мети передбачає вирішення таких завдань:

- вивчення і узагальнення досвіду використання даних дистанційного зондування для картографування мінної небезпеки;
- вдосконалення методики автоматизованого виявлення мін за багатоспектральними зображеннями, одержаними з безпілотних літальних апаратів коптерного типу (джерела даних, підходи, методи, апаратне та програмне забезпечення);
- апробація дистанційної ідентифікації та картографування мінних полів за результатами знімань на тестових ділянках та оцінювання точності робіт.

Об'єкт дослідження. Досліджувана територія розташована на околиці села Мукша Китайгородська, у Слобідсько-Кульчівецькій сільській територіальній громаді Кам'янець-Подільського району Хмельницької області.

Методи

У роботі використано масив знімків з БПЛА, отриманих Науковим центром аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України. Знімання проведено разом з фахівцями інженерних військ ЗСУ у весняно-літній сезон (травень–червень) 2021 р. (Porov et al., 2022) на експериментальному полігоні, де були розміщені муляжі мін. Використано легкі БПЛА коптерного типу DJI і Parrot. Набір бортових сенсорів містив кольорову цифрову камеру P12.4K, багатоспектральну камеру із сенсорами видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів P4MS і теплову інфрачервону камеру FLIR One Pro. Для планування місії спостережень використано DJI Ground Station Pro і знімки тестових ділянок прямокутної форми (довжина сторін від 30 до 80 м, висота аерофотознімання в межах 2–10 м). Ортофотомозаїка формувалася з геозображень, отриманих з висоти 50–100 м. Важливим завданням при цьому було забезпечення близьких значень відстані між двома послідовними центрами пікселів, вимірними на землі (ground sample distance – GSD) для знімків з різних сенсорів шляхом підбору відповідних висот фотографування (Porov et al., 2022).

В ході авторських робіт набула подальшого розвитку методика (рис. 1). До складу робіт входить формування завдання на створення карти, що забезпечує її актуальність, достовірність, повноту, зручність використання. Передбачається доступність карт для користувачів у різних форматах (друковані карти, електронні карти для десктопів та мобільних пристроїв).

Google Earth, Planet Labs) та наявних картографічних матеріалах. Польове обстеження (Miller et al., 2022) має враховувати фізичні властивості ґрунту (структуру, вологість, щільність) для прогнозування ефективності робіт.

Планування місії (визначення оптимальної дати та часу польових робіт для зниження витрат на окремий БПЛА, підвищення безпеки польотів, скорочення часу виконання робіт, з урахуванням зміни погодних умов, специфікаціями БПЛА, забезпечення уникнення зіткнень з рухомими об'єктами і з нерухомими перешкодами).

Виконання знімань в сучасних умовах складається з: отримання дозволу від військової адміністрації, розгортання групи на ділянці (від кількох годин до кількох днів); налаштування БПЛА близько 20 хвилин. На ділянці попередньо розташовують маркери, які будуть чітко видно на отриманих зображеннях та визначають їх координати наземними методами з сантиметровою точністю. Власне знімання містить операції зльоту, посадки після чого виконується завантаження даних з БПЛА на комп'ютер.

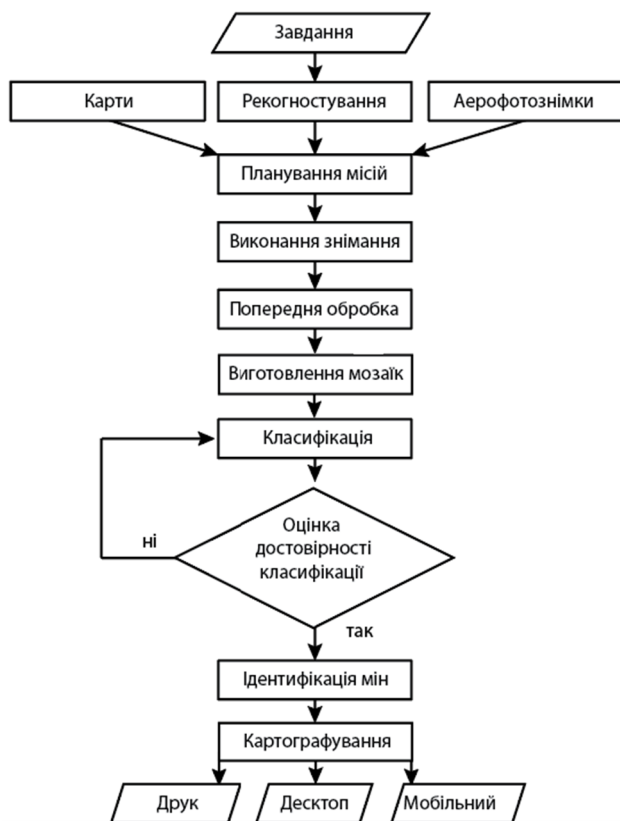


Рис. 1. Алгоритм картографування мінних полів за (Popov et al., 2022) із доповненнями авторів

Рекогносрування виконується на основі даних (Оброблення даних виконано в середовищі ArcMap та застосовано інструмент калькулятор растрів. Програмування задачі передбачає використання алгоритму для обробки та аналізу зображень з метою автоматизації процесу виявлення мін на аерофотознімках. Суть алгоритму, – попіксельна класифікація мозаїки ортофотозображень методом бінарної логістичної регресії. В результаті класифікації кожен піксель мозаїки зображення віднесено до одного з двох класів: 1) елемент місцевості з міною; 2) елемент місцевості не містить міни. Такий масив даних є головним джерелом карт мінних полів, на якій клас зображення "елементи місцевості з міною" має відповідне умовне позначення. Для оброблення даних та

візуалізації використано код мовою Python з використанням бібліотеки OpenCV для роботи із зображеннями. Основні етапи оброблення та аналізу дистанційних даних:

а) попереднє оброблення зображень (радіометрична та просторова корекція, регуляризація, фільтрація шумів і спотворень, географічна прив'язка);
б) створення мозаїки з оброблених зображень;
в) згладжування мозаїки зображень для підвищення якості зображення та полегшення подальшого аналізу;
г) підготовка навчальних даних для алгоритму класифікації;

д) побудова моделі класифікації та оптимізація її параметрів;

е) виконання попіксельної класифікації мозаїки зображень за допомогою навченої моделі для виявлення мін;

є) аналіз якості отриманих результатів, розрахунок параметрів точності, зокрема діагностичної сили (DP) для оцінки ефективності моделі. Саме на цьому етапі приймається рішення про адекватність результатів та необхідність повторної класифікації.

Для підтвердження правильності результатів використано статистичні метрики, такі як чутливість (TPR), специфічність (TNR), точність (Accuracy) та діагностична сила (DP).

Ефективність виявлення мін оцінювалася за такими коефіцієнтами виявлення: ймовірність правильного виявлення мін TP та ймовірність помилкової тривоги FP:

$$TP = \frac{|M|}{|M_0|} \quad (1)$$

$$FP = \frac{|N|}{|M| + |N|} \quad (2)$$

де M_0 – множина фактично існуючих мін, M – множина правильно виявлених мін, N – множина помилкових виявлень; $|M|$ – загальна кількість елементів у множині M .

Діагностична сила – це здатність методу ідентифікувати досліджувані об'єкти за певною ознакою. Цей параметр розраховується за формулою 3.

$$DP = \frac{\text{np.log}((TP + 1e-10) / (FN + 1e-10)) + \text{np.log}((TN + 1e-10) / (FP + 1e-10))}{2} \quad (3)$$

де DP – діагностична сила, TP – істинно позитивні результати ідентифікації; FN – хибно негативні результати; TN – істинно негативні результати; FP – хибно позитивні результати. Слід зауважити, що різні канали та набори даних мають різну діагностичну силу. Розрахунок діагностичної сили ідентифікації мін за різними спектральними каналами наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Діагностична сила ідентифікації мін за спектральними каналами	
Канали	Діагностична сила (DP)
Кольорове зображення (RGB)	19,31
Синій (B): 450 нм ± 16 нм	72,37
Зелений (G): 560 нм ± 16 нм	73,73
Червоний (R): 650 нм ± 16 нм	72,47
Червоний край (RE): 730 нм ± 16 нм	73,63
Ближній інфрачервоний діапазон (NIR): 840 нм ± 26 нм	73,53

Для програмування задачі використано менеджер пакетів Python, PIP та такі бібліотеки: 'cv2' (бібліотека OpenCV для обробки зображень); 'numpy': (бібліотека для роботи з масивами та математичними операціями); 'LogisticRegression': класифікатор логістичної регресії з бібліотеки Scikit-learn; 'matplotlib.pyplot': бібліотека для побудови графіків.

Викорстано функції: 'preprocess_images' для попередньої обробки, 'create_and_save_image_mosaic' – для створення мозаїки зображень та збереження її у файл;

'smooth_image_mosaic' – для згладжування мозаїки; 'prepare_training_data' – для підготовки навчальних даних, яка перетворює згладжену мозаїку зображень у одновимірний масив пікселів та повертає підготовані дані; 'train_logistic_regression' – для формування функції правдоподібності та оптимізації параметрів моделі логістичної регресії, навчання її на навчальних даних та повертання навченої моделі; 'classify_pixels' – для класифікації пікселів мозаїки зображень мін (перетворює мозаїку в одновимірний масив пікселів; обчислює

ймовірності належності до класу мін; повертає масив імовірностей у вигляді мозаїки); 'obtain_labels_from_image', яка отримує мітки зображення, конвертує зображення у відтінки сірого, позначає пікселі, які мають яскравість, меншу від порогового значення, як мітки класу 1, а решту – як мітки класу 0; повертає мітки у вигляді одновимірного масиву; 'save_labels_as_image', яка перетворює масив міток у зображення та зберігає зображення у форматі TIFF та масив міток у файл NPY.

Головна функція 'main' виконує послідовно всі кроки обробки аерофотознімків для виявлення мін, включаючи попередню обробку зображень, створення мозаїки, згладжування зображень, навчання моделі, класифікацію пікселів, обчислення діагностичної сили та побудову графіку.

Результати

У процесі виявлення мін на багатоспектральних знімках розглянуто три різні варіанти зйомки (з різною кількістю та типами мін). Загальною метою у всіх представлених варіантах наборів даних було завдання ефективно виявляти міни на основі обробки багатоспектральних зображень. Розраховано діагностичну силу (формула 3) ідентифікації мін за різними наборами даних (табл. 2). На рис. 2 показано фрагмент зйомки території із закопаними мінами – ТМ-62ПЗ; мінами, прихованими в траві: МОН-50, МОН-90, МОН-100; відкриті наземні міни – ОЗМ-72, ТМ-62М, ТМ-72 та ТМ-62ПЗ.

Таблиця 2

Діагностична сила ідентифікації мін за наборами даних	
Набір даних	Діагностична сила (DP)
Кольорове зображення (RGB)	19,31
Три канали в діапазоні (від 450 нм до 650 нм)	73,53
Червоний канал (650 нм $\pm$ 16 нм)	72,47
Канал у діапазоні від 730 нм до 840 нм + кольорове зображення (RGB)	22,35
Інфрачервоне зображення з камери FLIR One Pro	44,68
Soil Water Index – SWI	71,41

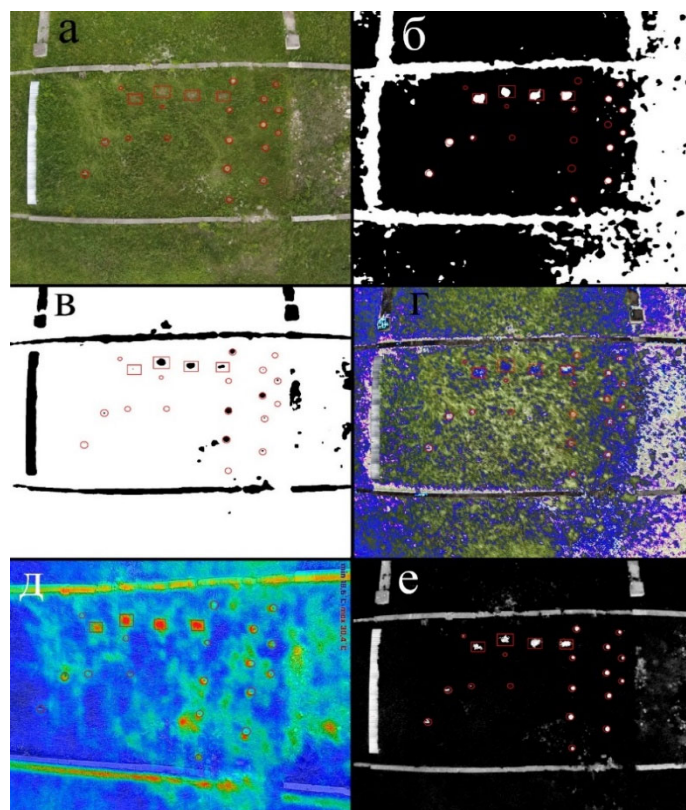


Рис. 2. Порівняння можливості ідентифікації мін на багатоспектральних знімках:

- а – кольорове зображення ділянки (RGB); б – три канали в діапазоні (від 450 нм до 650 нм);
- в – червоний канал (650 нм $\pm$ 16 нм); г – два канали в діапазоні (від 730 нм до 840 нм + кольорове зображення (RGB));
- д – інфрачервоне зображення з камери FLIR One Pro;
- е – результат опрацювання масиву даних за допомогою запропонованого алгоритму

Ідентифікація мін за кольоровим зображенням ділянки (рис. 2а) показала низьку ефективність (діагностична сила 19,31).

Комбінація трьох каналів (рис. 2б) синього (450 нм $\pm$ 16 нм), зеленого (560нм $\pm$ 16 нм) та червоного каналів (650 нм $\pm$ 16 нм) дала змогу більш успішно ідентифікувати контраст між мінами і навколишнім середовищем та показало діагностичну силу 73,53.

Використання інфрачервоних зображень при виявленні мін за рахунок більшої інформації про теплове випромінювання об'єктів показало діагностичну силу 44,68.

З усіх проаналізованих для ідентифікації мін наборів даних заслуговує на увагу можливість використання індексу вологості ґрунту (SWI – Soil Water Index), що має високу діагностичну силу. Цей індекс дозволяє визначити вміст води в ґрунті (рис. 3). Цифрами на рисунку

показано значення SWI. Знімання на ділянці проводилось вранці (початок робіт о 10:33). Значення індексу SWI в місці розміщення мін лежать у діапазоні від $-0,15$ до $-0,28$. Це свідчить про те, що ділянки, де зосереджені міни, є більш вологими (можливо, за рахунок конденсації) на відміну від загальної вологості ґрунту від $0,75$ до $-0,12$. Частина досліджуваної ділянки на сході є більш

водонасиченою, значення SWI на ній перевищують значення, характерні для мін, і лежать у діапазоні від $-0,31$ до $-0,78$.

$$SWI = NIR - SWIR / NIR + SWIR, \quad (4)$$

де NIR – ближній інфрачервоний канал; SWIR – короткохвильовий інфрачервоний канал.

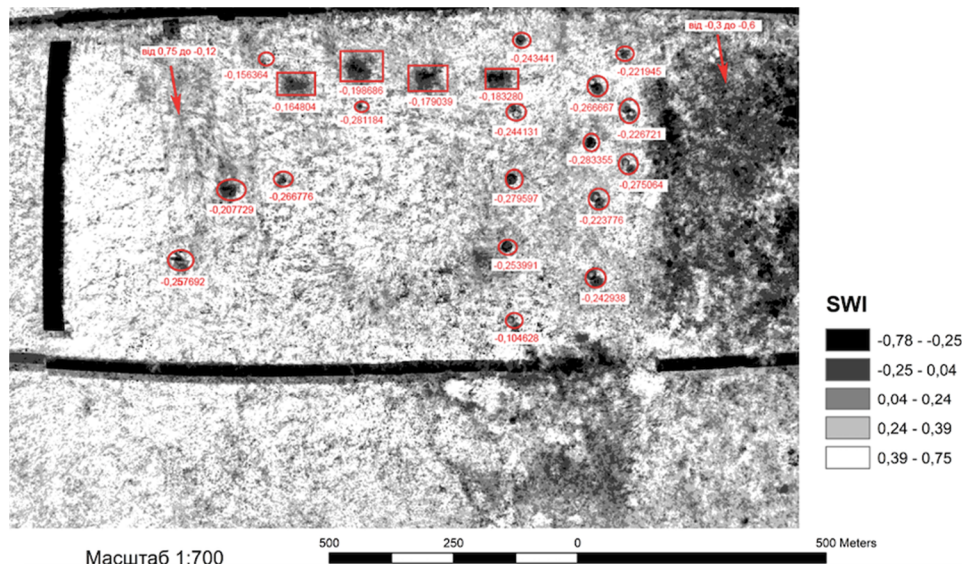


Рис. 3. Результати ідентифікації мін за індексом вологості ґрунту (SWI)

В результаті застосування алгоритму на геозображеннях визначається положення мін у графічному вигляді, що може бути оперативно передано на мобільні пристрої зацікавленим сторонам для перегляду та роботи з картами через відповідний інтерфейс користувача.

Дискусія і висновки

Використання даних, отриманих з легких БПЛА коптерного типу DJI і Parrot багатоспектральними цифровими камерами P12.4K із сенсорами видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів P4MS і теплової інфрачервоної камери FLIR One Pro, показало певну ефективність для виявлення мін. Алгоритм апробовано на наборах даних з тестового полігона зі встановленими муляжами мін, що зробило можливим верифікацію розпізнавання мін. Програмування задачі виконано мовою Python з використанням бібліотек OpenCV, numpy, LogisticRegression, Scikit-learn, matplotlib, pyplot.

Підтверджено ефективність ідентифікації мін на основі оброблення багатоспектральних зображень, зокрема використання індексу вологості ґрунту (SWI – Soil Water Index). Це пов'язано з тим, що в околі міни концентрується більша кількість вологи внаслідок конденсації вологи на поверхні міни внаслідок добової зміни температур та порушенням природних шляхів просочування вологи вниз уздовж профілю ґрунту. Діагностична сила використання зображень різних каналів для виявлення мін становила близько 70 %, що недостатньо для однозначної ідентифікації вибухонебезпечних предметів. Це серйозно обмежує можливості використання методу для гуманітарного розминування, військових операцій, цивільної безпеки.

Вважаємо, що для продовження досліджень з ідентифікації мін корисним буде створення бази знань різних типів мін, а також порушень, які вони спричиняють у різних типах ландшафтів на базі зафіксованих під час знімань сигнатур.

Внесок авторів: Дмитро Ляшенко – концептуалізація, методологія, написання (редагування); Іванна Зобнів – написання (оригінальна чернетка), формальний аналіз, програмне забезпечення; Олександр Цвик – методологія, написання тексту, валідація даних.

Подяки, джерела фінансування. Дослідження виконувалися на основі даних, наданих Науковим центром аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук. Автори вдячні за надану можливість користуватися архівними матеріалами аерофотознімання особисто Станкевичу Сергію Арсенійовичу.

Список використаних джерел

- Денисик, Г., & Антонюк, О. (2017). Наукове і прикладне значення дослідження белігеративних ландшафтів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 1, 13–16.
- Денисик, Г. І. (2013). Антропогенне ландшафтознавство у першій половині ХХІ століття. *Наукові записки. Серія: Географія* : зб. наук. пр. Вінниц. держ. пед. ун-т ім. М. Коцюбинського, 25, 7–12.
- Довгий, С., Лялько, В., Бабійчук, С., Кучма, Т., Томченко, О., & Юрків, Л. (2019). *Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування*.
- Горбулін, В. П. (2022). Світова глобальна проблема розминування: український вектор. *Вісник НАН України*, 2, 3–13.
- Довбня, М. (2024). Порівняльний аналіз дронів для розминування українських територій.
- Кабінет Міністрів України. (2024, 28 червня). *Про схвалення Національної стратегії протимінної діяльності на період до 2033 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках*. Розпорядження № 616-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/616-2024-r#Text>
- Стецюк, В., & Ковальчук, І. (2019). Белігеративні властивості рельєфу. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 2(35), 29–32. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2016.35.29-32>
- Alqudsi, Y. S., Alsharafi, A. S., & Mohamed, A. (2021, July). A review of airborne landmine detection technologies: Unmanned aerial vehicle-based approach. In *2021 International congress of advanced technology and engineering (ICOTEN)* (pp. 1–5). IEEE.
- Baghbadorani, A. A., Holbrook, S., Martin, E. R., Ripepi, N. S., & Libbey, B. (2022). Radar Imaging Applications for Mining and Landmine Detection.
- Baur, J., Steinberg, G., Nikulin, A., Chiu, K., & de Smet, T. S. (2020). Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines. *Remote Sensing*, 12(5), 859.

Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Shvaiko, V., & Bonchkovskiy, A. (2023, November). A Comprehensive Methodological Approach to Assessing War-Induced Soil Disturbances in the Kharkiv Region, Ukraine. In *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2023, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Deans, J., Gerhard, J., & Carter, L. J. (2006). Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface. *Infrared Physics & Technology*, 48(3), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2005.06.003>

Elbakary, M. I., & Alam, M. S. (2008, March). Mine detection in multispectral imagery data using constrained energy minimization. In *Optical Pattern Recognition XIX* (Vol. 6977, pp. 63–71). SPIE.

Fernández, M. G., López, Y. Á., Arbolea, A. A., Valdés, B. G., Vaquero, Y. R., Andrés, F. L. H., & García, A. P. (2018). Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*, 6, 45100–45112.

Hupy, J. (2008). The environmental footprint of war. *Environment and History*, 14(3), 405–421.

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.

Lamorski, K., Pręgowski, P., Swiderski, W., Szabra, D., Walczak, R. T., & Usowicz, B. (2002). Thermal signatures of land mines buried in mineral and organic soils—modelling and experiments. *Infrared physics & technology*, 43(3–5), 303–309.

Miller, T. W., Borchers, B., Hendrickx, J. M., Hong, S., Dekker, L. W., & Ritsema, C. J. (2002, April). Effects of soil physical properties on GPR for landmine detection. In *Fifth international symposium on technology and the mine problem* (pp. 1–10).

Popov, M. O., Stankevich, S. A., Moso, 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.

References

Alqudsi, Y. S., Alsharafi, A. S., & Mohamed, A. (2021, July). A review of airborne landmine detection technologies: Unmanned aerial vehicle-based approach. In *2021 International congress of advanced technology and engineering (ICOTEN)* (pp. 1–5). IEEE.

Baghbadorani, A. A., Holbrook, S., Martin, E. R., Ripepi, N. S., & Libbey, B. (2022). *Radar Imaging Applications for Mining and Landmine Detection*.

Baur, J., Steinberg, G., Nikulin, A., Chiu, K., & de Smet, T. S. (2020). Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines. *Remote Sensing*, 12(5), 859.

Bonchkovskiy, O., Ostapenko, P., Shvaiko, V., & Bonchkovskiy, A. (2023, November). A Comprehensive Methodological Approach to Assessing War-Induced Soil Disturbances in the Kharkiv Region, Ukraine. In *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of*

the Environment (Vol. 2023, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024, June 28). On approval of the National Mine Action Strategy for the period until 2033 and approval of the operational plan of measures for its implementation in 2024–2026. Order No. 616-p. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/616-2024-p#Text>

Deans, J., Gerhard, J., & Carter, L. J. (2006). Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface. *Infrared Physics & Technology*, 48(3), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2005.06.003>

Dovbnia, M. (2024). *Comparative analysis of drones for demining Ukrainian territories* [in Ukrainian].

Dovhii, S., Lyalko, V., Babiychuk, S., Kuchma, T., Tomchenko, O., & Yurkiv, L. (2019). *Fundamentals of remote sensing of the Earth: history and practical application* [in Ukrainian].

Elbakary, M. I., & Alam, M. S. (2008, March). Mine detection in multispectral imagery data using constrained energy minimization. In *Optical Pattern Recognition XIX* (Vol. 6977, pp. 63–71). SPIE.

Fernández, M. G., López, Y. Á., Arbolea, A. A., Valdés, B. G., Vaquero, Y. R., Andrés, F. L. H., & García, A. P. (2018). Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*, 6, 45100–45112.

Horbulin, V. P. (2022). The global problem of demining: the Ukrainian vector. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 3–13 [in Ukrainian].

Hupy, J. (2008). The environmental footprint of war. *Environment and History*, 14(3), 405–421.

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.

Lamorski, K., Pręgowski, P., Swiderski, W., Szabra, D., Walczak, R. T., & Usowicz, B. (2002). Thermal signatures of land mines buried in mineral and organic soils—modelling and experiments. *Infrared physics & technology*, 43(3–5), 303–309.

Miller, T. W., Borchers, B., Hendrickx, J. M., Hong, S., Dekker, L. W., & Ritsema, C. J. (2002, April). Effects of soil physical properties on GPR for landmine detection. In *Fifth international symposium on technology and the mine problem* (pp. 1–10).

Popov, M. O., Stankevich, S. A., Moso, 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 [in Ukrainian].

Stetsiuk, V., & Kovalchuk, I. (2019). Beligative properties of the relief. *Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military Specialized Sciences*, 2(35), 29–32. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2016.35.29-32> [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 30.12.24

Прорецензовано / Revised: 06.02.25

Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Dmytro LIASHENKO, DSc (Geog.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0001-5588-0322

e-mail: uageog@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Ivanna ZOBNIV, Student

ORCID ID: 0000-0003-0365-4547

e-mail: ivannazobniv333@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Oleksandr TSVYK, PhD Student

ORCID ID: 0009-0006-5464-2078

e-mail: comtsvik1603@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MAPPING MINE RISK USING LARGE-SCALE MULTISPECTRAL IMAGERY

Background. The full-scale armed aggression against Ukraine has resulted in significant changes in natural and anthropogenic landscapes. This negatively affects the safety of the population and the development of the country's economy. Mines, unexploded ordnance and other explosive objects pose an extraordinary threat. To identify mines, we analyzed the possibility of using spectral images obtained from UAVs for mapping.

Methods. For the mapping tasks, high-resolution images of test images of the test site located in Khmelnytsky region (Ukraine) with dummy mines placed on the surface and at a shallow depth were used. Data processing was performed in ArcGIS PRO, using Python programming.

Results. The article compares the methods of remote mine identification by different sensors according to the literature. A methodology for decoding high spatial resolution geo-images obtained from UAVs in the visible and thermal ranges of the spectrum to detect mines in open areas for humanitarian demining was tested. The image processing algorithm for mine detection, analysis and interpretation of the results using the Python language was further developed.

Conclusions. The comparative analysis and experimental work emphasize the effectiveness of using multispectral images, in particular, the Soil Water Index (SWI) calculated on their basis, for mine identification on multispectral images obtained from UAVs. The use of SWI provides an accuracy of mine identification of only about 70 % and can be used only for preliminary assessment of the contamination of territories by explosive objects.

Keywords: humanitarian demining, UAVs, remote sensing, vegetation indices, decoding, automation, mapping.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.