

Станкевич С. А., доктор технічних наук, професор<sup>1</sup> (0000-0002-0889-5764)  
Урський О. С., доктор технічних наук<sup>2</sup> (0000-0001-8118-9869)  
Мосов С. П., доктор військових наук, професор<sup>3</sup> (0000-0003-0833-3187)  
Саприкін Є. Ю.<sup>1</sup> (0009-0004-2347-3756)

<sup>1</sup> – Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ;

<sup>2</sup> – Прогрестех-Україна, Київ;

<sup>3</sup> – Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Київ

## Використання непрямих ознак для виявлення наземних мін з використанням безпілотних літальних апаратів

**Резюме.** Запропоновано підхід до використання непрямих ознак мінування, в якості яких розглядаються штучні предмети місцевості, для виявлення наземних мін на цифрових оптичних зображеннях, що отримуються з безпілотних літальних апаратів. Підхід реалізується в межах імовірнісної моделі виявлення мін, за якою працюють більшість сучасних методів машинного навчання для обробки зображень. Використовується байєсівське злиття модифікованих імовірностей непрямих ознак з подальшим також байєсівським підсумовуванням з імовірністю виявлення основного об'єкта – міни. Продемонстровано придатність цього підходу до взаємодії із сучасними нейронними мережами для розпізнавання зображень. Підхід розробляється Науковим центром аерокосмічних досліджень Землі завдяки підтримці Національної академії наук України.

**Ключові слова:** наземна міна; безпілотний літальний апарат коптерного типу; аерознімання, непряма ознака.

Останнім часом міжнародне співтовариство все глибше усвідомлює масштаби та гостроту проблем, що породжуються мінами та вибухонебезпечними залишками війн, у тому числі боєприпасами, що не розірвалися [1]. З початком широкомасштабного вторгнення (24.02.2024) проблема розмінування потенційно забруднених місць для України (25 %) стала наріжним камінням життєдіяльності українців, особливо в сфері сільськогосподарства, яка щорічно має забезпечувати виконання продовольчої програми, у тому числі й на міжнародному рівні [2, 3].

Одним із перспективних світових підходів для розв'язання проблеми розмінування є виявлення наземних мін із застосуванням безпілотних літальних апаратів (далі – БпЛА) [4–6]. Для виявлення мін на поверхні ґрунту або мін, розташованих у ґрунті, використовуються різні конфігурації датчиків, що встановлюються на БпЛА [7] і діють, як правило, у різних діапазонах довжин хвиль електромагнітного спектру, формуючи при цьому різні сигнатури мін в інтересах забезпечення максимальної величини ймовірності  $P_e$  їх виявлення.

Разом з тим, використання прямих ознак наземних мін при способі оптичного аерознімання не завжди забезпечує виявлення

мін, що потребує врахування додаткових демаскуючих ознак, які залишаються (проявляються) після установки наземних мін [8], і які можуть бути в подальшому використані як непрямі ознаки.

**Постановка проблеми.** Виявлення наземних мін на цифрових оптичних аерозображеннях, що отримуються за допомогою датчиків, установлених на БпЛА [7, 9], має свої особливості. Це пов'язано з тим, що датчики оптичного діапазону є пасивними і реєструють оптичний сигнал, який відбивається від наземного об'єкта (поверхні ґрунту – фону). До того ж функціонування повнокольорових і багатоспектральних цифрових камер залежить від освітленості аероландшафту, а інфрачервоні – від різниці температур між об'єктом та фоном.

За умов використання датчиків оптичного діапазону часто виникає проблемна ситуація виявлення мін по їх цифрових зображеннях із потрібною для виявлення ймовірністю  $P_e$ . Виконання завдань виявлення мін, як показує аналіз, може відбуватися протягом доби, у різних погодних умовах і в різні періоди року, що, обмежує можливості датчиків оптичного діапазону для виявлення прямих ознак внаслідок несприятливих атмосферних умов, а також впливу завад,

таких як звичайна трава, висока суха трава, розмитість поверхні ґрунту, шар снігу тощо [10].

Усе це вимагає визначення наукового підходу, який дозволяє збільшити значення величини  $P_e$  під час виявлення наземних мін шляхом використання разом з прямими ознаками демаскуючих непрямих ознак, які характерні для різних типів мін і способів їх встановлення [8, 11].

При цьому слід зазначити, що питання врахування додаткових демаскуючих ознак, що проявляються з часом після встановлення мін (пожухла різнокольорова трава в оточенні місця знаходження міни від хімічного впливу внаслідок розгерметизації корпусу міни, засохла трава над місцем встановлення міни, просідання ґрунту над місцем встановлення міни тощо) неоднократно досліджувалося [12]. Разом з цим, питання виявлення мін за допомогою оптичних даних з урахуванням додаткових демаскуючих ознак, що залишаються після установки мін (приладдя з комплектів мін, запобіжні чеки, ключі для закручування (викручування) детонаторів, залишки мотузок і дроту тощо), залишається слабо дослідженим.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями, пов'язаними із застосуванням БпЛА для виявлення наземних мін з використанням встановлених на них датчиків оптичного діапазону займалася і займається низка українських та іноземних фахівців і вчених.

Так, у [4] авторами наведено результати аналізу сучасного досвіду іноземних країн щодо застосування БпЛА для вирішення завдань повітряної розвідки наземної мінної обстановки, виявлення та дистанційного знищення мін як у ході бойових дій, так і в прифронтовій полосі та на державному кордоні, а також досліджено досвід низки іноземних країн щодо використання різноманітних датчиків, що встановлюються на БпЛА, для виявлення та знищення мін.

У колективній праці [7] акцентується увага на технології виявлення наземних мін з використанням сигнатур від датчиків оптичного діапазону довжин хвиль електромагнітного спектру, що отримуються у різних умовах застосування БпЛА.

У [13] наведено спосіб конфігурації датчиків спостереження (розвідки) на мініатюрному безпілотнику мультикоптерного типу зі змінним модулем збирання і передавання даних. До можливих датчиків повітряного спостереження (цивільної

розвідки) у корпусі змінного модуля, що можуть встановлюватися на борту БпЛА, відносяться: чорно-білі та кольорові відеокамери; інфрачервоні датчики; багатоспектральні цифрові камери; гіперспектральні камери; радары із синтезованою апертурою, лазерні сканери (лідари).

У способі [14] конфігурації датчиків моніторингу на борту БпЛА для дистанційного виявлення, підтвердження та підризу вибухових пристроїв (мін, саморобних вибухових пристроїв тощо) у ґрунті запропоновані модулі оптичного, теплового, хімічного та радіолокаційного виявлення мін без визначення умов і факторів, що впливають на імовірність виявлення мін із застосуванням БпЛА і датчиків.

У праці [15] розглянуто підходи країн НАТО до розвідки і подолання мінних полів в умовах сучасних війн. Одним з підходів зазначається можливість використання інфрачервоних датчиків.

У праці [16] авторами обґрунтовано доцільність використання способу повітряної розвідки з використанням БпЛА районів інтенсивного застосування мінної зброї, а також запропоновано деякі тактичні прийоми застосування БпЛА та зазначені вимоги.

Розвиток методів виявлення та класифікації об'єктів за допомогою нейронних мереж не оминув проблему виявлення мін з використанням БпЛА. Міни, що лежать на поверхні ґрунту, є лише частиною проблеми, простішою у порівнянні з прихованими мінами, але від цього не менш актуальною. Встановлення мін у ґрунт є трудомістким і потребує людських ресурсів, у той час як поверхневе встановлення мін може здійснюватися роботизованими засобами або через застосування касетних боєприпасів.

Для мін, що лежать на поверхні, іноземні групи дослідників ще кілька років тому почали пропонувати рішення, засновані на згорткових нейронних мережах [17]. На певному етапі перевагу мали мережі архітектури Faster R-CNN [18], але згодом на перший план вийшли мережі архітектури YOLO [19], що підтверджується низкою публікацій [20–22]. Запорукою успішного застосування нейромереж є достатня кількість даних для навчання, що у випадку виявлення мін з БпЛА не завжди є у наявності, оскільки потребує не пошуку серед даних у відкритому доступі, а робіт зі збору даних на спеціалізованих полігонах. Іноземні дослідники інколи облаштовують такі

майданчики самостійно на базі своїх наукових установ [23], в Україні ж такі роботи можливі лише на військових полігонах. У будь-якому випадку, кількість реальних отриманих зображень завжди є обмеженою і недостатньою для навчання нейромережі. Інколи дослідниками розробляються досить складні методи подолання цієї проблеми, наприклад генерація зображень із використанням 3D-моделювання [24]. Але частіше за все використовуються методи збільшення обсягу даних шляхом ряду перетворень наявних зображень [25]. Спираючись на наявні публікації, можна стверджувати, що виявлення мін із використанням БПЛА та нейронних мереж перебуває у стадії активного розвитку, однак рішення, що б задовольняло всі потреби і відповідало на всі виклики, поки що не запропоновано.

Деякі іноземні та вітчизняні приватні компанії декларують наявність робочих платформ для виявлення мін із використанням БПЛА та штучного інтелекту [26, 27], але публікації про конкретні архітектури нейромереж і набори даних, що вони застосовують, відсутні, тому важко оцінити прогрес цих технологій у порівнянні із публікаціями дослідників із науково-дослідних установ.

Незважаючи на значну кількість праць, що присвячені питанням застосування БПЛА для виявлення наземних об'єктів і мін як в Україні, так і за її межами, питання виявлення мін за допомогою оптичного об'єднання даних і з урахуванням додаткових демаскуючих ознак – слідів мінування, що залишаються після установки мін (приладдя з комплектів мін, запобіжні чеки, ключі для закручування (викручування) детонаторів, залишки мотузок і дроту тощо), залишається в стані актуальних.

**Мета статті** – обґрунтування способу підвищення ймовірності  $P_e$  виявлення наземних мін за допомогою обробки оптичних даних та об'єднання результатів з урахуванням додаткових демаскуючих ознак, що залишаються після установки мін.

**Виклад основного матеріалу.** Дешифрування мінно-вибухових загороджень (далі – МВЗ) по матеріалах повітряної

розвідки, згідно пп.2.8.4 наказу начальника ГШ – Головнокомандувача Збройних Сил України від 19.10.2016 № 390 [28] слід виконувати на основі знання їх демаскуючих ознак. До основних демаскуючих ознак указаних загороджень відносяться:

форма зображень, властива окремим мінам, групам мін, мінним полям або протидесантним загородженням; розміри зображень; тип зображень; тінь, яка падає від об'єктів;

система плям (крапок) на аерофотознімку, взаємне розташування яких відповідає схемам установки мін у мінному полі при встановленні вручну, а також за допомогою дистанційних систем мінування;

система смуг, які залишені на поверхні ґрунту загороджувачами при механізованому встановленні мінних полів;

система ліній, прямокутників, квадратів, плям круглої та еліпсоїдної форми, взаємне розташування яких відповідає схемам установлення загороджень;

сліди діяльності противника при встановленні загороджень.

До слідів мінування згідно пп. 4.2.1 наказу ГШ ЗС України від 19.04.2018 № 161 [11] віднесено: земля, не прибрана під час встановлення мін, залишені на місцевості упаковка від мін і підрильників, паперові етикетки, кинутий інструмент і знаряддя для мінування, сліди пересування, орієнтирні кілки, знаки позначення і огороження мін та мінного поля (далі – МП).

Для проведення досліджень інтерес представляють сліди мінування. Розглянемо деякі з них на прикладі конкретних мін, базуючись на матеріалах експертного опитування персоналу, який безпосередньо залучався до проведення заходів розмінування зі складу піротехнічних підрозділів ДСНС України та вибухотехнічної служби МВС України.

До найпоширеніших непрямих ознак, наприклад, протитанкових протиусеничних мін серії ТМ-62 (рис. 1) належать: запобіжні чеки (рис. 2); ключі для закручування (викручування) детонаторів (рис. 3); ручки для перенесення (рис. 4); заглушки гнізд для встановлення детонаторів (рис. 5); елементи укупорки (рис. 6) тощо.



Рис. 1. Протитанкова міна ТМ-62



Рис. 2. Запобіжні чеки



Рис. 3. Ключі для закручування детонаторів



Рис. 4. Ручки для перенесення



Рис. 5. Заглушки гнізд для встановлення детонаторів



Рис. 6. Елементи укупорки

До цього актуального напряму з 2020 року приєдналась Національна академія наук України. Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України за фінансовою підтримкою НАН України бере участь в розробленні технології автоматизованого виявлення та розпізнавання мін з використанням датчиків, що встановлюються на БПЛА мультикоптерного типу. Результати проведених у 2020–2021 рр. і 2024 р. науково-теоретичних і прикладних досліджень разом із фахівцями інженерних військ ЗС України на спеціальному полігоні підтверджують правильність обраного підходу і є підставою для проведення дослідно-конструкторської роботи щодо створення спеціалізованого безпілотного авіаційного комплексу для оперативного виявлення мін з урахуванням радіотехнічної корекції їхнього місцезнаходження, що забезпечить точність

визначення координат виявлених мін до 2-3 см.

Передбачається, що легкий БПЛА комплексу буде обладнано багатоспектральною та інфрачервоною (теплового діапазону) камерами і, можливо, невидимими датчиками – георадаром та/або магнітометром. Обробка і розпізнавання одержуваних зображень та інтеграція всіх даних від бортових джерел виконуватимуться на наземній робочій станції [7].

Усі операції виявлення побудовано в рамках єдиної імовірнісної моделі на основі методів машинного навчання – статистичного виявлення аномалій та логістичної регресії з опорою на створювану бібліотеку сигнатур мін [29]. Нині до підсистеми виявлення мін впроваджується механізм глибокого навчання на базі згорткової нейросети (CNN) [30]. Вихідний формат результатів розпізнавання

сучасних CNN повністю сумісний із застосованою імовірнісною моделлю [31].

На сьогодні для виявлення мін на аерозображеннях використовується нейромережа Ultralytics YOLOv8 [32], яку було натреновано виключно на мінах круглої форми, сфотографованих в надір (рис. 7). Особливістю будови мережі є її певна гнучкість, що надає їй здатності до генералізації – виявлення предметів, не повністю подібних на використані у навчанні.

Більшість непрямих розпізнавальних ознак мінування пов'язано зі слідами діяльності – тобто зі штучними предметами, які теж є аномаліями на природних фонах. І хоч розпізнавальну CNN навчано саме на мінах, інші штучні предмети виявляються також, нехай і з меншою імовірністю (рис. 8). Крім того, кількість таких виявлень зазвичай достатньо велика – кілька одиниць на одну міну, і всі вони разом утворюють додаткову розпізнавальну ознаку.



Рис. 7. Приклади розпізнавання із низькою ймовірністю побічних рукотворних артефактів поряд із міною



Рис. 8. Виявлення на аерозображенні штучних предметів поряд із міною

Таким чином, для урахування непрямой розпізнавальної ознаки треба поєднати кілька малоімовірних свідчень  $P_n^{(i)}$ ,  $i = 1 \dots n$ , з накопиченням, а потім злити одержану поєднану імовірність  $P_n$  з імовірністю виявлення основного об'єкта – міни. Зараз для цього застосовується Байєсівське злиття імовірностей, хоча можливі й інші механізми [33].

При Байєсівському злитті малі ймовірності негативно впливають на підсумкову ймовірність, і тому перед поєднанням їх слід спрямувати до величин, більших за 0,5:  $P_c^{(i)} = 0,5 + P_n^{(i)}/2$ . З іншого боку, при злитті з основною імовірністю

внесок непрямой ознаки має регулюватися певним апріорним знанням про відношення ймовірностей. Зручніше за все це можна зробити пригніченням імовірності непрямой ознаки в напрямку 0,5 за допомогою певного вагового коефіцієнта  $w$ :  $P_n = w \cdot P_c + (1-w) \cdot 0,5$ ;  $w \in [0 \dots 1]$ . У разі досягнення  $P_n = 0,5$  при  $w = 0$  непряма ознака перестає впливати на результат виявлення.

Отже, виникає схема врахування непрямой розпізнавальної ознаки при виявленні міни, що приведена на рис. 9. Імовірності кількох первинних виявлених ознак спрямовується до 0,5  $P_n^{(i)} \rightarrow P_c^{(i)}$ ,  $i = 1 \dots n$ , агрегуються в одну спільну  $P_n$  та

зливаються з відповідним ваговим коефіцієнтом  $w$  з імовірністю виявлення  $P_e$  основного об'єкта. У результаті прикінцева імовірність виявлення  $P_n$  підвищується.

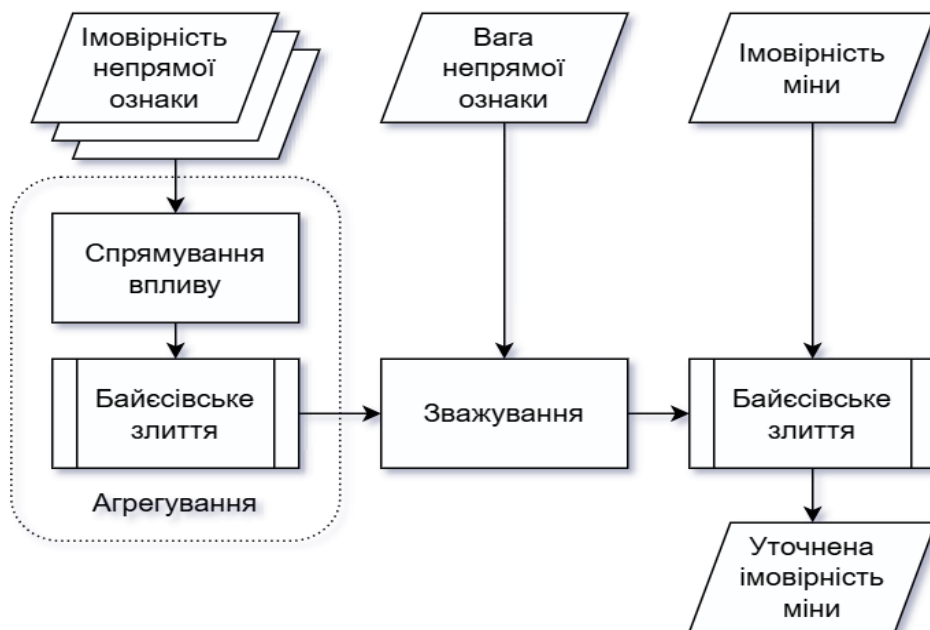


Рис. 9. Схема врахування непрямих ознак для виявлення наземних мін

Нижче наводиться кількісний приклад застосування описаного підходу до реальних значень імовірностей виявлення міни та додаткових непрямих ознак, за цифровими зображеннями, одержаними з БпЛА. При

$P_e^{(i)} = 0,5 + \{0,14; 0,02; 0,04; 0,36\}/2 = \{0,57; 0,51; 0,52; 0,68\}$ , їх агрегована імовірність буде  $P_n = \frac{0,57 \cdot 0,51 \cdot 0,52 \cdot 0,68}{0,57 \cdot 0,51 \cdot 0,52 \cdot 0,68 + (1 - 0,57) \cdot (1 - 0,51) \cdot (1 - 0,52) \cdot (1 - 0,68)} = 0,7605$ , і тоді прикінцева

імовірність виявлення міни  $P_n = \frac{0,7605 \cdot 0,84}{0,7605 \cdot 0,84 + (1 - 0,7605) \cdot (1 - 0,84)}$  сягатиме 0,9434, тобто підвищується порівняно з  $P_e$  на 12,3 %.

**Висновки.** Таким чином, використання непрямих ознак є одним з багатьох можливих заходів з підвищення достовірності виявлення наземних мін на цифрових зображеннях, одержуваних з БпЛА. Перевага запропонованого підходу полягає в пристосованості сучасних методів машинного навчання в розпізнаванні зображень, зокрема, згорткових нейронних мереж до виявлення штучних предметів місцевості, які відрізняються від мін, але можуть свідчити про мінування. Іншою зручністю запропонованого підходу є невисока ймовірність виявлення таких предметів, що є характерним для обробки цифрових оптичних зображень. Запропонований підхід може бути легко адаптовано до будь-якої системи розпізнавання зображень з БпЛА за умови, що вона працює в межах імовірнісної парадигми.

**Напрямки подальших досліджень.** У типових умовах основні об'єкти виявлення – міни та інші штучні предмети легко

вхідній імовірності виявлення міни  $P_e = 0,84$  і чотирьох штучних предметів з ймовірностями  $P_n^{(i)} = \{0,14; 0,02; 0,04; 0,36\}$  спрямована імовірність складе:

розрізняються за рівнем забезпеченої імовірності. Але можливий випадок, коли ці ймовірності зближатимуться, відтоді постане проблема відокремлення основних та додаткових об'єктів. Це може статися в складних умовах аерознімання, всередині індустріально навантажених територій та в разі застосування противником хибних ознак мінування. Розв'язання цієї проблеми потребує подальшого вивчення.

Інший важливий напрям подальших досліджень – розроблення дієвого механізму інтеграції даних від параметричних сенсорів виявлення мін, таких як магнітометри та георадари з даними від оптичних сенсорів виявлення мін з метою підвищення спільної достовірності. Такий шлях можливий за умови створення єдиної геоінформаційної платформи для виявлення наземних мін з використанням БпЛА, що далеко виходить за межі поточного дослідження.

**Подяка.** Дослідження проведені за підтримкою НАН України в межах Цільової науково-технічної програми оборонних досліджень НАН України на 2020–2024 рр., договір № НЦАДЗ-2024/1-1230.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Горбулін В., Мосов С. Наслідки мінних війн: український зріз. *Оборонний вісник*. 2021. № 11. С. 16–23.
- Глава МВС: Чверть території України забруднена мінами, повне гуманітарне розмінування можливе лише після завершення війни. URL: <https://interfax.com.ua/news/general/978032.html> (дата звернення: 15.05.2024).
- Яка частина території України забруднена мінами? Конгрес США оприлюднив цифру. URL: <https://glavcom.ua/country/incidents/jaka-chastina-teritoriji-ukrajini-zabrudnena-minami-konhres-ssha-opriljudniv-tsfiru-995274.html> (дата звернення: 15.05.2024).
- Мосов С., Нероба В. Напрями застосування безпілотної авіації для виконання завдань розмінування: світовий досвід. *Збірник наукових праць військові та технічні науки НАДПС ім. Б.Хмельницького*. 2019. № 1 (79). С. 172–185.
- Popov M. O., Stankevich S. A., Mosov S. P., Titarenko O. V., Dugin S. S., Golubov S. I., Andreiev A. A. Method for minefields mapping by imagery from unmanned aerial vehicle. *Advances in Military Technology*. 2022. Vol. 17, No. 2. P. 211–229. DOI: 10.3849/aimt.01722.
- Popov M. O., Stankevich S. A., Mosov S. P., Dugin S. S., Saprykin I. Y. Drone-based landmine detection mission planning. Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC 2023). Kyiv, 2023. P. 151–154. DOI: 10.1109/MSNMC61017.2023.10329129.
- 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. Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Conference on Smart Technologies (EuroCon 2021). Lviv, 2021. P. 175–178. DOI: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.
- Інженерна підготовка : навч. посіб. / Д. Д. Данилов, Ю. О. Фтемов, Р. Л. Колос, О. О. Расстригін та ін.]. Львів : НАСВ, 2017. 503 с.
- Патент № 125887 на винахід. Україна, МПК G01V 3/16, F41H 11/12. Мобільний комплекс для пошуку та виявлення мін / С. П. Мосов, О. М. Попов, С. А. Станкевич. № а202004603; заявл. 20.07.2020; опубл. 29.06.2022, Бюл. № 26/2022. 6 с.
- Мосов С. П., Станкевич С. А., Ворочив В. О. Систематизація умов і факторів, що впливають на застосування безпілотної літального апарата коптерного типу при виявленні наземних мін. *Зб. наук. праць ЦВСД НУОУ*. 2021. Вип. № 3 (73). С. 82–89.
- Про затвердження Інструкції з правил поведіння військослужбовців на місцевості, на який є вибухонебезпечні предмети, та дотримання заходів мінної безпеки: наказ ГШ ЗСУ від 19.04.2018 № 161. 138 с.
- Видові технічні засоби розвідки мін безпілотної літальних апаратів : кол. монограф. / І. І. Балицький, С. П. Мосов, В. Р. Нероба та ін. Хмельницький : НАДПСУ, 2023. 184 с.
- Pat. US6840480B2. Miniature, unmanned aircraft with interchangeable data module. URL: <https://patents.google.com/patent/US6840480B2> (дата звернення: 15.05.2024).
- Pat. US20140062754. Remote detection, confirmation and detonation of buried improvised explosive devices. URL: <https://patents.google.com/patent/US20140062754A15> (дата звернення: 15.05.2024).
- Средства разведки и преодоления минных полей. URL: <http://www.zvo.su/suhoputnyevoyaska/sredstva-razvedki-i-preodoleniya-minnyh-poley.html> (дата звернення: 15.05.2024).
- Коцюруба В. І., Цибуля С. А., Рибалко В. В. Обґрунтування доцільності використання способу повітряної розвідки районів інтенсивного застосування мінної зброї. *Social development & Security*. 2019. Вип. 9 (1). С. 60–68. DOI: <http://doi.org/10.33445/sds.2019.9.1.5>.
- Baur J., Steinberg G., Nikulin A., Chiu K., Smet T. Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No.15. A. 859. DOI: 10.3390/rs12050859.
- Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2017. Vol. 39, No. 6. P. 1137–1149. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.
- Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: unified, real-time object detection. *Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2016)*. Las Vegas: IEEE, 2016. P. 779–788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- Cho S., Ma J., Yakimenko O. A. Aerial multi-spectral AI-based detection system for unexploded ordnance. *Defence Technology*. 2023. Vol. 27. P. 24–37. DOI:10.1016/j.dt.2022.12.002.
- Qiu Z., Guo H., Hu J., Jiang H., Luo C. Joint fusion and detection via deep learning in UAV-borne multispectral sensing of scatterable landmine. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 12. A. 5693. DOI: 10.3390/s23125693.
- Vivoli E., Bertini M., Capineri L. Deep learning-based real-time detection of surface landmines using optical imaging. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16, No. 4. A. 677. DOI: 10.3390/rs16040677.
- Baur J., Steinberg G., Frucci J., Brinkley A. An accessible seeded field for humanitarian mine action

- research. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2023. Vol. 27, No. 3. A. 2. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol27/iss3/2> (дата звернення: 15.05.2024).
24. Harvey A., LeBrun E. Computer vision detection of explosive ordnance: a high-performance 9N235/9N210 cluster submunition detector. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2023. Vol. 27, No. 2. A. 9. URL: <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol27/iss2/9> (дата звернення: 15.05.2024).
25. Kunichik O., Tereshchenko V. Improving the accuracy of landmine detection using data augmentation: a comprehensive study. *Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 2023, No. 2. P. 42–54. DOI: 10.15407/jai2023.02.042.
26. Safe Pro Group. URL: <https://safeprogroup.com/artificial-intelligence> (дата звернення: 15.05.2024).
27. UADamage. URL: <https://www.uadamage.com> (дата звернення: 15.05.2024).
28. Про затвердження Керівництва з подолання інженерних загороджень підрозділами Збройних Сил України : наказ нач. Генерального штабу – Головнокомандувача Збройних Сил України від 19.10.2016 р. № 390. 128 с.
29. Попов М. О., Станкевич С. А., Мосов С. П. Виявлення наземних мін із використанням комплексу датчиків повітряного моніторингу оптичного діапазону. *Цивільна безпека: Державне управління та кризовий менеджмент*. 2022. № 1. С. 37–55. DOI: 10.33269/sbcs.2022.1.37-55.
30. Popov M., Stankevich S., Mosov S., Saprykin I. Drone-based landmine detection by image and signal fusion. *Proceedings of the TIEMS Hybrid Annual Conference*. Port Alfred : TIEMS, 2023. P. 24. URL: <https://www.tiems.info/2023-hybrid-annual-conference> (дата звернення: 15.05.2024).
31. Ren J., Wang Y. Overview of object detection algorithms using convolutional neural networks. *Journal of Computer and Communications*. 2022. Vol. 10, No. 1. P. 115–132. DOI: 10.4236/jcc.2022.101006.
32. Ultralytics YOLOv8. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (дата звернення: 15.05.2024).
33. Попов М. О., Артюшин Л. М., Топольницький М. В., Титаренко О. В., Шморгун Ю. В. Інтегрування гетерогенних геопросторових даних на основі теорії свідчень Демпстера-Шейфера. *Математичні машини і системи*. 2019. № 3. С. 35–46. URL: [http://www.immsp.kiev.ua/publications/articles/2019/2019\\_3/03\\_Popov\\_19.pdf](http://www.immsp.kiev.ua/publications/articles/2019/2019_3/03_Popov_19.pdf) (дата звернення 15.05.2024).

Стаття надійшла до редакційної колегії 01.03.2024

## Utilizing the indirect features for landmine detection by unmanned aerial vehicle

### Annotation

One of the promising global approaches to solving the problem of demining is the detection of landmines using unmanned aerial vehicles (UAVs). Various sensor configurations are used to detect mines on the ground's surface or those buried in the soil. These sensors are mounted on UAVs and typically operate in different wavelength ranges of the electromagnetic spectrum, creating various mine signatures to ensure the maximum probability  $P_d$  of their detection.

The purpose of this article is to justify a method for increasing the probability  $P_d$  of detecting landmines by processing optical data and combining results while considering additional demasking features left behind after mine installation.

An approach is proposed for using indirect signs of mining, such as artificial terrain objects, to detect landmines on digital optical images obtained from UAVs. This approach is implemented within a probabilistic mine detection model, which underpins most modern machine learning methods for image processing. Bayesian fusion of modified probabilities of indirect signs is used, followed by Bayesian summation with the probability of detecting the primary object – the mine. The suitability of this approach for interaction with modern neural networks for image recognition is demonstrated. This approach is being developed by the Scientific Center for Aerospace Research of the Earth with the support of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The use of indirect signs is one of many possible measures to increase the reliability of detecting landmines on digital images obtained from UAVs. The advantage of the proposed approach lies in the adaptability of modern machine learning methods, particularly convolutional neural networks, to recognize artificial terrain objects that differ from mines, but may indicate the presence of mines.

**Keywords:** landmine; copter-type unmanned aerial vehicle; aerial imaging; indirect feature.