



ПОПОВ
Михайло Олексійович — член-кореспондент НАН України, директор Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України»

ТЕХНОЛОГІЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ВИЯВЛЕННЯ МІН НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ МАТЕРІАЛІВ ЗЙОМКИ З БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Стенограма доповіді на засіданні
Президії НАН України 6 квітня 2022 року

У доповіді йдеться про актуальну розробку співробітників Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України» — технологію дистанційного пошуку та виявлення вибухонебезпечних об'єктів для розмінування територій, основу на аналізі матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів. Роботи виконувалися в рамках проекту науково-технічної програми НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави». Успішно проведено польові дослідження. Далі для доведення зазначеної розробки до стадії впровадження необхідно створити дослідний зразок бортового комплексу для дистанційного виявлення мін на базі сертифікованого безпілотного літального апарата, оснащеного малогабаритним георадаром.

Вельмишановний Анатолію Глібовичу!

Вельмишановні члени Президії!

Сьогодні я маю можливість доповісти про одну з розробок Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України — технологію дистанційного виявлення мін на основі аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів.

Загалом розмінування територій, забруднених вибухонебезпечними предметами, є однією з глобальних проблем, але особливо гостро вона постала сьогодні для України. Ще до початку широкомасштабної воєнної агресії Російської Федерації 24 лютого 2022 р. Україна була на 4-му місці, після Афганістану, Малі та Ємену, за кількістю жертв від вибухонебезпечних предметів. Лише в період 2014—2019 рр. унаслідок підривів на мінах та інших вибухонебезпечних залишках постраждали 833 цивільні особи, з яких 269 загинули, решта зазнали поранень

різного ступеня тяжкості та каліцтва. Кожна десята жертва — дитина. На жаль, тепер у зв'язку з активними бойовими діями на території нашої держави ситуація з мінним забрудненням набула катастрофічного характеру.

За даними Асоціації саперів України, станом на кінець березня 2022 р. орієнтовна загальна площа потенційно небезпечної території України, яка підлягає процедурам гуманітарного розмінування, становить щонайменше 82,5 тис. км², і ця цифра, безумовно, ще зростатиме. Після визволення Київської області від російських загарбників лише за одну добу, 3 квітня, було виявлено близько 1 тис. снарядів та мін.

На сьогодні у світі є досить багато способів і різноманітних систем, призначених для вирішення проблем гуманітарного розмінування. Переважно це технічні прилади, якими безпосередньо користується демінер (сапер), а також мобільні наземні системи з різним ступенем автономності. Проте, на жаль, при використанні наземних систем розмінування постають значні ризики, пов'язані з пошкодженням спеціальної техніки і, що найголовніше, із загрозами життю особового складу, — практичний досвід свідчить, що на кожні 5 тис. знешкоджених мін припадає один загиблий і двоє травмованих саперів. Крім того, такі наземні системи і технічні засоби не дозволяють досягти достатньої оперативності при обстеженні великих площ, оскільки процес обстеження мінних полів за допомогою наземного пошукового обладнання потребує багато часу.

На відміну від наземних систем і технологій розмінування територій дистанційні методи виявлення мін дають реальну можливість уникнути зазначених вище недоліків. Тому розроблення методів і технологій виявлення мін та міноподібних об'єктів на основі автоматизованого аналізу матеріалів аерозйомки з пілотованих та непілотованих літальних апаратів є, безумовно, актуальним і практично важливим напрямом досліджень.

У 2020 р. після звернення заступника начальника Генерального штабу Збройних Сил України до Національної академії наук Укра-

їни перед співробітниками Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України було поставлено завдання з розроблення нової технології дистанційного виявлення мін на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів. Роботи виконувалися в рамках проекту науково-технічної програми НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищення обороноздатності і безпеки держави».

Метою проекту було визначено підвищення ефективності розмінування внаслідок створення технології автоматизованого виявлення мін на багатоспектральних зображеннях, одержуваних з безпілотних літальних апаратів вертолітного типу (квадрокоптер, мультикоптер). Для її досягнення потрібно було розробити класифікацію мін як об'єктів повітряної розвідки, запропонувати методіку побудови бібліотеки спектральних характеристик мін і сформував прототип такої бібліотеки. Ми провели лабораторні дослідження на навчальних мінах, а потім і польові дослідження на реальних мінах з використанням квадрокоптера зі встановленою на ньому видовою апаратурою для аерозйомки: RGB-камера, ІЧ-камера, мультиспектральна камера. За результатами цих досліджень було розроблено пілотну технологію автоматизованого виявлення мін на багатоспектральних зображеннях з безпілотних літальних апаратів.

Далі я докладніше розповім про кожний з етапів проведення цих робіт.

Ще до початку реалізації проекту Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі вже мав певний доробок і апаратну базу для проведення досліджень. Це квадрокоптери різних модифікацій (Phantom 4 Multispectral, Bebop Pro Thermal, Phantom 3 Standard), багатоспектральна камера DMS, інфрачервона камера One Pro, професійний тепловізор Fluke Ti-110, польовий спектро радіометр ASD FieldSpec 3FR високої роздільної здатності, призначений для більш швидкого і точного вимірювання спектральних даних, система реєстрації мінливості параметрів середовища STS-VIS.

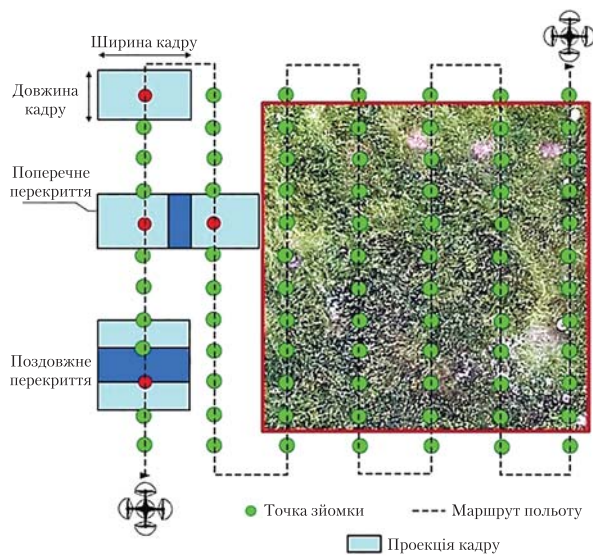


Рис. 1. Типовий маршрут польоту безпілотної літального апарата при плануванні зйомки місцевості

У попередніх дослідженнях було проаналізовано можливість виявлення мін на основі спектральних характеристик земної поверхні. За допомогою спектрометра ASD FieldSpec 3FR отримано прецизійні спектри оптичного відбиття типових зразків металевих і пластикових мін, протитанкових і протипіхотних, відкритих і замаскованих.

Потім було проаналізовано спектральні характеристики основних класів природних об'єктів, які трапляються на місцевості і на фоні яких можуть розміщуватися об'єкти пошуку. Це гірські породи і ґрунти, рослинність (зелена та суха трава), сніговий покрив, водні поверхні тощо. Отримано результати лабораторних досліджень з виявлення за допомогою тепловізорів з використанням штучного освітлення протипіхотних і протитанкових мін як на поверхні ґрунту, так і частково замаскованих або закопаних у ґрунті.

Аналіз отриманих результатів дав змогу сформулювати базові методологічні положення, а саме:

- дані щодо фізичних властивостей поверхневого шару земної поверхні містять індикативну інформацію стосовно наявності або відсутності міни у певній ділянці ґрунту;

- для отримання даних щодо фізичних властивостей ділянок земної поверхні можна застосовувати видові технічні засоби (сенсори), встановлені на мобільній авіаційній платформі;

- рішення щодо наявності або відсутності міни приймається на основі автоматизованого комплексного аналізу даних, отриманих різними бортовими видовими технічними засобами (сенсорами).

На цих базових методологічних принципах і було побудовано процес розроблення технології виявлення мін, встановлено послідовність виконання відповідних процедур:

- 1) планування аерозйомки;
- 2) проведення аерозйомки;
- 3) попереднє оброблення отриманих матеріалів;
- 4) виготовлення цифрових фотомозаїк;
- 6) згладжування цифрових фотомозаїк;
- 7) піксельна класифікація цифрових фотомозаїк;
- 8) прийняття рішення;
- 9) документування.

Типовий маршрут польоту безпілотної літального апарата з інфрачервоними і багатоспектральними пристроями на борту при плануванні зйомки місцевості наведено на рис. 1.

Отримані під час аерозйомки дані потребують подальшої класифікації. Фотомозаїки багатоспектральних і теплових (ІЧ) зображень класифікують окремо і незалежно одна від одної.

Для аналізу фотомозаїки багатоспектральних зображень використовували метод бінарної логістичної регресії. При цьому кожен піксель фотомозаїки залежно від унікальності сигналу може належати до одного з двох класів: належність до першого класу означає, що цей піксель відображає елемент місцевості, на якому є міна, до другого класу — без міни. Однак при розпізнаванні ми зіткнулися з низкою проблем, пов'язаних як з різноманіттям природних фонів, так і з тим, що самі міни можуть характеризуватися непрямими ознаками, а це означає, що гіпотеза компактності не підтверджується і за допомогою простих методів не

вдається чітко виділити сигнали від об'єктів пошуку. Тому було розроблено спеціальний алгоритм структуризації навчальної вибірки, сформовано критерій роздільності DP (discriminatory power), що дало змогу значно підвищити ефективність класифікації фотомозаїк багатоспектральних зображень.

При класифікації фотомозаїк теплових (ІЧ) зображень також застосовували спеціалізований алгоритм, але в цьому разі особливих проблем з чіткістю розділення пікселів на класи не виникло.

Далі інформація, отримана при попиксельній класифікації цифрових фотомозаїк як багатоспектральних, так і теплових зображень, об'єднується і за допомогою баєсового підходу складається функція правдоподібності, в яку підставляють отримані дані, знаходиться поріг, і за його значенням приймається рішення щодо наявності або відсутності об'єкта пошуку.

Після завершення етапу теоретичних і практичних досліджень новостворену технологію дистанційного виявлення мін на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів потрібно було випробувати в реальному експерименті. У червні 2021 р. розпочалися комплексні польові дослідження на реальних об'єктах. Затверджена командуванням Сил підтримки Збройних Сил України методика цих випробувань передбачала підготовчий етап, проведення пілотних досліджень на тестових ділянках полігону разом із фахівцями Навчально-тренувального центру інженерних військ та військ радіаційного, хімічного, біологічного захисту, оброблення отриманих даних і оцінку ефективності пропонуваної розробки.

Як об'єкти пошуку використовували більше десяти різних видів реальних протипіхотних і протитанкових мін, які були заглиблені і замасковані на місцевості (рис. 2). Зйомку проводили з різних висот, за різних метеоумов, у різні добові періоди, при різному освітленні, на різних типах ґрунтів (рослинний покрив, пісок, дрібнофракційний гравій, пісок, перемішаний з гравієм, тощо). З'ясувалося, що в першій половині дня краще виявляються міни

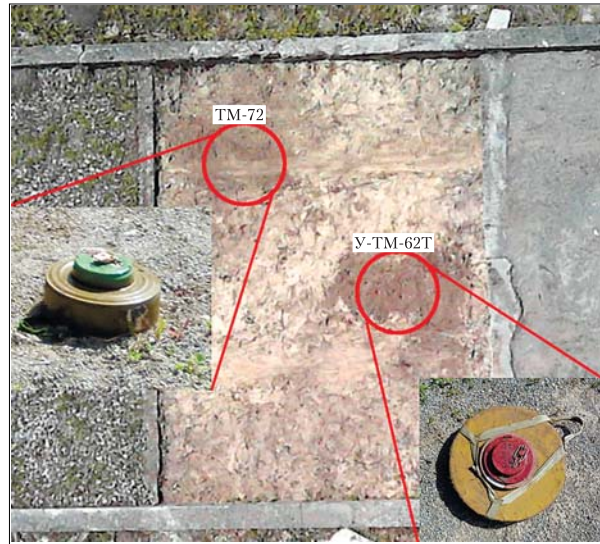


Рис. 2. Приклади розміщення мін на місцевості

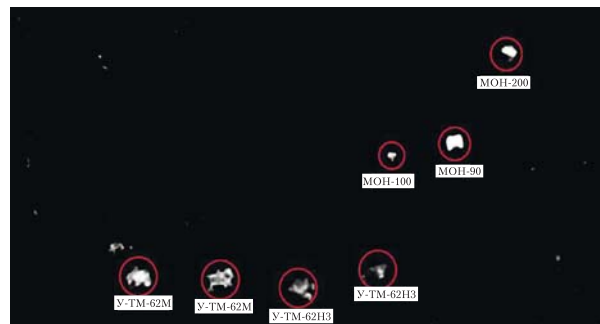


Рис. 3. Приклад представлення інформації для оператора-демінера

у пластиковому корпусі, у другій — в металевому. Це пов'язано з тим, що впродовж світлового дня металевий корпус розігрівається, і під вечір, коли температура повітря починає знижуватися, він чіткіше виокремлюється на теплових зображеннях. Деякі міни можна розпізнати з великої висоти, деякі — лише з висоти кількох метрів.

Крім того, перед нами стояло ще одне завдання — представити отриману інформацію в найбільш зручному для оператора-демінера вигляді. Його також було успішно вирішено. Приклад синтезу багатоспектральних і теплових зображень показано на рис. 3.

Результати експериментальних досліджень, проведених на тестових ділянках з реальними об'єктами пошуку

Тип зйомки	Імовірність правильного виявлення	Імовірність хибної тривоги
Багатоспектральний	0,92	0,37
Інфрачервоний	0,91	0,45
Комбінований	0,918	0,416

Узагальнені результати польових випробувань наведено в таблиці.

Як бачимо, ймовірність правильного виявлення мін є досить високою і відповідає світовим вимогам до подібних систем військового призначення, але для цілей гуманітарного розмінування ефективність технології має бути більшою, що потребує додаткового апаратного вдосконалення.

З іншого боку, випробування засвідчили порівняно високу ймовірність хибної тривоги, що, безумовно, є серйозним недоліком системи. Це пов'язано з тим, що розроблена технологія основана на визначенні непрямих ознак об'єктів пошуку, тобто на вимірюванні оптичних сигналів. Зазначеної проблеми можна уникнути, якщо до спорядження системи додати георадар, який дозволяє, так би мовити, «заглянути» під поверхневий шар ґрунту і побачити розміри об'єкта.

Крім того, для доведення запропонованої технології до рівня розробки, готової до впровадження, у випробуваннях потрібно використовувати лише ті технічні засоби та інформаційні продукти, які належним чином сертифіковані для використання у Збройних Силах України.

Результати, отримані при виконанні проекту науково-технічної програми НАН України «Дослідження і розробки з проблем підвищен-

ня обороноздатності і безпеки держави», оприлюднено в низці публікацій [1–8], а на окремі складові елементи нової технології оформлено 5 заявок на патентування розроблених нових способів та засобів дистанційного виявлення мін. На сьогодні на 2 заявки вже отримано позитивні рішення.

Отже, результати експериментальних досліджень, проведених з використанням заглиблених і замаскованих реальних мін різних типів на тестових ділянках Навчального центру інженерних військ та військ радіаційного, хімічного, біологічного захисту спільно з потенційними користувачами розробленої нами технології — фахівцями інженерних військ Сил підтримки Збройних Сил України, загалом засвідчили ефективність нової технології дистанційного виявлення мін на основі автоматизованого аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів.

З метою уникнення виявлених під час випробувань недоліків запропоновано вдосконалену технологічну схему дистанційного виявлення мін, за якою до складу бортового комплексу, крім багатоспектральної та інфрачервоної камери, потрібно додати малогабаритний бортовий георадар. Наступним кроком має бути доведення запропонованої технології до рівня, якому мають відповідати техніка та інформаційні продукти військового призначення. Сформульовано пропозиції щодо проведення дослідно-конструкторських робіт, результатом яких має стати виготовлення дослідного зразка бортового комплексу для дистанційного виявлення мін на базі безпілотного літального апарата, прийнятого на озброєння Збройних Сил України.

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

REFERENCES

[СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Popov M.O., Stankevich S.A., Mosov S.P., Titarenko O.V., Topolnytskyi M.V., Dugin S.S. Landmine detection with UAV-based optical data fusion. *IEEE EUROCON 2021*. Proc. 19th Int. Conf. Smart Technologies. P. 201–204. <https://doi.org/10.1109/EUROCON52738.2021.9535553>
2. Popov M.O., Stankevich S.A., Mosov S.P., Titarenko O.V., Dugin S.S., Golubov S.I., Andreev A.A. Technology of automated mine detection based on the results of complexing multispectral and infrared scanning from unmanned aerial vehicles. In: *Aerospace technologies in Ukraine: problems and prospects*: Proc. IV Sci. Conf. (Kyiv, 2021). P. 13–15.
[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. У кн.: *Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи*: тези доповідей IV науково-практичної конференції. Київ: НЦУВКЗ, 2021. С. 13–15.]
3. Popov M.A., Stankevich S.A., Mosov S.P., Titarenko O.V., Dugin S.S., Pilipchuk V.V., Andreev A.A. A system for operational mapping of mined areas based on the analysis of aerial photography from small unmanned aerial vehicles. In: *Topical aspects of improving border security*: Proc. Int. Sci. Conf. (Almaty, Kazakhstan, 2021). P. 22–28.
[Попов М.А., Станкевич С.А., Мосов С.П., Титаренко О.В., Дугін С.С., Пилипчук В.В., Андреев А.А. Система оперативного картирования заминированных площадей на основе анализа материалов аэросъёмки с малых беспилотных летательных аппаратов. В кн.: *Актуальные аспекты совершенствования пограничной безопасности*: матер. междунар. науч.-практ. конф. (Алматы, Казахстан, 2021). С. 22–28.]
4. Popov M.O., Stankevich S.A., Mosov S.P., Titarenko O.V., Dugin S.S. Automated detection of mines on multispectral images of centimeter resolution. In: *Creation and Modernization of Arms and Military Equipment in Modern Conditions*: Proc. XX Sci. Conf. (Chernihiv, 2020). P. 205–207.
[Попов М.О., Станкевич С.А., Мосов С.П., Титаренко О.В., Дугін С.С. Автоматизоване виявлення мін на багатоспектральних зображеннях сантиметрової розрізненості. В кн.: *Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах*: зб. тез XX наук.-техн. конф. Чернівці: ДНДІ ВС ОБТ, 2020. С. 205–207.]
5. Popov M.O., Stankevich S.A., Titarenko O.V., Dugin S.S. Possibilities of automated mine detection using multispectral aerial photography from small unmanned aerial vehicles. In: *Actual aspects of improving the border security of the state*: Proc. Int. Sci. Conf. (Almaty, Kazakhstan, 2020). P. 73–79.
[Попов М.А., Станкевич С.А., Титаренко О.В., Дугін С.С. Возможности автоматизированного обнаружения мин при помощи многоспектральной аэросъёмки с малых беспилотных летательных аппаратов. В кн.: *Актуальные аспекты совершенствования пограничной безопасности государства*: матер. междунар. науч.-практ. конф. Алматы: ПА КНБ РК, 2020. С. 73–79.]
6. Mosov S.P., Dugin S.S., Saliy S.M., Stankevich S.A., Titarenko O.V. Detection of mines by UAV equipment using precision spectrometric measurements. *Shekara*. 2020. (2): 109–116.
[Мосов С.П., Дугін С.С., Салий С.М., Станкевич С.А., Титаренко О.В. Обнаружение мин аппаратурой БПЛА с использованием прецизионных спектрометрических измерений. *Шекара*. 2020. № 2. С. 109–116.]
7. Stankevich S.A., Gerda M.I. Small-size target's automatic detection in multispectral image using equivalence principle. *Central European Researchers Journal*. 2020. 6(1): 1–9.
8. Popov M.O., Stankevich S.A., Dugin S.S., Golubov S.I. Infrared remote sensing: resolution estimating and enhancement. In: *Aerospace technologies in Ukraine: problems and prospects*: Proc. III Sci. Conf. (Kyiv, 2019). P. 27–28.

Mykhailo O. Popov

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, Institute of Geological Sciences,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1738-8227>

REMOTE MINE DETECTION TECHNOLOGY BASED ON THE ANALYSIS
OF SURVEY MATERIALS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES: STATUS AND PROSPECTS

Transcript of the report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, April 6, 2022

The report presents the current development of the State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth, Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Ukraine” – a technology for remote search and detection of explosive devices for demining of territories, based on the analysis of survey materials from unmanned aerial vehicles. The works were carried out within the framework of the scientific and technical program of the NAS of Ukraine “Research and developments on the problems of improving the defense capabilities and security of the state.” Field research has been successfully conducted. Further, in order to bring this technology to the stage of implementation, it is necessary to create a prototype of on-board complex for remote mine detection on the basis of certified unmanned aerial vehicle equipped with a small georadar.