



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2025.12.4.294>

УДК 623.368:528.854(623.746.-519)

Оцінювання точності виявлення наземних мін за результатами інфрачервоного аерознімання

Шкляр С. В. <https://orcid.org/0000-0001-8726-7936>

Андрєєв А. А. <https://orcid.org/0000-0002-6485-449X>

Голубов С. І.* <https://orcid.org/0000-0003-3711-598X>

ДУ “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”,
бул. Олесь Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Україна сьогодні належить до найбільш забруднених мінами країн світу, що створює значну загрозу для населення, довкілля та відновлення економіки. Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності протимінної діяльності є використання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) з інфрачервоними (ІЧ) камерами для дистанційного виявлення мін та інших вибухонебезпечних предметів. Метою цієї роботи є розроблення та оцінювання підходу до автоматизованого виявлення мін за ІЧ-зображеннями, отриманими з БпЛА.

У роботі викладено підхід до виявлення мін та інших вибухонебезпечних предметів на ІЧ-зображеннях, що ґрунтується на методи виявлення аномалій з подальшим пороговим обробленням результатів. На основі цього підходу було розроблено програмний модуль за допомогою мови програмування Python, який включає відображення знімків, застосування методу виявлення аномалій та порогове оброблення для отримання бінарних карт класифікацій.

Для тестування підходу було проведено експериментальні дослідження з використанням квадрокоптера DJI Matrice 300 RTK, на якому встановлено ІЧ-камеру Zenmuse H20T. Всього використано 34 ІЧ-знімки, на яких зображені 206 мін різних типів. До цих знімків було застосовано зазначений підхід, в результаті чого отримано бінарні карти класифікацій. Після проведення оцінювання точності було встановлено значення таких показників: загальна точність становила 89,32%, влучність – 0,79, повнота – 0,89, а F1-міра – 0,84.

Отримані результати підтверджують ефективність та практичну придатність запропонованого підходу для завдань дистанційного виявлення мін із застосуванням БпЛА. Надалі планується вдосконалити алгоритмічну частину методу, зокрема впровадження етапів попереднього оброблення ІЧ-знімків і розширення тестування на різні типи мін та умови знімання.

Ключові слова: виявлення наземних мін, інфрачервоне знімання, безпілотний літальний апарат, виявлення аномалій, порогове оброблення, ймовірність правильного виявлення, ймовірність хибного виявлення, влучність, повнота, F1-міра.

© С. В. Шкляр, А. А. Андрєєв, С. І. Голубов. 2025

Вступ

Україна сьогодні – одна з найбільш забруднених мінами країн світу, на території якої вже було багато не знищених мін ще до повномасштабного російського вторгнення в лютому 2022 р. (Куртсеїтов та ін., 2020, UN News, 2021). З листопада 2019 року по березень 2021 року, відповідно до повідомлення спеціальної моніторингової місії ОБСЄ, забрудненість території України становила майже 20 тис. мін (Open Global Rights, 2022). Утім, після початку широкомасштабної війни ця кількість значно зросла. Отже, розмінування є надзвичайно актуальним завданням, адже його оперативність та ефективність визначають безпеку цивільного населення,

відновлення економіки та стабільність продовольчого забезпечення (Бородіна та Ляшенко, 2022, Верховна Рада України, 2025). Згідно з оцінками, наданими Міністерством економіки України (на основі звіту Світового банку), загальні потреби в розмінуванні становлять \$29.8 млрд на початок 2025 року (Міністерство економіки України, 2025).

Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БпЛА) суттєво розширює можливості ведення інженерної розвідки (Зміївський та ін., 2024), зокрема щодо виявлення мін і вибухонебезпечних предметів. Використання БпЛА дає змогу мінімізувати ризики для особового складу, забезпечуючи дистанційне

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: S. I. Golubov / С. І. Голубов / asdfieldspec3@gmail.com

This is an Open Access article under the CC BY licenses (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

спостереження та аналіз потенційно небезпечних ділянок. Одним із найперспективніших напрямів застосування БПЛА у сфері протимінної діяльності є використання інфрачервоних (ІЧ) технологій (Мосов та Нероба, 2019).

ІЧ-камери, встановлені на БПЛА, фіксують незначні зміни температурного балансу поверхні ґрунту, спричинені наявністю мін або інших вибухонебезпечних предметів. Висока чутливість ІЧ-датчиків дає змогу виявляти об'єкти навіть у складних умовах – при низькому контрасті або частковому заглибленні в ґрунт (Shimoi et al., 2001).

Попри активний розвиток технологій, точність автоматизованого виявлення мін за інфрачервоними аерознімками залишається недостатньою для практичного застосування в польових умовах (Heuschmidt et al., 2025). На результати аналізу впливають такі фактори, як погодні умови, тип ґрунту, вологість, глибина залягання мін та їх конструктивні особливості. Це зумовлює необхідність удосконалення методів оброблення та аналізу ІЧ-зображень, а також розроблення алгоритмічного забезпечення для підвищення достовірності виявлення об'єктів. Отже, метою цієї роботи є оцінювання точності виявлення мін та інших вибухонебезпечних предметів на основі інфрачервоних аерознімків, отриманих із застосуванням БПЛА.

Методика

Запропонований підхід до виявлення та картування мін та інших вибухонебезпечних предметів на ІЧ-зображеннях включає такі етапи: 1) формування навчальної вибірки фону; (2) отримання карти ймовірностей наявності мін або інших вибухонебезпечних предметів; та (3) порогове оброблення для формування бінарної карти потенційно небезпечних об'єктів. Обрано саме метод виявлення аномалій, оскільки він не потребує повного набору навчальних даних для кожного типу мін і дозволяє виявляти об'єкти, що відрізняються від фону за характером теплового відгуку. Такий підхід є доцільним у випадках, коли об'єкти мають неоднорідні характеристики або коли неможливо сформувати повну та репрезентативну навчальну вибірку.

Для реалізації запропонованого підходу було розроблено програмний модуль на мові програмування Python. Графічний інтерфейс користувача цього модуля зображено на Рис. 1.

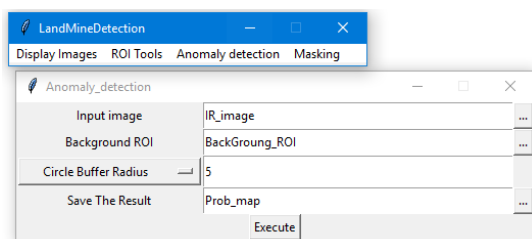


Рис. 1. Графічний інтерфейс користувача розробленого програмного модуля виявлення та картування мін та інших вибухонебезпечних предметів

Розроблений програмний модуль містить функціональні інструменти для відображення вхідних знімків (*Display images*), формування навчальної вибірки (*ROI tools*), побудови карти ймовірностей шляхом виявлення аномалій (*Anomaly detection*), а також виконання порогового оброблення результатів (*Masking*), що забезпечує формування бінарної карти класифікації. Вхідними даними можуть бути ІЧ-зображення у форматах GeoTIFF, ENVI та в інших розповсюджених графічних форматах (png, jpg, bmp тощо).

Display images. Ця функція дає змогу відобразити вхідні зображення. Існує можливість масштабування окремих ділянок. Також, при наведенні курсора на піксел відображається його значення.

ROI Tools. Застосовується для набору навчальної вибірки. При виконанні цієї процедури оператор створює полігони, точки всередині яких будуть формувати сигнатури навчальної вибірки. Обрані точки утворюють матрицю розміром $n \times m$, де n – кількість рядків, що відповідає кількості сигнатур, а m – кількість стовпців, що відповідає розмірності вхідного знімка (стека). Матриця навчальної вибірки буде збережена в текстовому форматі з розширенням .txt.

Anomaly Detection. Ця функція потребує наявності лише набору навчальної вибірки фону. Класифікація здійснюється в центральному пікселі, що кодує по зображенню вікна. Вікно може мати квадратну чи круглу форму. Радіус або сторона квадрата, які вимірюються в пікселях, задаються оператором. Значення ймовірності знаходження міни p , які розраховуються за такою формулою:

$$p = \operatorname{erf} \left(\frac{|x_{\text{mean}} - y_{\text{mean}}|}{\sqrt{2} y_{\text{std}}} \right),$$

де $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – стандартна функція помилок (Howard et al., 2022), x_{mean} – середнє значення пікселів всередині вікна, y_{mean} – середнє значення сигнатур вхідного набору навчальної вибірки, y_{std} – середнє квадратичне відхилення сигнатур набору вхідного набору навчальної вибірки. Вихідний знімок буде збережено також у бінарному форматі ENVI.

Masking. Ця функція виконує порогове оброблення карти розподілу ймовірностей. Її застосовують, щоб виключити з розгляду піксели, значення ймовірності в яких нижче за поріг, заданий оператором. Вхідними даними для цієї функції є бінарна класифікація, де всім пікселям, значення яких не нижчі за значення порогу, задане оператором, присвоюється значення 1, а пікселям, значення яких нижчі за значення порогу – значення 0. Вихідний знімок буде збережено також у бінарному форматі ENVI.

Експеримент

Експериментальні дослідження проводились у польових умовах на базі центру інженерних військ та

військ радіаційного, хімічного, біологічного захисту в структурі Командування сил підтримки ЗС України. У ході випробувань застосовувалися протипіхотні (ПМН, МОН, ОЗМ тощо) та протитранспортні міни (ТМ тощо), встановлені згідно з технічними інструкціями. Міни, що потребують заглиблення, були вкопані, а ті, що встановлюються відкритим способом, були розміщені на поверхні (Центр оперативних стандартів ..., 2019).

Інфрачервоне аерознімання проводилося за допомогою квадрокоптера DJI Matrice 300 RTK (Papor et al., 2024) (Рис. 2). На цьому БПЛА встановлено інфрачервону камеру Zenmuse H20T (DJI Enterprise, n.d.), яка реєструє теплові зображення розміром 640×512 пікселів та 20-мегапіксельні RGB зображення з 23-кратним гібридним зумом у форматах JPEG та GeoTIFF. Додатково БПЛА обладнано лазерним далекоміром з діапазоном вимірювання до 1200 м. Бортова підсистема GNSS RTK (DJI, n.d.), яка використовує мобільну станцію DJI D-RTK 2 для корекції даних, забезпечує сантиметрову точність геоприв'язки, а сенсорна система безпеки – уникнення зіткнень.



Рис. 2. Квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK

У рамках дослідження були отримані 34 ІЧ-знімки з камери Zenmuse H20T. Висота польоту під час зйомки становила від 15 до 25 м, що забезпечило просторову розрізненість від 1.33 до 2.22 с. Одержані знімки було які було оброблено з використанням розробленого програмного модуля. Для кожного обраного знімка навчальна вибірка фону формулася окремо, що дає змогу врахувати локальні особливості кожного знімка. У результаті, для кожного знімка отримано карту ймовірностей наявності мін, яка після порогового оброблення була перетворена в бінарну карту класифікації. У Табл. 1 наведено приклади застосування підходу до 5 із 34 вхідних ІЧ-знімків, де показано відповідність між вхідним зображенням та отриманою бінарною картою класифікації.

Для одержаних карт класифікацій було оцінено точність, що включало розрахунок таких показників, як влучність (precision), повнота (recall), загальна точність (overall accuracy) та F1-міра (F1 score) (Dalianis, 2018). Для цього було розраховано кількість правильно виявлених мін (true positive, істинно

позитивні), кількість хибних тривог (false positive, хибно позитивні) та кількість невиявлених мін (false negative, хибно негативні).

Таблиця 1. Приклади застосування розробленого підходу до ІЧ-знімків

№	Вхідний ІЧ-знімок	Бінарна карта класифікації
1		
2		
3		
4		
5		

За результатами цього оцінювання для нашого методу було проаналізовано 34 знімки, на яких є 206 мін. Із них виявлено 184 міни, тоді як 22 (10,7% від загальної кількості мін) залишилися невиявленими. Кількість хибно визначених об'єктів (хибні тривоги) становила 50 (24,2% від загальної кількості наявних мін). Загальна точність методу становила 89,32%, влучність (precision) становила 0,79, повнота (recall) – 0,89, а F1-міра – 0,84.

Висновки

У роботі викладено підхід до виявлення та картування мін та інших вибухонебезпечних предметів за ІЧ-знімками, що ґрунтується на використанні методу виявлення аномалій із подальшим пороговим обробленням результатів. Також на основі цього підходу розроблено програмний модуль мовою

програмування Python, який містить такі функції: відображення вхідних знімків (*Display images*), формування навчальної вибірки (*ROI tools*), побудови карти ймовірностей шляхом виявлення аномалій (*Anomaly detection*), а також виконання порогового оброблення результатів (*Masking*).

Було проведено експериментальні дослідження із застосуванням БПЛА DJI Matrice 300 RTK та ІЧ-камери Zenmuse H20T. У ході експерименту було використано 34 інфрачервоні знімки, на яких є 206 мін різних типів. Після застосування розробленого підходу було оцінено точність, за результатами чого було встановлено, що загальна точність становила 89,32%, влучність – 0,79, повнота – 0,89, а F1-міра – 0,84. Отримана оцінка точності свідчить про достовірність результатів та ефективність викладеного підходу.

Проте запропонований підхід має певні обмеження, зокрема необхідність формування навчальної вибірки фону для кожного окремого знімка. Це пов'язано з тим, що ІЧ-зображення можуть суттєво відрізнятися між собою умовами знімання, а також характером фону, який може не бути однаковим на різних зображеннях.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення методу виявлення, зокрема на розроблення етапу попереднього оброблення для підвищення контрасту об'єктів на вхідних ІЧ-знімках, а також – на тестування розробленого підходу в різних умовах знімання та для різних типів вибухонебезпечних предметів.

Внесок авторів: Концептуалізація – Шкляр С. В.; методологія – Шкляр С. В.; формальний аналіз – Шкляр С. В. та Андреев А. А.; дослідження – Андреев А. А. та Голубов С. І.; оброблення даних – Андреев А. А. та Голубов С. І.; підготовка тексту статті: авторський рукопис – Андреев А. А. та Голубов С. І.; рецензування та редагування – Голубов С. І.; візуалізація – Голубов С. І. Всі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Доступність даних: Дані можуть бути надані авторами за обґрунтованим запитом.

Подяки: Автори вдячні Національній академії наук України за підтримку цього дослідження. Ми також вдячні рецензентам і редакторам за їхні цінні коментарі, рекомендації та увагу до роботи.

Конфлікти інтересів: Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів

Author Contributions: Conceptualization: Shklyar S. V.; Methodology: Shklyar S. V.; Formal Analysis: Shklyar S. V. and Andreiev A. A.; Investigation: Andreiev A. A. and Golubov S. I.; Data Curation: Andreiev A. A. and Golubov S. I.; Writing – Original Draft Preparation: Andreiev A. A. and Golubov S. I.; Writing – Review & Editing: Golubov S. I.; Visualization: Golubov S. I. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement: Data available on reasonable request from the authors.

Acknowledgments: The authors are grateful to the National Academy of Sciences of Ukraine for supporting this research. We are also grateful to the reviewers and editors for their valuable comments, recommendations, and attention to the work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest

Література

- Бородіна, О. А., Ляшенко, В. І. (2022). Повоєнне відновлення економіки: світовий досвід та спроба його адаптації для України. *Вісник економічної науки України*, 1(42), 121–134. DOI: 10.37405/17297206.2022.1(42).121-134.
- Зміївський, Г. А., Пугач, В. В., Куртов, А. І., Чепурний, В. П. (2024). *Тактична повітряна розвідка із застосуванням безпілотних авіаційних комплексів*. Харків: Нац. юрид. ун-т ім. Ярослава Мудрого. Взято з https://dspace.nlu.edu.ua/bitstream/123456789/20165/1/Takt_pov_rozvidka_2024.pdf.
- Куртсеітов, Т. Л., Мосов, С. П., Трємбовецький, М. П., Ясько, В. А. (2020). Мінна зброя у фокусі сучасних війн і збройних конфліктів. *Зб. наук. праць ЦВСД НУОУ*, 2(69), 116–121.
- Мосов, С., Нєрєба, В. (2019). Напрями застосування безпілотної авіації для виконання завдань розмінування: світовий досвід. *Зб. наук. праць НАДПСУ ім. Б. Хмельницького*, 1(79), 172–185.
- Парламент прийняв за основу законопроект, який передбачає нові соціальні гарантії для військових у період проходження служби. (2025, Листопад 6). *Верховна Рада України*. Взято з https://www.rada.gov.ua/news/news_kom/267509.html.
- Потреби України у розмінуванні скоротилися на \$5 млрд завдяки прогресу в очищенні земель. (2025, Лютий 27). *Звіт RDNA4. Міністерство економіки України*. Взято з <https://me.gov.ua/News/Detail/f9f18a5a-63c1-43d4-8fec-b4dcc721caba>.
- Центр оперативних стандартів і методики підготовки Збройних Сил України. Інженерна підготовка: Довідковий матеріал командирам (інструкторам) для підготовки до проведення занять з інженерної підготовки. (Наказ МО України № 8 від 10.01.2019). Взято з <https://ivms.mil.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/inzhenerna-pidgotovka.pdf>.
- Dalianis, H. (2018). *Evaluation Metrics and Evaluation*. (p. 45–53). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-78503-5_6.
- DJI. (n.d.). D-RTK 2 High-Precision GNSS Mobile Station. Retrieved from <https://www.dji.com/global/d-rtk-2/info>.
- DJI Enterprise. (n.d.). Zenmuse H20 Series: Specs. Retrieved from <https://enterprise.dji.com/zenmuse-h20-series/specs>.
- Heuschmid, D., Wacker, O., Zimmermann, Y., Penava, P., & Buettner, R. (2025). Advancements in landmine detection: Deep learning-based analysis with thermal drones. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*. 1(1), 1–1. DOI: 10.1109/access.2025.3572196.
- Howard, R. M. (2022). Arbitrarily accurate analytical approximations for the error function. *Mathematics and Computational Applications*, 27(1), Article 14. DOI: 10.3390/mca27010014.
- OpenGlobalRights. (n.d.). Addressing the threat that mines pose to civilians in Ukraine. Retrieved from www.openglobalrights.org/addressing-the-threat-that-mines-pose-to-civilians-in-ukraine/?lang=Ukrainian.
- Popov, M., Stankevich, S., Mosov, S., Dugin, S., Golubov, S., Andreiev, A., Lysenko, A., & Saprykin, I. (2024). Concept of a geoinformation platform for landmines and other explosive objects detection and mapping with UAV. *Radioelectronic and Computer Systems*, 4, 207–216. DOI: 10.32620/reks.2024.4.17.
- Shimoi, N., Takita, Y., Nonaml, K., Wasaki, K. (2001). Land Mine Detecting Technology by Using IR Cameras. SICE Annual Conference.
- UN News. (n.d.). Landmines still pose a threat to two million Ukrainians. Retrieved from <https://ukraine.un.org/en/123917-landmines-still-pose-threat-two-million-ukrainians>.

References

- Borodina, O. A., Liashenko, V. I. (2022). Post-war economic recovery: World experience and an attempt to adapt it for Ukraine. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy*, 1(42), 121–134. DOI: 10.37405/17297206.2022.1(42).121-134 (in Ukrainian).
- Centre of Operational Standards and Training Methodology of the Armed Forces of Ukraine. (2019). Engineer training: Reference material for commanders (instructors) for preparation for conducting engineering training classes. (Order Ministry of Defence of Ukraine No. 8 of 10.01.2019). Retrieved from <https://ivms.mil.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/inzhenerna-pidgotovka.pdf> (in Ukrainian).
- Dalianis, H. (2018). *Evaluation Metrics and Evaluation*. (p. 45–53). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-319-78503-5_6.
- DJI. (n.d.). D-RTK 2 High-Precision GNSS Mobile Station. Retrieved from <https://www.dji.com/global/d-rtk-2/info>.
- DJI Enterprise. (n.d.). Zenmuse H20 Series: Specs. Retrieved from <https://enterprise.dji.com/zenmuse-h20-series/specs>.
- Heuschmid, D., Wacker, O., Zimmermann, Y., Penava, P., & Buettner, R. (2025). Advancements in landmine detection: Deep learning-based analysis with thermal drones. *IEEE Access: Practical Innovations, Open Solutions*, 1(1), 1–1. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3572196>.
- Howard, R. M. (2022). Arbitrarily accurate analytical approximations for the error function. *Mathematics and Computational Applications*, 27(1), Article 14. DOI: 10.3390/mca27010014.
- Kurtseiov, T. L., Mosov, S. P., Trembovetskyi, M. P., Yasko, V. A. (2020). Mine weapons in the focus of modern wars and armed conflicts. *Zbirnyk naukovykh prats CVSD NUOU*, 2(69), 116–121. (in Ukrainian).
- Mosov, S., Neroba, V. (2019). Directions of application of unmanned aviation for demining tasks: World experience. *Zbirnyk naukovykh prats NADPSU im. B. Khmelnytskoho*, 1(79), 172–185. (in Ukrainian).
- OpenGlobalRights. (n.d.). Addressing the threat that mines pose to civilians in Ukraine. Retrieved from www.openglobalrights.org/addressing-the-threat-that-mines-pose-to-civilians-in-ukraine/?lang=Ukrainian.
- Parliament adopted as a basis a draft law providing new social guarantees for military personnel during service. (2025, November 6). *Verkhovna Rada of Ukraine*. Retrieved from https://www.rada.gov.ua/news/news_kom/267509.html (in Ukrainian).
- Popov, M., Stankevich, S., Mosov, S., Dugin, S., Golubov, S., Andreiev, A., Lysenko, A., & Saprykin, I. (2024). Concept of a geoinformation platform for landmines and other explosive objects detection and mapping with UAV. *Radioelectronic and Computer Systems*, 4, 207–216. DOI: 10.32620/reks.2024.4.17.
- Shimoi, N., Takita, Y., Nonaml, K., & Wasaki, K. (2001). Land Mine Detecting Technology by Using IR Cameras. SICE Annual Conference.
- Ukraine's demining needs reduced by \$5 billion due to progress in land clearance (2025, February 27). RDNA4 report. *Ministry of Economy of Ukraine*. Retrieved from <https://me.gov.ua/News/Detail/f9f18a5a-63c1-43d4-8fec-b4dcc721caba> (in Ukrainian).
- UN News. (n.d.). Landmines still pose a threat to two million Ukrainians. Retrieved from <https://ukraine.un.org/en/123917-landmines-still-pose-threat-two-million-ukrainians>.
- Zmiiievskyi, H. A., Puhach, V. V., Kurtov, A. I., Chepurnyi, V. P. (2024). *Tactical aerial reconnaissance using unmanned aerial systems: Training manual*. Yaroslav Mudryi National Law University. Retrieved from https://dspace.nlu.edu.ua/bitstream/123456789/20165/1/Takt_pov_rozvidka_2024.pdf (in Ukrainian).

ACCURACY ASSESSMENT OF LANDMINE DETECTION BY INFRARED AERIAL IMAGING

Shklyar S. V. <https://orcid.org/0000-0001-8726-7936>

Andreiev A. A. <https://orcid.org/0000-0002-6485-449X>

Golubov S. I. <https://orcid.org/0000-0003-3711-598X>

State institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine" 55–B, O. Gonchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine

Ukraine is currently one of the most mine-contaminated countries in the world, posing a significant threat to the population, environment, and economic recovery. One promising direction for improving the effectiveness of counter-mine activities is the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) equipped with infrared (IR) cameras for the remote detection of mines and other explosive devices. The objective of this study is to develop and evaluate an approach for automated mine detection using IR images acquired from UAVs.

This work presents an approach to detecting mines and other explosive objects on IR images, which is based on the anomaly detection method with subsequent threshold processing of the results. Based on this approach, a software module was developed using the Python programming language, which includes image display, application of the anomaly detection method, and threshold processing to obtain binary classification maps.

To test this approach, experimental studies were conducted using a DJI Matrice 300 RTK quadcopter equipped with a Zenmuse H20T IR camera. A total of 34 IR images were used, which contained 206 mines of different types. The presented approach was applied to these images, resulting in binary classification maps. After assessing the accuracy, the following indicators were determined: overall accuracy was 89.32%, precision – 0.79, recall – 0.89, and F1-score – 0.84.

The results obtained confirm the effectiveness and practical suitability of the proposed approach for remote mine detection tasks using UAVs. In the future, it is planned to improve the algorithmic part of the method, in particular, to introduce pre-processing stages of IR images and expand testing to different types of mines and shooting conditions.

Keywords: landmine detection, infrared imaging, unmanned aerial vehicle, correct detection probability, false alarm rate, precision, recall, F1-score

*Рукопис статті отримано 07.11.2025
Надходження остаточної версії: 27.11.2025*

Публікація статті: 30.12.2025

Received 07.11.2025

Revised 27.11.2025

Accepted 30.12.2025