

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИЯВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ОБ'ЄКТІВ ПІД ШАРОМ ҐРУНТУ ЗА ДОПОМОГОЮ БЛИЖНЬОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ТЕПЛОВІЗІЙНОГО МОНІТОРИНГУ

¹ПП "Фотоніка Плюс"

²КПІ ім. Ігоря Сікорського

³Державна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук
України"

⁴Вінницький національний технічний університет

Анотація.

На 2 грудня 2024 року потенційно забруднена міно-вибуховими предметами територія України складає близько 139 000 кв.км., на жаль, ця цифра росте і надалі. Враховуючи актуальність задачі автоматизованого виявлення міно-вибухових предметів за допомогою безпілотних літальних апаратів із мультиспектральною та інфрачервоною зйомкою, дослідження можливостей локального інфрачервоного нагріву та тепловізійного моніторингу є важливим кроком у пошуку альтернативних рішень для виявлення прихованих вибухонебезпечних об'єктів.

У роботі досліджено ефективність активної термографії з використанням імпульсного локального нагріву ІЧ-лазером (940 нм, 24 Вт, 5 с) для виявлення прихованих металевих об'єктів на глибині 5 см. Проведено аналіз теплової відповіді за допомогою тепловізора.

Результати показали низьку амплітуду температурної відповіді ($\sim 0,5$ °C), що ускладнює достовірну ідентифікацію об'єктів за умов обмеженої чутливості тепловізійного обладнання. Запропоновано напрями оптимізації методу: підвищення потужності випромінювання при збереженні або навіть скороченні тривалості лазерного впливу, використання динамічного лазерного сканування поверхні, покращення параметрів тепловізора, а також застосування оптичних фільтрів для усунення засвічення матриці.

Отримані висновки мають практичну цінність для створення ефективних систем дистанційного виявлення вибухонебезпечних об'єктів за допомогою БпЛА, що дозволить значно скоротити час розмінування території України, забезпечуючи економічну ефективність і повну безпеку для фахівців.

Ключові слова: активна термографія, інфрачервоне випромінювання, виявлення мін, лазерне зондування, ґрунт, БпЛА

Актуальність.

Методи неінвазивного зондування ґрунту знаходять дедалі ширше застосування у рятувальних операціях (зокрема для пошуку мінно-вибухових пристроїв), геологічних розвідках корисних копалин та збереженні об'єктів культурної спадщини. Сучасні обставини, зокрема широкомасштабна війна, збройна агресія Росії проти нашої держави (станом на 2 грудня 2024 року потенційно забруднена мінно-вибуховими предметами територія України становить близько 139 тис. км², і ця цифра продовжує зростати), зумовлюють необхідність пошуку високоточних і оперативних рішень, що поєднують сучасні технології для пошуку мінно-вибухових пристроїв в умовах, небезпечних для людини. Одним із таких рішень є використання безпілотних літальних апаратів (БпЛА) з апаратурою контролю для пошуку мін,

що, зокрема, розглядається у роботі Попова М. О. та співавт. [1]. Серед перспективних методів, які можна інтегрувати з БПЛА, слід виділити активну термографію, яка поєднує в собі локальне нагрівання ближнім інфрачервоним (ІЧ) випромінюванням досліджуваних ділянок із застосуванням лазерних систем і тепловізійний моніторинг з подальшим аналізом для виявлення прихованих об'єктів.

Металеві предмети мають відмінні фізичні характеристики від ґрунту, зокрема високу теплоємність та теплопровідність, що дозволяє реєструвати теплові зміни, які відбуваються в їх оточенні після термічного впливу на них.

Застосування діодних лазерів з довжиною хвиль ближнього ІЧ-діапазону випромінювання (наприклад 940 нм, 980 нм) може бути безконтактним локалізованим методом використаним в польових умовах для дистанційного впливу на досліджувану ділянку.

Проте успішність експерименту залежить значною мірою від чутливості тепловізійного оснащення, характеристик ґрунту, глибини залягання металевої пластини, правильно обраних параметрів лазерного випромінювання. Саме тому, таке дослідження спрямоване на виявлення меж ефективності такого підходу в практичному застосування.

Мета дослідження.

Встановити ефективність виявлення прихованих металевих об'єктів під шаром ґрунту, шляхом лазерного імпульсного локального нагріву малої тривалості та аналізу теплової відповіді тепловізором.

Матеріали та обладнання.

- Лазер хірургічний діодний "Lika-surgeon+" (надалі лазер), довжиною хвилі 940 нм, максимальна потужність — 30 Вт;
- Світловод SMA-905-SMA-905 (надалі світловод), довжина гнучкої ділянки 2 м, діаметр волокна 300/330 мкм;
- Тепловізор UTi165K (надалі тепловізор), точність виміру: 0,5° С, роздільна здатність: 0,1°С, час відгуку: 500 мс;
- Вимірювач потужності лазерного випромінювання OPHIR у складі: вимірювальний перетворювач L40(250)A-LP2-50, монітор NOVA II DISPLAY ROHS;
- Зразок ґрунту № 1 (чорнозем);
- Зразок ґрунту № 2 (чорнозем);
- Кругла пластина, матеріал – залізо, діаметр 60 мм;
- Контейнери для формування шару ґрунту, висота 22 см, діаметр 27 см.

Зовнішній вигляд експериментальної установки представлено на рис. 1. Схема експериментальної установки представлена на рис. 2.



Рис.1. Зовнішній вигляд експериментальної установки

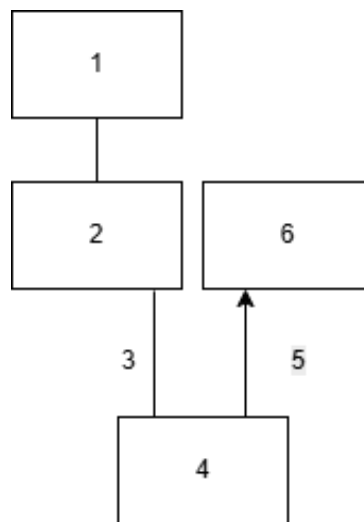


Рис. 2. Схема експериментальної установки:
1 - лазер хірургічний діодний "Lika-surgeon+"; 2 - світловод SMA-905-SMA-905; 3 - лазерне випромінювання; 4 - контейнер з ґрунтом; 5 – теплове випромінювання; 6 - тепловізор UTi165K

Для проведення серії експериментів із врахуванням в майбутньому інтеграції активної термографії з БПЛА обрано наступні параметри лазерного випромінювання довжина хвилі 940 нм, потужністю 24 Вт, тривалість лазерного впливу становила 5 секунд, що на наш погляд відповідає режиму короткочасного локального нагріву, достатнього для ініціації поверхневої теплової реакції, і може бути узгодженою зі швидкістю БПЛА.

Під час підготовки до експериментів було проведено вимірювання вихідної потужності лазерного випромінювання за допомогою вимірювача OPHIR у складі: вимірювальний перетворювач L40(250)A-LP2-50, монітор NOVA II DISPLAY ROHS. Установлені параметри лазера становили: потужність 24 Вт, тривалість впливу — 5 секунд. Результати вимірювань показали, що фактичне значення потужності становить 24,01 Вт, що відповідає заявленим характеристикам.

Перший цикл. Методика проведення.

1. На першому етапі шар ґрунту № 1 товщиною 16 см був сформований у контрольованих умовах без жодного стороннього предмета всередині.

2. На висоті 44 см від шару ґрунту на стійці було розміщено тепловізор і закріплено дистальну ділянку світловоду, через яку виходить, як робоче лазерне випромінювання так і випромінювання лазера-пілота. Робоче випромінювання знаходиться «всередині» контуру (кола) випромінювання лазера-пілота. Проксимальна ділянка світловода – підключалася до лазера.

3. Було зроблено вимірювання температури поверхні ґрунту до лазерного впливу.

4. На поверхню ґрунту впливали ІЧ лазерним випромінюванням довжиною хвилі 940 нм, потужністю 24 Вт, тривалість лазерного впливу становила 5 секунд.

5. Після припинення нагріву лазером проводилась серія вимірів температурної динаміки охолодження за допомогою тепловізора кожні 5 секунд протягом 30 секунд. Після зниження температури до початкового рівня ми завершували перший цикл досліджень.

6. Після завершення першого циклу дослідження ґрунт був частково знятий, і на глибину приблизно 5 см закопана металева пластинка.

7. Поверхня ґрунту була знову вирівняна, і повторно проведений вплив лазером за аналогічною схемою.

8. Впродовж охолодження здійснювалась серія тепловізійних спостережень для виявлення відмінностей у температурному профілі зони, під якою була розташована металева пластинка.

9. На основі серії тепловізійних кадрів виконано обробку даних та побудовано температурну криву охолодження досліджуваної ділянки.

10. Було проведено повторення експериментальної процедури (пункти 1–9) з другим типом ґрунту.

Очікуваний результат. Металева пластинка має інші теплові характеристики (теплопровідність, теплоємність) у порівнянні з ґрунтом, що може призвести до змін у швидкості охолодження в її околі, які фіксуються тепловізором. Це дозволяє виявити наявність прихованого металевих об'єкта.

На рисунках 3 і 4 представлено температурні криві охолодження досліджуваного ґрунту № 1 і ґрунту № 2.

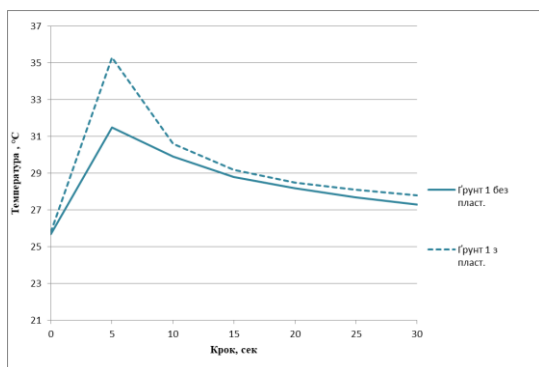


Рис. 3. Температурні криві охолодження досліджуваного ґрунту № 1

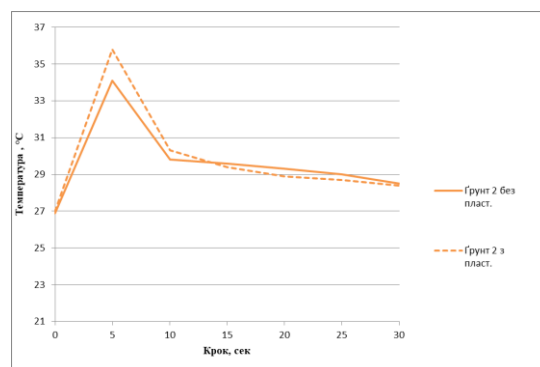


Рис. 4. Температурні криві охолодження досліджуваного ґрунту № 2

В обох випадках (рис.3, рис. 4) спостерігається схожа температурна крива — швидкий нагрів і поступове охолодження. Однак для варіанту з металевою пластиною температури вищі, ніж без пластини.

Другий цикл. Методика проведення.

1. Грунт 1 і Грунт 2 рівномірно змішали між собою і розсипали по контейнерам шаром 16 см. У контейнері № 1 з грунтом були відсутні сторонні предмети, у контейнері № 2 на глибині 5 см було розміщено металеву пластину.

2. На висоті 44 см від шару ґрунту на стійці було розміщено тепловізор і закріплено дистальну ділянку світловоду, через яку виходить, як робоче лазерне випромінювання так і випромінювання лазера-пілота. Робоче випромінювання знаходиться «всередині» контуру (кола) випромінювання лазера-пілота. Проксимальна ділянка світловода – підключалася до апарата.

3. Було зроблено вимірювання температури поверхні ґрунту до лазерного впливу.

4. На поверхню контейнера № 1 впливали ІЧ лазерним випромінюванням довжиною хвилі 940 нм, потужністю 24 Вт, тривалість лазерного впливу становила 5 секунд.

5. Після припинення нагріву лазером проводилась серія вимірів температурної динаміки охолодження за допомогою тепловізора протягом 50 секунд кожні 5 секунд. Після зниження температури до початкового рівня ми завершували перший цикл досліджень.

6. На основі серії тепловізійних кадрів виконано обробку даних та побудовано температурну криву охолодження досліджуваної ділянки

7. Було проведено повторення експериментальної процедури (пункти 2–6) з контейнером № 2 (металева пластина в середині).

8. Після зниження температури до початкового рівня ми завершили другий цикл досліджень і провели повторно експеримент другого циклу.

На рисунках 5 і 6 представлено температурні криві охолодження досліджуваного ґрунту в контейнері № 1 і в контейнері № 2.

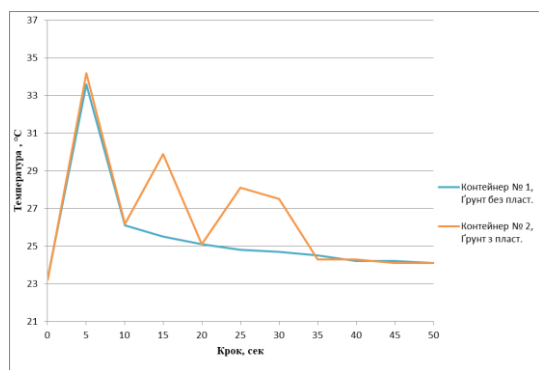


Рис. 5. Температурні криві охолодження - контейнер № 1 без пластини, контейнер № 2 з пластиною

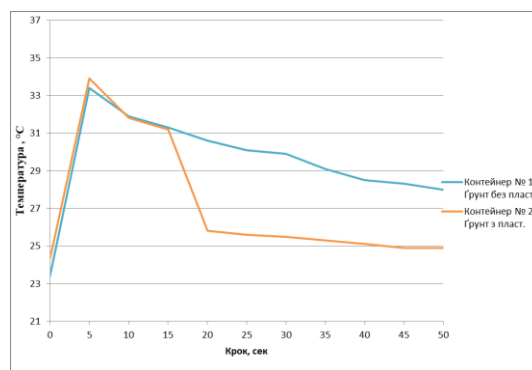


Рис. 6. Температурні криві охолодження контейнер № 1 без пластини, контейнер № 2 з металевою пластиною (повторний експеримент другого циклу)

На рис. 5. Видно різницю між ґрунтом без пластини (контейнер № 1) і ґрунтом з пластиною (контейнер № 2), різниця $+0,6^{\circ}\text{C}$ — невелика, але помітна. Можна впевнено констатувати той факт, що присутність металевої пластини чітко впливає на теплову поведінку системи ґрунт + пластина. У фазі охолодження пластина зберігає тепло довше, ніж навколишній ґрунт. Навіть при мінімальній чутливості тепловізора ($\sim 0,5^{\circ}\text{C}$) різниця перевищує поріг виявлення, особливо в критичні моменти.

На рис. 6 на піку нагріву (заміри 2–3) температура майже однакова в обох випадках, з незначним підвищенням при наявності пластини (до $+0,5^{\circ}\text{C}$). Починаючи з 5-го заміру видно різке охолодження зони з пластиною — від $-2,6^{\circ}\text{C}$ до $-4,8^{\circ}\text{C}$, що контрастує з попередніми експериментами, де метал сприяв утриманню тепла.

Перспективи досліджень.

Для подальших досліджень і враховуючі отримані результати, необхідно:

1. Збільшити енергетичну дозу лазерного випромінювання за рахунок збільшення потужності при збереженні або навіть скороченні тривалості лазерного впливу.
2. Для зменшення часу нагріву ґрунту можна реалізувати динамічне лазерне сканування поверхні замість статичного нагріву, що дозволить адаптувати метод до умов руху БПЛА та скоротити загальний час.
3. Використовувати тепловізори з вищою чутливістю ($\leq 0,1$ °C) та коротшим часом відгуку.
4. Доцільним є застосування оптичних фільтрів, які блокують ближнє інфрачервоне випромінювання лазера, що потрапляє безпосередньо в об'єкти тепловізора. Це дозволить уникнути можливого засвічення сенсора та покращити точність фіксації слабких температурних аномалій.
5. Здійснити дослідження різних типів ґрунтів (пісок, суглинок, чорнозем) для оцінки їх впливу на теплопередачу.
6. Виконати серію експериментів із зміною глибини закладення пластини (1 – 5 см) для визначення оптимальної глибини виявлення.
7. Розробити алгоритм обробки температурних часових рядів для виявлення малих аномалій на фоні шуму.

Висновки.

Отримані результати свідчать про те, що за обраних параметрів випромінювання (довжина хвилі 940 нм, потужність 24 Вт, тривалість 5 с) метод активної термографії демонструє обмежену здатність до достовірного виявлення прихованих металевих об'єктів на глибині 5 см. Ймовірною причиною є як незначна теплова інерція короткотривалого впливу, так і недостатня роздільна здатність тепловізора. Надалі доцільним є проведення додаткових експериментів із варіацією параметрів нагріву (збільшення потужності при збереженні або навіть скороченні тривалості лазерного впливу), використанням динамічного лазерного сканування поверхні, глибини залягання об'єктів, характеристик ґрунту. Зокрема, доцільним є використанням тепловізорів з вищою температурною роздільною здатністю і використанням оптичних фільтрів перед об'єктивом тепловізора, які блокують ближнє інфрачервоне випромінювання лазера, що потрапляє безпосередньо в об'єкти тепловізора. Це дозволить уникнути можливого засвічення сенсора та покращити точність фіксації слабких температурних аномалій.

Оптимізація та застосування запропонованого методу у роботах по дистанційному виявленні вибухово-небезпечних об'єктів за допомогою БПЛА дозволить значно скоротити час на розмінування території України при значних економічних перевагах над існуючими технологіями та абсолютно безпечно для фахівців.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.

1. Попов М. О., Станкевич С. А., Мосов С. П., Титаренко О. В., Дугін С. С., Голубов С. І., Андреев А. А. Технологія автоматизованого виявлення мін за результатами комплексування багатоспектральної та інфрачервоної зйомки з безпілотних літальних апаратів // Матеріали IV науково-практичної конференції «Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи», 9–10 вересня 2021 р., м. Київ. – Київ, 2021. – С. 13–15.

Комарова Ольга Сергіївна інженер-технолог ПП "Фотоніка Плюс", м. Черкаси, аспірантка КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПБФ, кафедра «Виробництва приладів», м. Київ, e-mail: komarova.ollha@gmail.com.

Холін Володимир Вікторович к.т.н., директор ПП «Фотоніка Плюс», м. Черкаси, e-mail: info@fotonikaplus.com.ua.

Забулонов Юрій Леонідович академік НАН України, д.т.н., проф., директор державної установи "Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України", м. Київ, e-mail: 1952ZYL@gmail.com.

Павлов Сергій Володимирович д.т.н., проф. кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця, e-mail: psv@vntu.edu.ua.

Івлєв Ярослав Олександрович інженер-конструктор ПП "Фотоніка Плюс", м. Черкаси, e-mail: ya.ivlev.fp@gmail.com.

EXPERIMENTAL STUDY ON THE POSSIBILITY OF DETECTING METAL OBJECTS UNDER A LAYER OF SOIL USING NEAR-INFRARED RADIATION AND THERMAL IMAGING MONITORING

Abstract. As of December 2, 2024, approximately 139,000 km² of Ukraine's territory is potentially contaminated with explosive remnants of war (ERW), and unfortunately, this figure continues to grow.

Considering the urgency of developing automated solutions for detecting explosive devices using unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with multispectral and infrared imaging systems, the study of localized infrared heating and thermal monitoring methods is a crucial step in the search for alternative approaches to detect hidden explosive hazards.

This work investigates the effectiveness of active thermography using pulsed localized heating with a near-infrared (NIR) laser (940 nm, 24 W, 5 s) for detecting concealed metallic objects buried at a depth of 5 cm. Thermal responses were recorded and analyzed using a thermal imaging camera.

The results revealed a low amplitude of thermal response (~ 0.5 °C), which complicates reliable identification of objects under the current sensitivity limits of the thermal imaging equipment. Several optimization directions are proposed: increasing the laser power while maintaining or even reducing the heating duration, implementing dynamic laser surface scanning, improving thermal imager parameters, and applying optical filters to eliminate sensor flare caused by direct laser exposure.

The findings have practical significance for the development of effective UAV-based remote detection systems for explosive objects, which can significantly reduce demining time across Ukraine's territory while offering major economic benefits over existing technologies and ensuring complete safety for personnel.

Keywords: active thermography, infrared radiation, mine detection, laser probing, soil, UAV

Olha Komarova Process Engineer in Fotonica Plus Co, Cherkasy, Postgraduate Student of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, IMF, Department of "Instrument Manufacturing", Kyiv, e-mail: komarova.ollha@gmail.com.

Volodymyr Kholin Ph.D., Director of Fotonica Plus Co, Cherkasy, e-mail: info@fotonikaplus.com.ua.

Yuriy Zabulonov Academician of the NAS of Ukraine, D.Sc., Prof., Director of SI "IEG", Kyiv, e-mail: 1952ZYL@gmail.com.

Sergii Pavlov Ph.D., Prof. of the Department of Biomedical Engineering and Optical-Electronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: psv@vntu.edu.ua.

Yaroslav Ivliev Design Engineer of Fotonica Plus Co, Cherkasy, e-mail: ya.ivlev.fp@gmail.com.