Роботизовані комплекси для виявлення та ідентифікації вибухонебезпечних предметів у протимінній діяльності в Україні: аналіз досвіду та перспективи впровадження в системі МВС

Robotic Systems for the Detection and Identification of Explosive Ordnance in Mine Action in Ukraine: Analysis of Experience and Prospects for Implementation in the System of the Ministry of Internal Affairs

Сергій Кучинський
Corresponding author старший викладач кафедри тактико-спеціальної підготовки, e-mail: katyhavehamster@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8037-6849

Ростіслав Фещенко
курсант 2 курсу, e-mail: katyhavehamster@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0006-4025-455X

Катерина Вітвіцька
курсант 2 курсу, e-mail: katyhavehamster@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0005-9932-1289

Ілля Перкатий
курсант 2 курсу, e-mail: katyhavehamster@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-4190-0986

Харківський національний університет внутрішніх справ, м. Харків, Україна

Serhii Kuchynskyi
Corresponding author: Senior Lecturer, Department of Tactical and Special Training, e-mail: katyhavehamster@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8037-6849

Rostyslav Feshchenko
2nd-year cadet, e-mail: katyhavehamster@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0006-4025-455X

Kateryna Vitvitska
2nd-year cadet, e-mail: katyhavehamster@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0005-9932-1289

Illia Perkatyi
2nd-year cadet, e-mail: katyhavehamster@gmail.com, ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-4190-0986

Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine

Received: September 16, 2026 | Revised: October 25, 2026 | Accepted: October 31, 2026

УДК 623.368:351.741(477)

DOI: https://doi.org/10.33445/sds.2026.16.5.24

Мета роботи. Систематизувати вітчизняний і зарубіжний досвід застосування наземних роботизованих комплексів (НРК) і безпілотних літальних апаратів (БпЛА) для виявлення та ідентифікації вибухонебезпечних предметів (ВНП) і обґрунтувати напрями їх упровадження в підрозділах системи МВС України.

Методологія дослідження. Використано структурований огляд 34 джерел за 2005–2025 роки, вторинний аналіз опублікованих результатів випробувань вітчизняних НРК, критеріальне порівняння семи методів виявлення ВНП за чотирма критеріями із застосуванням порядкових шкал, типологізацію виявлених недоліків і концептуальне моделювання.

Результати дослідження. Установлено відмінності між методами виявлення ВНП за темпом обстеження, схильністю до хибних спрацювань, здатністю виявляти неметалеві об'єкти та придатністю до роботизованих носіїв. Обґрунтовано доцільність комплексування сенсорів. За результатами аналізу випробувань комплексів “NEO-1” і “Френдт” систематизовано чотири групи недоліків: сенсорно-функціональні, конструктивно-механічні, навігаційно-комунікаційні та експлуатаційно-документаційні. Запропоновано концептуальну схему взаємодії БпЛА, НРК, піротехнічних груп та інформаційного контуру.

Практична цінність дослідження. Сформульовано рекомендації щодо оцінювання, випробувань, закупівлі та впровадження роботизованих засобів, підвищення надійності керування й

Purpose. To systematize Ukrainian and international experience in using unmanned ground vehicles (UGVs) and unmanned aerial vehicles (UAVs) for explosive ordnance detection and identification and to substantiate directions for their implementation within the Ministry of Internal Affairs of Ukraine.

Methodology. The study employed a structured review of 34 sources published between 2005 and 2025, secondary analysis of published test results for Ukrainian UGVs, a criteria-based comparison of seven explosive ordnance detection methods using four criteria and ordinal rating scales, classification of identified limitations, and conceptual modeling.

Findings. Differences among detection methods were identified in terms of survey speed, susceptibility to false alarms, capability to detect non-metallic objects, and suitability for robotic platforms. The rationale for integrating complementary sensors was established. Analysis of the published tests of the “NEO-1” and “Frendt” platforms identified four categories of limitations: sensor-related and functional, structural and mechanical, navigation and communication, and operational and documentation-related. A conceptual framework integrating UAVs, UGVs, explosive ordnance disposal teams, and a cross-cutting information management component was proposed.

Practical implications. Recommendations were developed for evaluating, testing, procuring, and implementing robotic systems, improving control and navigation reliability,

навігації, інформаційної взаємодії та підготовки операторів у підрозділах системи МВС України.

Перспективи подальших досліджень. Передбачено розроблення методики кількісного оцінювання ефективності НРК, проведення польових випробувань і формування наборів даних для автоматизованого розпізнавання ВНП.

Тип статті: оглядово-аналітична (Review Article).

strengthening information interoperability, and training operators within the Ministry of Internal Affairs of Ukraine.

Future research. Further studies should develop quantitative methods for evaluating UGV effectiveness, conduct field trials, and establish datasets for automated explosive ordnance recognition.

Article type: Review Article.

Ключові слова: вибухонебезпечні предмети; наземні роботизовані комплекси; безпілотні літальні апарати; методи виявлення; комплексування сенсорів; гуманітарне розмінування; протимінна діяльність.

Keywords: explosive ordnance; unmanned ground vehicles; unmanned aerial vehicles; detection methods; sensor integration; humanitarian demining; mine action.

Вступ

Забруднення території України вибухонебезпечними предметами (ВНП) унаслідок повномасштабного збройного вторгнення Російської Федерації набуло безпрецедентних масштабів. За повідомленням Уряду України, станом на середину 2025 року потенційно забрудненими вважалися близько 137 тис. км² території, що більш ніж на 20 % менше порівняно з кінцем 2022 року [25]. За даними *Landmine Monitor*, у 2022 році в Україні зафіксовано щонайменше 608 постраждалих (загиблих і травмованих) від мін та вибухонебезпечних залишків війни, що стало другим за величиною показником у світі. Водночас кількість постраждалих серед цивільного населення порівняно з 2021 роком зросла приблизно в 10 разів [24, 1].

Протимінну діяльність в Україні здійснюють уповноважені суб'єкти сектору безпеки і оборони та сертифіковані оператори протимінної діяльності відповідно до Закону України “Про протимінну діяльність в Україні” [4]. До виконання відповідних завдань залучаються підрозділи Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), Національної поліції України, Міністерства оборони України та неурядові оператори протимінної діяльності [25]. У системі Міністерства внутрішніх справ України (МВС) відповідні функції виконують, зокрема, піротехнічні підрозділи ДСНС, вибухотехнічні підрозділи Національної поліції та визначені підрозділи Національної гвардії України.

Водночас Державна спеціальна служба транспорту (ДССТ), фахівці Центру протимінної діяльності якої провели одне з перших публічно задокументованих випробувань вітчизняних наземних роботизованих комплексів [2], належить до системи Міністерства оборони України [3]. З огляду на це, дослідження охоплює досвід різних суб'єктів протимінної діяльності сектору безпеки і оборони, а отримані результати розглядаються з позиції можливостей їх застосування підрозділами системи МВС України.

Традиційні методи виявлення ВНП, що передбачають безпосереднє перебування фахівців у потенційно небезпечній зоні, супроводжуються значними ризиками для їхнього життя та здоров'я [18]. Використання наземних роботизованих комплексів (НРК) і безпілотних літальних апаратів (БпЛА) дає змогу здійснювати дистанційне обстеження територій, зменшувати необхідність перебування особового складу в небезпечних зонах та створювати передумови для підвищення продуктивності пошукових робіт [7, 21].

Разом із тим, результати наукових досліджень і практичного застосування роботизованих засобів у протимінній діяльності України висвітлено переважно фрагментарно. Наявні публікації здебільшого присвячені окремим технологіям виявлення ВНП, конструктивним особливостям роботизованих платформ або результатам випробувань конкретних зразків техніки. Незважаючи на наявність порівняльних досліджень методів виявлення мін [22], відомості щодо придатності цих методів до застосування на роботизованих і безпілотних носіях, з урахуванням умов протимінної діяльності в Україні, залишаються недостатньо систематизованими. Додаткового опрацювання потребують

результати випробувань вітчизняних НРК, зокрема в частині визначення їхніх функціональних, конструктивних, навігаційних та експлуатаційних обмежень.

Метою статті є систематизація вітчизняного та зарубіжного досвіду застосування НРК і БпЛА для виявлення та ідентифікації ВНП суб'єктами протимінної діяльності в Україні, а також обґрунтування напрямів упровадження відповідних роботизованих засобів у підрозділах системи МВС України.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Здійснити критеріальне порівняння методів виявлення ВНП за показниками їхньої придатності до застосування на роботизованих і безпілотних носіях.
2. Узагальнити результати випробувань вітчизняних зразків НРК та систематизувати виявлені функціональні, конструктивні й експлуатаційні недоліки.
3. Проаналізувати можливості та обмеження використання БпЛА й алгоритмів машинного навчання для виявлення ВНП.
4. Запропонувати концептуальну схему взаємодії роботизованих засобів і сформулювати практичні рекомендації щодо їх упровадження в підрозділах системи МВС України.

Наукова новизна дослідження полягає в розробленні критеріальної порівняльної матриці методів виявлення ВНП із визначенням порядкових шкал оцінювання їхньої придатності до застосування на роботизованих носіях з урахуванням умов протимінної діяльності в Україні. Набула подальшого розвитку систематизація результатів випробувань вітчизняних наземних роботизованих комплексів (далі – НРК) шляхом виокремлення чотирьох груп недоліків: сенсорно-функціональних, конструктивно-механічних, навігаційно-комунікаційних та експлуатаційно-документаційних. Запропоновано концептуальну схему чотирирівневої взаємодії БпЛА, НРК, піротехнічних груп та інформаційного контуру з урахуванням завдань підрозділів системи МВС України.

Дослідження має оглядово-аналітичний характер, ґрунтується на аналізі опублікованих наукових праць і результатів випробувань роботизованих засобів та не передбачає проведення власних польових експериментів.

Огляд літератури

Наукові дослідження технологій ВНП свідчать про відсутність універсального методу, який одночасно забезпечував би високу ймовірність виявлення, низький рівень хибних спрацювань і достатню продуктивність обстеження територій. Habib [18] обґрунтував доцільність інтеграції різнорідних сенсорів і комплексного оброблення отриманих даних, а також визначив основні технічні вимоги до мобільних платформ для гуманітарного розмінування. Kasban et al. [22] здійснили порівняльний аналіз технологій виявлення мін і встановили, що їхня результативність залежить від фізичних характеристик вибухонебезпечних об'єктів та властивостей навколишнього середовища. Daniels [12] систематизував особливості застосування георадарних технологій, зокрема чинники, що спричиняють виникнення завад під час виявлення мін у неоднорідних ґрунтових середовищах.

Серед вітчизняних досліджень заслуговує на увагу праця Кривцуна та Ляшенка [5], у якій проаналізовано теоретичні підходи до вибору методів виявлення ВНП у середовищах, що їх приховують, з урахуванням особливостей бойових дій. Федоренко та ін. [7] запропонували концепцію гарантованого виявлення та розпізнавання ВНП із використанням флотів безпілотних інтелектуальних платформ і комплексування різних методів виявлення. Зазначені дослідження формують теоретичне підґрунтя для інтеграції сенсорних технологій, проте не повною мірою розкривають питання їхньої придатності для застосування на конкретних типах роботизованих носіїв з урахуванням експлуатаційних обмежень.

Окремий напрям наукових досліджень присвячено розробленню та вдосконаленню НРК. Rachkov et al. [30] представили багатосенсорну роботизовану платформу з пневматичним

приводом, оснащену металодетектором, інфрачервоним і хімічним сенсорами. Конструкція забезпечувала адаптацію положення сенсорів до перешкод і нерівностей поверхні. Santana et al. [31] запропонували концепцію економічно доступного робота для гуманітарного розмінування, орієнтовану на зменшення вартості технічних засобів. Freese et al. [15] розробили систему з урівноваженим маніпулятором на колісній платформі, призначену для дистанційного переміщення сенсорів над потенційно небезпечними ділянками.

У вітчизняних дослідженнях Шафоростов та Янушкевич [8] описали прототип мобільного робота-маніпулятора, який поєднує металодетектор і поляризовану камеру. Журахов та ін. [2] узагальнили результати практичних випробувань вітчизняних НРК фахівцями Державної спеціальної служби транспорту та визначили низку конструктивних і функціональних недоліків, пов'язаних із недостатнім урахуванням специфіки процесів розмінування під час розроблення техніки. Порівняння зазначених праць свідчить, що, поряд із характеристиками сенсорів, важливе значення мають конструктивна адаптація роботизованих платформ до рельєфу місцевості, надійність систем керування та відповідність технічних рішень практичним завданням протимінної діяльності.

Значну увагу в сучасних зарубіжних дослідженнях приділено використанню безпілотних літальних апаратів (БпЛА) для дистанційного виявлення ВНП. Nikulin et al. [27] та de Smet et al. [13] продемонстрували можливості виявлення протипіхотних мін типу ПФМ-1 за допомогою тепловізійного знімання з БпЛА. García-Fernández et al. [16, 17] дослідили застосування георадарних систем на борту БпЛА з обробленням сигналів методом синтезованої апертури для виявлення металевих і діелектричних об'єктів. Šipoš та Gleich [32] запропонували полегшений георадар із низьким енергоспоживанням, придатний для інтеграції з безпілотними платформами.

Перспективним напрямом є застосування магнітометричних сенсорів на повітряних носіях. Yoo et al. [34] і Kuru et al. [23] дослідили можливості використання магнітометрів для дистанційного виявлення феромагнітних об'єктів та підтвердили працездатність відповідних технічних рішень під час польових випробувань. Для умов України Popov et al. [28] запропонували підхід до картографування мінних полів на основі оброблення зображень із БпЛА, а Hutsul et al. [21] систематизували можливості використання безпілотних платформ, дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем у гуманітарному розмінуванні.

Порівняння зазначених досліджень свідчить, що використання БпЛА створює передумови для оперативного обстеження значних площ, однак ефективність виявлення залежить від типу сенсора, характеристик ВНП, стану поверхні та умов спостереження. Оптичні й тепловізійні системи орієнтовані переважно на виявлення поверхневих або неглибоко заглиблених об'єктів, тоді як георадарні та магнітометричні технології розширюють можливості дистанційного пошуку, але мають специфічні технічні й експлуатаційні обмеження.

Окрему групу становлять дослідження, присвячені застосуванню алгоритмів машинного та глибокого навчання для автоматизованого виявлення ВНП. Baur et al. [10] використали згорткову нейронну мережу Faster R-CNN для аналізу зображень, отриманих із БпЛА. За результатами дослідження точність виявлення становила 99,3 % на частково відкладеній тестовій вибірці та 71,5 % на повністю відкладеній вибірці. Така відмінність свідчить про залежність результативності алгоритмів від характеристик навчальних і тестових даних та підкреслює проблему узагальнювальної здатності моделей.

Bajić та Potočnik [9], Qiu et al. [29], Cho et al. [11], Vivoli et al. [33] і Heuschmid et al. [20] розвинули підходи до застосування глибокого навчання для оброблення тепловізійних, мультиспектральних та оптичних даних. Harvey та LeBrun [19] розробили алгоритм комп'ютерного зору для виявлення касетних суббоєприпасів типів 9H235/9H210, що має безпосереднє прикладне значення для умов України. Levchenko et al. [26] систематизували сучасні інструменти комп'ютерного зору, призначені для виявлення ВНП.

Незважаючи на отримані результати, практичне впровадження алгоритмів машинного навчання потребує врахування обмежень, пов'язаних із репрезентативністю навчальних вибірок, різноманітністю типів ВНП, зміною умов спостереження та необхідністю перевірки моделей на незалежних даних. Високі показники результативності, отримані в контрольованих умовах, не можуть автоматично вважатися підтвердженням аналогічної ефективності під час практичного розмінування.

Організаційні аспекти комплексного застосування роботизованих засобів висвітлено в науковій літературі менш детально, ніж технологічні. Fedorenko et al. [14] запропонували концепцію робото-біологічної системи виявлення та ідентифікації ВНП, у якій взаємодія флоту БпЛА, біологічної та роботизованої підсистем забезпечується через мобільний центр керування. Минько та ін. [6] проаналізували проблемні питання організації застосування безпілотних комплексів у силах безпеки і оборони України, зокрема недоліки підготовки командирів та операторів.

Аналіз зазначених праць засвідчує, що комплексування різнорідних сенсорів і роботизованих платформ розглядається як перспективний напрям підвищення результативності протимінної діяльності. Водночас у дослідженнях переважає увага до технічних характеристик окремих засобів, тоді як питання їхньої функціональної сумісності, стійкості систем керування до радіоелектронних завад, адаптації до складного рельєфу та організаційної взаємодії між підрозділами потребують подальшого опрацювання.

Отже, результати попередніх досліджень формують достатнє теоретичне підґрунтя для застосування роботизованих і безпілотних систем у протимінній діяльності. Проте недостатньо систематизованими залишаються порівняльні характеристики методів виявлення ВНП щодо їхньої придатності до роботизованих носіїв, результати практичних випробувань вітчизняних НРК та організаційно-технічні умови їх комплексного застосування. Це зумовлює необхідність критеріального порівняння технологій виявлення, типологізації виявлених недоліків роботизованих платформ і розроблення концептуальної схеми їх взаємодії з урахуванням функціональних завдань підрозділів системи МВС України.

Методологія дослідження

Дослідження має оглядово-аналітичний характер і ґрунтується на поєднанні структурованого огляду наукової літератури, вторинного аналізу опублікованих результатів випробувань роботизованих комплексів, критеріального порівняння методів ВНП та концептуального моделювання. Застосування зазначених методів спрямоване на систематизацію наявних наукових результатів, визначення технологічних і експлуатаційних обмежень роботизованих засобів та обґрунтування напрямів їх комплексного використання в протимінній діяльності.

Інформаційна база дослідження. Джерельну базу сформовано з наукових публікацій, індексованих у Scopus і Web of Science, а також матеріалів, виявлених за допомогою Google Scholar та електронного ресурсу Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського “Наукова періодика України”. Додатково використано нормативно-правові акти України, опубліковані результати випробувань наземних роботизованих комплексів (НРК), зокрема дослідження Журахова та ін. [2], аналітичні звіти *Landmine Monitor* [24] та офіційні повідомлення органів державної влади щодо масштабів забруднення територій ВНП.

Пошук наукових публікацій здійснювався за ключовими словами та словосполученнями українською й англійською мовами: “виявлення вибухонебезпечних предметів”, “наземний роботизований комплекс”, “гуманітарне розмінування”, “landmine detection”, “unmanned ground vehicle”, “UAV”, “ground-penetrating radar”, “sensor fusion”, “deep learning”.

Часові межі та критерії відбору джерел. Дослідження охоплює наукові публікації та інші інформаційні матеріали за 2005–2025 роки. Праці, опубліковані до 2020 року, використовувалися

переважно для характеристики базових технологій виявлення ВНП і технічних рішень, що становлять теоретичне підґрунтя сучасних роботизованих систем. Основну увагу приділено дослідженням 2020–2025 років, у яких висвітлено результати застосування безпілотних платформ, сучасних сенсорних технологій та алгоритмів машинного навчання.

До інформаційної бази включалися джерела, що відповідали таким критеріям: безпосередня відповідність тематиці виявлення ВНП або застосування роботизованих і безпілотних носіїв сенсорного обладнання; наявність опису методів дослідження, технічних характеристик або результатів випробувань; публікація в рецензованих наукових виданнях, матеріалах наукових конференцій чи офіційних документах.

Із вибірки виключалися рекламні матеріали виробників, публікації без належного зазначення джерел вихідних даних і дублікати. Остаточна інформаційна база становить 34 джерела, серед яких 25 англомовних (зокрема, 21 праця зарубіжних авторів) і 9 україномовних.

Процедура критеріального порівняння методів виявлення ВНП. Для визначення придатності методів виявлення ВНП до використання на роботизованих і безпілотних носіях застосовано критеріальний підхід, що передбачає оцінювання семи методів за чотирма характеристиками:

- К1 — темп обстеження території;
- К2 — схильність до хибних спрацювань;
- К3 — здатність виявляти ВНП без металевих складових або з мінімальним їх вмістом;
- К4 — підтверджена придатність методу для інтеграції з роботизованими чи безпілотними носіями.

Для критеріїв К1, К2 і К4 використано трирівневу порядкову шкалу: Н — низький рівень, С — середній рівень, В — високий рівень. Критерій К3 оцінювався за категоріями “так”, “обмежено” та “ні”.

Критерій К1 — темп обстеження території:

- Н — точкове або контактне обстеження, що потребує періодичних зупинок носія;
- С — безперервне сканування смуги місцевості зі швидкістю руху пішохода або НРК;
- В — дистанційне площинне обстеження території з повітряного носія.

Критерій К2 — схильність до хибних спрацювань:

- Н — низька схильність до хибних спрацювань, коли сигнал формується переважно за специфічною ознакою ВНП, зокрема наявністю вибухової речовини;
- С — середня схильність до хибних спрацювань, коли сигнал формується за неспецифічною ознакою, проте сторонні об'єкти можуть бути частково відфільтровані за формою, розмірами або контрастом;
- В — висока схильність до хибних спрацювань, коли сигнал формується за загальними фізичними властивостями, характерними для значної кількості сторонніх об'єктів або неоднорідностей середовища.

Критерій К3 — здатність виявляти неметалеві ВНП:

- “Так” — фізичний принцип методу допускає виявлення ВНП незалежно від наявності металевих складових;
- “Обмежено” — виявлення неметалевих ВНП можливе лише за певних умов їх розташування, характеристик поверхні або навколишнього середовища;
- “Ні” — метод ґрунтується на реєстрації властивостей металевих складових і не забезпечує виявлення повністю неметалевих ВНП.

Критерій К4 — підтверджена придатність до роботизованого носія:

- Н — інтеграцію методу з роботизованим носієм в опрацьованих джерелах не продемонстровано або застосування методу передбачає безпосередній фізичний вплив на потенційно небезпечний об'єкт;

- С — інтеграцію продемонстровано на рівні прототипів або лабораторних випробувань чи її практичне використання обмежується суттєвими масогабаритними, енергетичними або вартісними чинниками;
- В — наявні опубліковані результати польових випробувань відповідного методу на НРК або БпЛА.

Оцінки визначалися на основі зіставлення характеристик методів, наведених у відібраних наукових джерелах. За наявності розбіжностей між результатами окремих досліджень перевага надавалася характеристикам, що найбільше відповідали типовим умовам гуманітарного розмінування, зокрема обстеженню ґрунтових ділянок сільськогосподарського призначення.

Оцінювання має якісний характер. Використані шкали є порядковими та відображають відносні характеристики методів, тому отримані оцінки не підлягають арифметичному підсумовуванню або безпосередньому використанню для визначення інтегрального показника ефективності.

Водночас критерії мають різну спрямованість: високі значення К1 і К4 характеризують переваги методу, тоді як високе значення К2 свідчить про підвищену схильність до хибних спрацювань. Тому порівняння здійснюється за профілем характеристик кожного методу без формування загального рейтингу.

Типологізація недоліків НРК. Для систематизації результатів випробувань вітчизняних роботизованих платформ використано метод якісної класифікації виявлених недоліків за характером їх прояву та можливими причинами виникнення. Інформаційною основою стали опубліковані результати випробувань, наведені Жураховим та ін. [2].

Недоліки згруповано за чотирма типами: сенсорно-функціональні, конструктивно-механічні, навігаційно-комунікаційні та експлуатаційно-документаційні. Такий підхід дає змогу визначити основні напрями вдосконалення роботизованих платформ з урахуванням особливостей виконання завдань протимінної діяльності.

Концептуальне моделювання. Концептуальну схему комплексного застосування роботизованих засобів побудовано на основі функціонального розподілу завдань між БпЛА, НРК, піротехнічними групами та інформаційною підсистемою. Під час формування схеми враховано основні етапи протимінної діяльності, зокрема нетехнічне обстеження, технічне обстеження та очищення територій, передбачені нормативно-правовою базою України [4].

Розподіл функцій між складовими системи здійснено з урахуванням результатів критеріального порівняння методів виявлення ВНП, особливостей роботизованих носіїв та обмежень, установлених за результатами аналізу опублікованих випробувань.

Обмеження дослідження. Дослідження ґрунтується на вторинних даних, отриманих з опублікованих наукових праць, нормативно-правових документів і матеріалів випробувань. Емпірична база щодо вітчизняних НРК обмежується двома зразками, результати випробувань яких наведено в одному науковому джерелі. Власні польові експерименти не проводилися.

Крім того, критеріальні оцінки мають якісний характер і не дають змоги визначити абсолютні показники ефективності методів виявлення ВНП. Додатковими обмеженнями є неповнота відкритих даних щодо практичного застосування роботизованих засобів в умовах бойових дій та швидке оновлення відповідних технологій. Зазначені обставини враховано під час інтерпретації отриманих результатів і формулювання висновків.

Результати дослідження

Порівняльна характеристика методів виявлення ВНП

Виявлення вибухонебезпечних предметів ґрунтується на реєстрації їхніх характерних фізичних, хімічних і геометричних ознак, зокрема наявності вибухових речовин, металевих

складових, специфічної форми об'єкта, теплового контрасту з навколишнім середовищем, а також локальних порушень структури ґрунту або рослинного покриву [5, 7].

До порівняльного аналізу включено сім методів виявлення ВНП, щодо яких в опрацьованих наукових джерелах наведено відомості про практичне застосування або можливості інтеграції з роботизованими та безпілотними носіями. Ядерно-фізичні й акустичні методи не включено до порівняння, оскільки в дослідженій вибірці джерел вони представлені переважно на рівні експериментальних і теоретичних розробок [22].

Порівняння здійснено за чотирма критеріями: темпом обстеження території (К1), схильністю до хибних спрацювань (К2), здатністю виявляти неметалеві ВНП (К3) та підтвердженою придатністю методу до використання на роботизованих або безпілотних носіях (К4). Результати наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика методів виявлення ВНП щодо придатності для роботизованих носіїв

Метод виявлення	Носій	К1	К2	К3	К4
Контактний (щупи)	Ручний; маніпулятор НРК	Н	С	Так	Н
Індукційний (металодетектор)	Ручний; НРК	С	С/В*	Ні	В
Радіолокаційний (георадар)	НРК; БпЛА	С/В	В	Так	С
Оптичний / тепловізійний	БпЛА; НРК	В	С	Обмежено	В
Магнітометричний	БпЛА; НРК	В	С/В*	Ні	В
Біофізичний (кінологічний)	Кінолог і собака	С	Н	Так	Н**
Газоаналітичний (хімічний)	НРК; стаціонарні засоби	Н	С	Так	С

Примітка. Н – низький, С – середній, В – високий рівень.

* На ділянках зі значною щільністю металевих уламків схильність до хибних спрацювань зростає.

** Кінологічний метод може поєднуватися з роботизованими засобами в межах робото-біологічних систем, але не є сенсором, безпосередньо встановленим на НРК.

Джерело: складено [2, 5, 10, 12, 14, 16, 17, 18, 22, 23, 27, 30, 34].

Індукційний метод, реалізований у металодетекторах, належить до найбільш поширених технологій пошуку ВНП завдяки відносно невисокій вартості обладнання, технологічній доступності та можливості інтеграції з наземними роботизованими платформами. Водночас глибина виявлення не є сталою характеристикою методу, оскільки залежить від розмірів і вмісту металу в об'єкті, конструктивних характеристик сенсора, його просторового положення та електрофізичних властивостей ґрунту [22].

Зокрема, під час випробувань роботизованого комплексу “NEO-1” було продемонстровано можливість виявлення макетів протипіхотних мін із малим вмістом металу на глибині до 15 см, а макетів протитранспортних мін і снарядів — до 30 см [2]. Зазначені результати характеризують можливості конкретного технічного засобу за умов проведених випробувань і не можуть розглядатися як універсальні показники глибини виявлення для всіх металодетекторів.

Основними обмеженнями індукційного методу є неможливість виявлення об'єктів, що не містять металевих складових, а також підвищена схильність до хибних спрацювань на територіях, забруднених металевими уламками [5].

Радіолокаційний метод із використанням георадара є перспективним для виявлення як металевих, так і неметалевих ВНП завдяки реєстрації відмінностей електрофізичних властивостей об'єктів і навколишнього середовища. Застосування георадарних систем на

роботизованих платформах і БпЛА створює можливості для дистанційного дослідження підповерхневих структур без безпосереднього контакту оператора з потенційно небезпечною ділянкою [16].

Водночас результативність георадарного виявлення істотно залежить від неоднорідності ґрунтового середовища, його вологості, характеристик об'єкта та параметрів апаратури. Додаткові обмеження пов'язані з відбиттям електромагнітних хвиль від межі “повітря — ґрунт”, складністю оброблення сигналів, масогабаритними характеристиками обладнання та його вартістю [12, 5].

Удосконалення георадарних систем, зокрема використання багатоканальних приймальних антен і методів просторового оброблення сигналів, сприяє підвищенню якості виявлення підповерхневих об'єктів [17]. Проте практична придатність таких рішень до масштабного застосування в протимінній діяльності потребує додаткового оцінювання з урахуванням умов експлуатації та характеристик роботизованих носіїв.

Оптичні й тепловізійні методи забезпечують можливість дистанційного обстеження значних площ із використанням БпЛА. Їх застосування є перспективним насамперед для виявлення поверхневих ВНП, зокрема протипіхотних мін дистанційного встановлення, які можуть бути розпізнані за характерними геометричними або тепловими ознаками [27, 10].

Водночас можливості оптичних систем обмежуються умовами освітлення, наявністю рослинного покриву, маскуванням об'єктів та їх заглибленням у ґрунт. Результативність тепловізійного виявлення додатково залежить від температурного контрасту між ВНП і навколишнім середовищем, погодних умов та часу доби [5, 9]. Отже, зазначені методи доцільно розглядати переважно як засоби попереднього дистанційного обстеження та визначення ділянок, що потребують подальшої перевірки.

Магнітометричний метод ґрунтується на реєстрації локальних аномалій магнітного поля, зумовлених наявністю феромагнітних об'єктів. Використання магнітометрів на БпЛА дає змогу здійснювати дистанційний пошук відповідних об'єктів, що підтверджено результатами польових досліджень [34, 23].

Основним обмеженням методу є залежність результативності виявлення від наявності феромагнітних складових у конструкції ВНП. Крім того, на територіях зі значною кількістю металевих уламків можуть виникати численні магнітні аномалії, що ускладнює розпізнавання потенційно небезпечних об'єктів.

Біофізичний (кінологічний) метод ґрунтується на здатності спеціально підготовлених собак виявляти запахові ознаки вибухових речовин. Його перевагою є можливість пошуку ВНП незалежно від наявності металевих складових. Водночас результативність застосування залежить від підготовки тварини, умов навколишнього середовища, тривалості безперервної роботи та організації пошукових заходів.

Поєднання кінологічних розрахунків із роботизованими засобами можливе в межах робото-біологічних систем, у яких біологічна та технічна підсистеми виконують взаємодоповнювальні функції [14]. Однак такий підхід не передбачає безпосереднього встановлення біологічного засобу виявлення на роботизований носій, що необхідно враховувати під час порівняння технологій.

Газоаналітичний (хімічний) метод передбачає реєстрацію хімічних речовин або їх слідових концентрацій, пов'язаних із вибуховими матеріалами. Його потенційною перевагою є можливість виявлення ВНП незалежно від наявності металевих складових. Водночас результативність залежить від концентрації речовин, умов їх поширення в навколишньому середовищі, чутливості сенсорів та тривалості вимірювання [30, 18].

Застосування газоаналітичних сенсорів на НРК створює передумови для дистанційного пошуку вибухонебезпечних об'єктів, проте потребує врахування інерційності вимірювання, впливу метеорологічних чинників і можливості появи сторонніх хімічних сигналів.

Узагальнення результатів порівняльного аналізу (табл. 1) свідчить, що розглянуті методи характеризуються різними поєднаннями переваг та обмежень. Методи з високим темпом дистанційного обстеження, зокрема оптичний, тепловізійний і магнітометричний, мають обмеження щодо глибини виявлення або фізичних характеристик об'єктів. Водночас методи, здатні виявляти неметалеві ВНП, можуть характеризуватися нижчим темпом обстеження, залежністю від умов середовища або підвищеною схильністю до хибних спрацювань.

Отримані результати не дають підстав визначити універсальний метод, який мав би переваги за всіма розглянутими характеристиками. Водночас взаємодоповнювальний характер технологій свідчить про доцільність їх комплексування в межах багатосенсорних роботизованих систем із розподілом функцій між наземними та повітряними носіями.

Таким чином, вибір методів виявлення ВНП доцільно здійснювати з урахуванням конкретних умов протимінної діяльності, характеристик потенційно небезпечних об'єктів, можливостей роботизованих платформ та необхідного рівня безпеки особового складу.

Результати випробувань вітчизняних НРК

Комплекс “NEO-1”. Апаратно-програмний роботизований комплекс дистанційного металопошуку “NEO-1” виробництва ТОВ “Роботехнікс” (м. Київ) пройшов практичні випробування, проведені фахівцями Центру протимінної діяльності Державної спеціальної служби транспорту (ДССТ). Комплекс оснащено імпульсним широкоформатним багатоканальним металодетектором із шириною смуги пошуку 1390 мм, системою GPS-навігації та відеокамерою на тривісному підвісі з десятикратним оптичним збільшенням і режимом нічного бачення [2].

За результатами випробувань підтверджено здатність комплексу виявляти макети протипіхотних мін із малим вмістом металу на глибині до 15 см, а також макети протитранспортних мін і снарядів із великим вмістом металу — на глибині до 30 см. Координати виявлених об'єктів автоматично фіксуються на пульті керування, що створює можливості для картографування потенційно забруднених ділянок [2].

Водночас під час випробувань виявлено низку функціональних і конструктивних обмежень. Зокрема, комплекс не оснащено засобами виявлення ВНП, установлених із використанням розтяжок. Крім того, механізм кріплення рамки металодетектора не забезпечує її адаптації до нерівностей поверхні. Унаслідок цього під час руху пересіченою місцевістю можливий контакт рамки з ґрунтом, що створює ризик некоректної роботи сенсора та, за певних умов, небезпечного механічного впливу на ВНП. Додатковим недоліком є відсутність у технічній документації визначених методів і засобів евакуації знерухомленої платформи.

Отримані результати свідчать про можливість використання комплексу “NEO-1” для дистанційного металопошуку переважно на рівнинних ділянках, зокрема сільськогосподарських угіддях і дорогах без значних перепадів рельєфу. Водночас його застосування на пересіченій місцевості потребує вдосконалення конструкції кріплення сенсорного обладнання та додаткового оцінювання експлуатаційної безпеки.

Автономна платформа ТОВ “Френдт”. Безпілотна автономна платформа для пошуку ВНП виробництва ТОВ “Френдт” (м. Вінниця) є дослідним зразком колісної конструкції, здатним функціонувати в режимах дистанційного керування та автономного руху за попередньо визначеним маршрутом. Під час випробувань оцінювалися дальність радіокерування й передавання відеопотоку, навантаження колеса на муляж міни ТМ-62, а також точність відтворення заданого маршруту [2].

За результатами випробувань установлено стабільну керованість платформою та передавання відеопотоку на відстані до 700 м. Під час наїзду колесом на муляж міни ТМ-62 зафіксовано навантаження в межах 62–87 кг. Автори випробувань зіставили отримані значення із зазначеним у дослідженні зусиллям спрацювання підривника 120 кг [2].

Водночас наведені результати характеризують лише умови конкретного випробування. Порівняння виміряного навантаження з одним значенням порога спрацювання не є достатньою підставою для висновку про безпечність руху платформи територіями, забрудненими протитранспортними мінами. Для такого висновку необхідно враховувати тип і технічний стан підривника, особливості передавання навантаження, характеристики поверхні та інші чинники, що можуть впливати на ініціювання вибухонебезпечного предмета.

Серед виявлених експлуатаційних обмежень платформи — чутливість до завад засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) і втрата сигналу GPS. Крім того, конструкцією не передбачено безпечного подолання ділянок із протипіхотними мінами та ВНП, установленими з використанням розтяжок.

Отже, результати випробувань платформи ТОВ “Френдт” підтверджують працездатність окремих функцій дистанційного керування, передавання відеоданих та автономного переміщення за заданим маршрутом. Проте наявні дані не дають підстав вважати її безпечною для переміщення замінованими територіями без додаткових спеціалізованих випробувань.

Типологія виявлених недоліків. Для систематизації результатів випробувань комплексу “NEO-1” та автономної платформи ТОВ “Френдт” виявлені недоліки згруповано на чотири типи: сенсорно-функціональні, конструктивно-механічні, навігаційно-комунікаційні та експлуатаційно-документаційні.

Узагальнення встановлених обмежень, їхніх можливих наслідків і напрямів усунення наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Типологія недоліків вітчизняних НРК, виявлених під час випробувань

Тип недоліку	Прояв або обмеження	Наслідок	Напрям усунення
Сенсорно-функціональні	Не передбачено виявлення ВНП на розтяжках (обидва зразки); не передбачено подолання ділянок із протипіхотними мінами (“Френдт”); можливий вплив металевих складових платформи на сенсори	Звуження сценаріїв застосування, ризик пропуску ВНП	Розглянути інтеграцію засобів виявлення розтяжок, розмежування функцій із БпЛА та зменшення впливу металевих складових платформи на сенсори
Конструктивно-механічні	Кріплення рамки металодетектора не забезпечує адаптації до нерівностей (“NEO-1”); недостатній захист електронних вузлів	Ризик небезпечного контакту з ВНП, некоректна робота сенсора, пошкодження обладнання	Адаптивна підвіска рамки з підтриманням заданої висоти; захист електронних вузлів від вологи, пилу та вибухових чинників
Навігаційно-комунікаційні	Чутливість до завад РЕБ, втрата сигналу GPS (“Френдт”)	Втрата керування, зниження точності навігації та картографування	Резервування каналів керування, застосування альтернативних засобів навігації
Експлуатаційно-документаційні	Відсутність у документації методів і засобів евакуації знерухомленої платформи (“NEO-1”)	Ускладнення безпечного повернення платформи	Розроблення процедур евакуації, їх включення до технічної документації та перевірка під час випробувань

Джерело: систематизовано авторами за [2]. Окремі напрями усунення мають рекомендаційний характер і не є результатами випробувань.

Аналіз даних табл. 2 свідчить, що значна частина встановлених обмежень пов'язана не лише з характеристиками сенсорного обладнання, а й з особливостями його інтеграції з роботизованими платформами, конструктивними рішеннями, надійністю систем керування та врахуванням практичних процедур протимінної діяльності.

Зокрема, для комплексу “NEO-1” суттєве значення мають конструктивні обмеження механізму кріплення металодетектора та відсутність документально визначених процедур евакуації. Для платформи ТОВ “Френдт” важливими залишаються забезпечення стійкості керування в умовах радіоелектронних завад і визначення допустимих умов експлуатації.

Виявлені недоліки свідчать про доцільність залучення фахівців із протимінної діяльності до формування технічних вимог, розроблення та випробування роботизованих комплексів. Такий підхід може сприяти узгодженню конструктивних характеристик техніки з реальними умовами виконання завдань, підвищенню її експлуатаційної придатності та зниженню ризиків для персоналу.

Можливості та обмеження БпЛА й алгоритмів машинного навчання

У протимінній діяльності в Україні безпілотні літальні апарати (БпЛА) використовуються насамперед для нетехнічного обстеження територій, картографування та визначення меж ділянок, підозрюваних на забруднення вибухонебезпечними предметами (ВНП) [28, 21]. Застосування БпЛА створює можливості для дистанційного отримання просторових даних і попереднього оцінювання потенційно небезпечних територій без необхідності безпосереднього перебування персоналу в зоні ризику.

Залежно від типу платформи та характеристик корисного навантаження БпЛА можуть оснащуватися оптичними й тепловізійними камерами [27, 33], мультиспектральними сенсорами [29, 11], магнітометрами [34, 23] і георадарами [16, 32]. Використання різних типів сенсорів дає змогу отримувати взаємодоповнювальні дані про характеристики поверхні, підповерхневі неоднорідності та фізичні ознаки потенційно небезпечних об’єктів.

Отримані результати дистанційного зондування можуть інтегруватися в геоінформаційні системи (ГІС) для картографування підозрілих ділянок, систематизації просторових даних і планування подальших заходів протимінної діяльності [21]. Водночас наявність аномалій, виявлених за допомогою сенсорів БпЛА, не є достатньою підставою для однозначної ідентифікації ВНП без додаткової перевірки.

Перспективним напрямом підвищення ефективності оброблення даних дистанційного зондування є використання алгоритмів машинного та глибокого навчання. Зазначені алгоритми забезпечують можливість автоматизованого пошуку ознак ВНП на зображеннях, попереднього визначення потенційно небезпечних об’єктів і зменшення обсягу даних, що потребують безпосереднього перегляду оператором [10, 9, 20].

Водночас результативність алгоритмів залежить від репрезентативності навчальних вибірок, характеристик сенсорних даних, умов спостереження та відповідності тестових даних умовам практичного застосування. Зокрема, у дослідженні Baur et al. [10] зафіксовано зниження показника результативності моделі Faster R-CNN із 99,3 % на частково відкладеній тестовій вибірці до 71,5 % на повністю відкладеній вибірці. Така відмінність свідчить про обмежену узагальнювальну здатність моделі та необхідність її перевірки на незалежних наборах даних.

Отже, результати, отримані в контрольованих експериментальних умовах, не можуть автоматично переноситися на інші типи ВНП, характеристики ґрунтового середовища, сезони та умови спостереження. Зокрема, твердження про зменшення кількості помилок операторів унаслідок застосування алгоритмів машинного навчання слід розглядати як потенційний ефект, що потребує експериментального підтвердження на репрезентативних даних, отриманих в умовах протимінної діяльності в Україні.

До основних практичних обмежень застосування таких алгоритмів належать необхідність використання сенсорів із достатніми характеристиками просторової та спектральної роздільної здатності, потреба в обчислювальних ресурсах для оброблення значних масивів даних, а також формування якісних і репрезентативних навчальних вибірок [26].

Таким чином, поєднання БпЛА, різнорідних сенсорів і алгоритмів машинного навчання створює передумови для вдосконалення дистанційного обстеження територій, автоматизації попереднього аналізу даних і підвищення інформаційного забезпечення протимінної діяльності. Водночас практичне впровадження зазначених технологій потребує перевірки їхньої результативності в реальних умовах, оцінювання надійності виявлення та визначення процедур подальшого підтвердження потенційно небезпечних об’єктів уповноваженими фахівцями.

Концептуальна схема багаторівневої роботизованої системи

На підставі результатів критеріального порівняння методів виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП) (табл. 1) та систематизації недоліків наземних роботизованих комплексів (НРК) (табл. 2) запропоновано концептуальну схему чотирирівневої роботизованої системи для забезпечення виконання завдань протимінної діяльності.

Основою запропонованої схеми є функціональний розподіл завдань між безпілотними літальними апаратами (БпЛА), наземними роботизованими комплексами, піротехнічними групами та інформаційною підсистемою. Такий підхід передбачає використання взаємодоповнювальних можливостей різних технічних засобів з урахуванням характеру забруднення територій, умов місцевості та встановлених експлуатаційних обмежень.

Перший рівень — дистанційне площинне обстеження територій із використанням БпЛА. На цьому рівні передбачається застосування безпілотних платформ, оснащених оптичними, тепловізійними, мультиспектральними та магнітометричними сенсорами. Основними завданнями є отримання первинних просторових даних, виявлення потенційних ознак забруднення територій ВНП, уточнення меж підозрілих ділянок і визначення пріоритетності їх подальшого обстеження.

Застосування БпЛА дає змогу здійснювати дистанційне спостереження без безпосереднього перебування персоналу на потенційно небезпечній території. Водночас результати такого обстеження мають попередній характер і потребують подальшої перевірки відповідно до встановлених процедур протимінної діяльності.

Другий рівень — технічне обстеження підозрілих ділянок із використанням НРК. На цьому рівні передбачається застосування наземних роботизованих платформ, оснащених металодетекторами, а за наявності відповідних технічних можливостей — георадарами та відеосистемами з алгоритмами автоматизованого розпізнавання потенційно небезпечних об'єктів.

Основними завданнями НРК є дистанційне дослідження визначених ділянок, виявлення аномалій, отримання додаткових даних про потенційно небезпечні об'єкти та фіксація їхніх координат. Інформація, отримана за допомогою НРК, може використовуватися для уточнення результатів попереднього обстеження та планування подальших дій спеціалізованих підрозділів.

Вибір конкретного роботизованого комплексу повинен здійснюватися з урахуванням характеристик рельєфу, типів імовірних ВНП, можливостей сенсорного обладнання, надійності систем керування та результатів попередніх випробувань.

Третій рівень — перевірка та знешкодження виявлених ВНП спеціалізованими підрозділами. На цьому рівні передбачається залучення піротехнічних груп для перевірки результатів дистанційного обстеження, підтвердження характеру виявлених об'єктів та виконання заходів зі знешкодження ВНП відповідно до встановлених процедур безпеки.

За необхідності можуть залучатися кінологічні розрахунки та роботизовані маніпулятори. Використання зазначених засобів визначається характером виявлених об'єктів, умовами місцевості та функціональними можливостями відповідних підрозділів.

При цьому результати автоматизованого виявлення та розпізнавання ВНП розглядаються як інформаційна основа для ухвалення рішень уповноваженими фахівцями, а не як самостійне підтвердження типу або безпеки виявленого об'єкта.

Четвертий рівень — інформаційне забезпечення та інтеграція результатів обстеження. Цей рівень передбачає збирання, систематизацію та узагальнення даних, отриманих за допомогою БпЛА, НРК і спеціалізованих підрозділів, а також їх подальше використання в геоінформаційних системах (ГІС).

Основними функціями інформаційної підсистеми є формування просторової бази даних, документування результатів обстеження, забезпечення інформаційної взаємодії між учасниками протимінної діяльності та передавання відповідних відомостей до державного реєстру територій, забруднених ВНП, у встановленому порядку.

На відміну від перших трьох рівнів, які характеризують послідовність виконання окремих функціональних завдань, четвертий рівень має наскрізний характер і забезпечує інформаційну підтримку на всіх етапах роботи.

Запропонована схема узгоджується з концепціями застосування флотів безпілотних платформ і робото-біологічних систем, розглянутими у працях Федоренка та ін. [7] і Fedorenko et al. [14]. Водночас її особливістю є врахування обмежень вітчизняних НРК, установлених за результатами опублікованих випробувань, зокрема недостатньої адаптації сенсорного обладнання до нерівностей рельєфу, відсутності засобів виявлення розтяжок і вразливості окремих систем керування до радіоелектронних завад.

Урахування зазначених обмежень дає змогу визначати доцільні сфери застосування конкретних роботизованих засобів та формувати вимоги до їх подальшого вдосконалення.

Таким чином, запропонована чотирирівнева схема відображає концептуальний підхід до комплексного використання роботизованих і безпілотних засобів у протимінній діяльності. Її практична реалізація потребує подальшого технічного обґрунтування, визначення процедур інформаційної взаємодії, перевірки сумісності обладнання та проведення випробувань у репрезентативних умовах експлуатації.

Обговорення

Узгодженість із попередніми дослідженнями. Результати проведеного аналізу щодо відсутності універсального методу виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП), який одночасно забезпечував би високий темп обстеження територій, низьку схильність до хибних спрацювань і можливість виявлення об’єктів незалежно від наявності металевих складових, узгоджуються з висновками Habib [18], Kasban et al. [22] та Кривцуна і Ляшенка [5]. Водночас доцільність комплексування різнорідних сенсорів і роботизованих платформ відповідає концептуальним підходам, запропонованим Федоренком та ін. [7] і Fedorenko et al. [14].

Внесок цього дослідження полягає в систематизації характеристик методів виявлення ВНП за чотирма визначеними критеріями з використанням порядкових шкал оцінювання. Запропонований підхід забезпечує структуроване зіставлення переваг та обмежень окремих технологій і створює методичну основу для подальшого уточнення оцінок у міру накопичення нових експериментальних даних. Водночас відтворюваність порівняння залежить від однозначності критеріїв, прозорості процедури присвоєння оцінок і повноти використаної джерельної бази.

Відмінності від попередніх досліджень. Значна частина проаналізованих зарубіжних публікацій присвячена виявленню поверхневих ВНП із БпЛА та алгоритмів автоматизованого оброблення зображень [27, 10, 33]. Польові випробування окремих сенсорних систем

проводилися поза районами активних бойових дій [23]. У зазначених працях основну увагу приділено характеристикам сенсорів, алгоритмам оброблення даних і результативності виявлення, тоді як питання функціонування роботизованих засобів в умовах інтенсивної радіоелектронної протидії не належать до основних предметів дослідження.

Натомість результати випробувань вітчизняних наземних роботизованих комплексів (НРК) засвідчили наявність навігаційно-комунікаційних обмежень, зокрема чутливість окремих платформ до радіоелектронних завад і втрату сигналу GPS [2]. Це свідчить про необхідність урахування умов застосування роботизованих засобів в Україні під час формування технічних вимог та оцінювання їхньої експлуатаційної придатності.

Крім того, у зарубіжних дослідженнях наземних роботизованих платформ приділено увагу адаптації положення сенсорного обладнання до нерівностей поверхні [30, 15]. Водночас виявлений під час випробувань комплексу “NEO-1” недолік кріплення рамки металодетектора свідчить про недостатнє врахування цієї вимоги під час розробки конкретного зразка. Проте зазначений результат не дає підстав для узагальнення відповідного недоліку на всі вітчизняні НРК.

Можливі причини виявлених обмежень. Виявлені відмінності між результатами зарубіжних досліджень і випробувань окремих вітчизняних роботизованих платформ можуть бути пов’язані з особливостями умов їх розроблення та застосування.

По-перше, в умовах триваючих бойових дій зростає значення стійкості систем керування й навігації до радіоелектронних завад. З огляду на це під час оцінювання роботизованих засобів необхідно враховувати не лише характеристики сенсорного обладнання, а й надійність функціонування платформи в умовах можливого порушення зв’язку та супутникової навігації [6].

По-друге, окремі конструктивні й функціональні недоліки можуть бути пов’язані з недостатнім залученням фахівців із протимінної діяльності до визначення технічних вимог, проєктування та випробування роботизованих комплексів. На важливості врахування практичних потреб операторів розмінування наголошено в дослідженні Журахова та ін. [2].

По-третє, потенційним чинником виникнення зазначених недоліків може бути недостатня уніфікація вимог до роботизованих засобів і процедур їх випробувань для виконання завдань протимінної діяльності.

Водночас наведені пояснення мають характер наукових припущень. Для встановлення причинно-наслідкових зв’язків між організацією розроблення техніки, процедурою випробувань і виявленими експлуатаційними обмеженнями необхідні додаткові емпіричні дані, зокрема результати аналізу технічної документації, програм випробувань та взаємодії розробників із кінцевими користувачами.

Практичні наслідки для підрозділів системи МВС України. Результати дослідження можуть бути використані під час визначення вимог до роботизованих засобів, планування їх упровадження та вдосконалення підготовки особового складу відповідних підрозділів.

Для піротехнічних підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), які виконують завдання гуманітарного розмінування, особливого значення набувають прохідність НРК, адаптація сенсорного обладнання до нерівностей рельєфу, можливість дистанційного обстеження підозрілих ділянок і наявність безпечних процедур евакуації знерухомленої техніки.

Для вибухотехнічних підрозділів Національної поліції України важливими є мобільність роботизованих засобів, можливість дистанційного огляду потенційно небезпечних об’єктів, якість відеоспостереження та інтеграція роботизованих платформ із технічними засобами, що використовуються під час виконання спеціалізованих вибухотехнічних завдань.

Для підрозділів Національної гвардії України, які застосовують роботизовані засоби в умовах підвищеної загрози радіоелектронної протидії, додаткового значення набувають стійкість систем керування, наявність резервних каналів зв’язку, можливість функціонування

за відсутності сигналів супутникової навігації та відповідність технічних характеристик умовам виконання визначених завдань.

З огляду на результати дослідження доцільно рекомендувати:

1. **Удосконалення процедур оцінювання та закупівлі НРК.** Під час визначення потреб у роботизованих засобах необхідно враховувати результати незалежних випробувань, відповідність технічних характеристик конкретним завданням і можливість безпечної експлуатації в передбачених умовах застосування.
2. **Комплексування сенсорних технологій.** Доцільно розглядати можливість поєднання БпЛА та НРК у межах єдиної системи обстеження територій із функціональним розподілом завдань між повітряними та наземними платформами. При цьому інтеграція різнорідних сенсорів потребує перевірки їхньої технічної сумісності та оцінювання результативності спільного застосування.
3. **Підвищення надійності керування та навігації.** Під час розроблення й модернізації роботизованих комплексів необхідно передбачати резервування каналів керування, використання альтернативних засобів навігації та визначення безпечних режимів функціонування в разі втрати зв’язку або навігаційного сигналу.
4. **Удосконалення інформаційної взаємодії.** Доцільно забезпечувати документування результатів дистанційного обстеження, фіксування координат потенційно небезпечних об’єктів та передавання перевірених даних до відповідних інформаційних систем і державних реєстрів у встановленому порядку.
5. **Удосконалення підготовки особового складу.** Програми підготовки операторів НРК доцільно доповнити питаннями організації протимінної діяльності, особливостей застосування сенсорних технологій, практичного керування роботизованими платформами на різних типах місцевості, взаємодії з піротехнічними та кінологічними підрозділами, а також порядку дій у разі втрати зв’язку або сигналів супутникової навігації.

Реалізація зазначених рекомендацій може сприяти підвищенню експлуатаційної придатності роботизованих засобів, удосконаленню організації дистанційного обстеження територій та зменшенню необхідності безпосереднього перебування персоналу в потенційно небезпечних зонах. Водночас фактичний вплив запропонованих заходів на продуктивність і безпеку протимінної діяльності потребує експериментальної перевірки.

Обмеження дослідження та їх вплив на висновки. Емпірична частина дослідження ґрунтується на вторинному аналізі опублікованих результатів випробувань двох зразків вітчизняних НРК. У зв’язку з цим запропоновану типологію недоліків слід розглядати як попередню, що потребує перевірки та уточнення на ширшій вибірці роботизованої техніки.

Крім того, порядкові оцінки, використані в табл. 1, характеризують відносні переваги й обмеження методів виявлення ВНП, але не забезпечують можливості кількісного порівняння їхньої продуктивності, імовірності виявлення та частоти хибних спрацювань. Тому в дослідженні не визначено кількісних показників підвищення ефективності застосування НРК порівняно з традиційними методами обстеження територій.

Запропонована концептуальна схема чотирирівневої роботизованої системи також не пройшла експериментальної перевірки як єдиний інтегрований комплекс. Її практична реалізація потребує подальшого дослідження технічної сумісності складових, надійності інформаційної взаємодії, експлуатаційної безпеки та відповідності нормативним вимогам протимінної діяльності.

Зазначені обмеження визначають напрями подальших досліджень, пов’язаних із розширенням емпіричної бази, удосконаленням критеріїв оцінювання роботизованих засобів та експериментальною перевіркою результативності їх комплексного застосування.

Висновки

Обґрунтовано доцільність застосування НРК і БпЛА для дистанційного виявлення та попередньої ідентифікації ВНП з огляду на масштаби забруднення території України та необхідність зниження ризиків для особового складу. Використання роботизованих засобів дає змогу дистанційно розміщувати сенсорне обладнання в потенційно небезпечних зонах і зменшувати необхідність безпосереднього перебування в них фахівців. Водночас кількісне оцінювання приросту продуктивності обстеження територій у межах цього дослідження не здійснювалося.

За результатами критеріального порівняння семи методів виявлення ВНП установлено, що кожен із них характеризується специфічним поєднанням переваг та обмежень за темпом обстеження території, схильністю до хибних спрацювань, здатністю виявляти неметалеві об'єкти та придатністю до застосування на роботизованих носіях. Методи, які забезпечують високий темп дистанційного обстеження, можуть мати обмеження щодо глибини виявлення або селективності, тоді як технології виявлення неметалевих ВНП характеризуються залежністю від умов навколишнього середовища та характеристик сенсорного обладнання. Отримані результати обґрунтовують доцільність комплексування взаємодоповнювальних методів у межах багатосенсорних роботизованих систем.

Аналіз опублікованих результатів випробувань комплексу “NEO-1” та автономної платформи ТОВ “Френдт” підтвердив працездатність окремих функцій вітчизняних роботизованих засобів, зокрема дистанційного металопошуку, керування, передавання відеоданих і автономного переміщення за визначеним маршрутом. Водночас виявлені конструктивні, функціональні й експлуатаційні обмеження не дають підстав вважати підтвердженою придатність зазначених зразків для виконання повного комплексу завдань гуманітарного розмінування. Систематизовано чотири групи недоліків: сенсорно-функціональні, конструктивно-механічні, навігаційно-комунікаційні та експлуатаційно-документаційні. Їх урахування є необхідною передумовою для подальшого вдосконалення НРК і визначення допустимих умов їх застосування.

Запропоновано концептуальну схему чотирирівневої взаємодії “БпЛА — НРК — піротехнічна група — інформаційний контур”, що передбачає функціональний розподіл завдань дистанційного площинного обстеження, технічного обстеження підозрілих ділянок, перевірки та знешкодження ВНП, а також наскрізне інформаційне забезпечення цих процесів. На основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації для підрозділів системи Міністерства внутрішніх справ України щодо вдосконалення процедур оцінювання, закупівлі та випробувань НРК, підвищення надійності систем керування й навігації, інтеграції просторових даних і підготовки операторів. Запропонована схема має концептуальний характер і потребує подальшої експериментальної перевірки.

Визначено перспективні напрями подальших досліджень, серед яких розроблення уніфікованої методики оцінювання ефективності НРК, проведення власних польових випробувань у репрезентативних умовах, формування вітчизняних наборів даних для навчання та перевірки алгоритмів автоматизованого розпізнавання ВНП, обґрунтування типажу роботизованих комплексів для різних умов застосування, а також удосконалення нормативно-правового забезпечення їх сертифікації та закупівлі. Окремої уваги потребує кількісне оцінювання впливу комплексного застосування роботизованих засобів на продуктивність, результативність і безпеку протимінної діяльності.

Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

Використання штучного інтелекту

Під час підготовки рукопису використовувалися інструменти штучного інтелекту для мовностилістичного редагування та перекладу окремих фрагментів тексту англійською мовою. Остаточне редагування, перевірка джерел і змісту рукопису здійснювалися авторами. Автори несуть повну відповідальність за зміст роботи.

Список використаних джерел

1. Горбулін В. П. Світова глобальна проблема розмінування: український вектор. *Вісник Національної академії наук України*. 2022. № 2. С. 3–13. DOI: https://doi.org/10.15407/visn2022.02.003.
2. Журахов О. В., Захарченко Д. С., Чередніков О. М. Оцінка можливості використання зразків наземних роботизованих комплексів для технічного обстеження територій, імовірно забруднених вибухонебезпечними предметами. *Випробування та сертифікація*. 2025. Т. 3, № 9. С. 22–28. DOI: https://doi.org/10.37701/ts.09.2025.03.
3. Про національну безпеку України : Закон України від 21.06.2018 № 2469-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19.
4. Про протимінну діяльність в Україні : Закон України від 06.12.2018 № 2642-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19.
5. Кривцун В. І., Ляшенко В. А. Теоретичні підходи щодо вибору методів виявлення вибухонебезпечних предметів в середовищах, що їх приховують, переваги та недоліки. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2024. № 1(19). С. 81–91. DOI: https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.10.
6. Минько О. В., Федоров М. В., Латашинський О. П. Проблемні питання організації застосування безпілотних комплексів у силах безпеки та оборони України на сучасному етапі війни. Честь і закон. 2024. № 4 (91). С. 68–74. DOI: https://doi.org/10.33405/2078-7480/2024/4/91/324077
7. Федоренко Г. Л., Фесенко Г. В., Харченко В. С. Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 4(22). С. 20–31. DOI: https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.020.
8. Шафоростов Д., Янушкевич Д. Робототехнічні системи та їх застосування для пошуку вибухонебезпечних предметів. *M&MS 2022 : матеріали конференції, 21–22 жовтня 2022 р.* Харків : ХНУРЕ, 2022. С. 92–94.
9. Bajić M., Potočnik B. UAV thermal imaging for unexploded ordnance detection by using deep learning. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 4. Article 967. DOI: https://doi.org/10.3390/rs15040967.
10. Baur J., Steinberg G., Nikulin A., Chiu K., de Smet T. S. Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No. 5. Article 859. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12050859.
11. 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: https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.002.
12. Daniels D. J. A review of GPR for landmine detection. *Sensing and Imaging*. 2006. Vol. 7. P. 90–123. DOI: https://doi.org/10.1007/s11220-006-0024-5.

13. de Smet T. S., Nikulin A., Frazer W., Baur J., Abramowitz J., Finan D., Denara S., Aglietti N., Campos G. Drones and “butterflies”: A low-cost UAV system for rapid detection and identification of unconventional minefields. *The Journal of Conventional Weapons Destruction*. 2018. Vol. 22, No. 3. P. 50–58. URL: https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol22/iss3/10/.
14. Fedorenko G., Fesenko H., Kharchenko V., Kliushnikov I., Tolkunov I. Robotic-biological systems for detection and identification of explosive ordnance: Concept, general structure, and models. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023. No. 2. P. 143–159. DOI: https://doi.org/10.32620/reks.2023.2.12.
15. Freese M., Matsuzawa T., Oishi Y., Debenest P., Takita K., Fukushima E. F., Hirose S. Robotics-assisted demining with Gryphon. *Advanced Robotics*. 2007. Vol. 21, No. 15. P. 1763–1786.
16. García-Fernández M., Álvarez-López Y., Arboleya-Arboleya A., González-Valdés B., Rodríguez-Vaqueiro Y., Las-Heras Andrés F., Pino García A. Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 45100–45112. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863572.
17. García-Fernández M., Álvarez-López Y., Las-Heras Andrés F. Airborne multi-channel ground penetrating radar for improvised explosive devices and landmine detection. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 165927–165943. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022624.
18. Habib M. K. Humanitarian demining: Reality and the challenge of technology – the state of the arts. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2007. Vol. 4, No. 2. DOI: https://doi.org/10.5772/5699.
19. Harvey, A., & LeBrun, E. (2023). Computer vision detection of explosive ordnance: A high-performance 9N235/9N210 cluster submunition detector. The Journal of Conventional Weapons Destruction, 27(2), Article 9. https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol27/iss2/9/
20. Heuschmid, D., Wacker, O., Zimmermann, Y., Penava, P., & Buettner, R. (2025). Advancements in landmine detection: Deep learning-based analysis with thermal drones. IEEE Access, 13, 91777–91794. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3572196
21. Hutsul T., Khobzei M., Tkach V., Krulikovskyi O., Moisiuk O., Ivashko V., Samila A. Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, No. 7. Article e29142. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142.
22. Kasban, H., Zahran, O., Elaraby, S. M., El-Kordy, M., & Abd El-Samie, F. E. (2010). A comparative study of landmine detection techniques. Sensing and Imaging, 11(3), 89–112. https://doi.org/10.1007/s11220-010-0054-x
23. Kuru K., Sujit A., Ansell D., Pinder J. M., Jones D., Watkinson B. J., Hamila R., Tinker-Mill C. Intelligent, automated, rapid, and safe landmine, improvised explosive device and unexploded ordnance detection using Maggy. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 165736–165755. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3493013.
24. *Landmine Monitor 2023*. International Campaign to Ban Landmines – Cluster Munition Coalition. 2023. URL: https://www.the-monitor.org/en-gb/reports/2023/landmine-monitor-2023/major-findings.aspx.
25. Площа потенційно замінованих земель порівняно з кінцем 2022 року зменшилася на понад 20%. *LB.ua*. 24.06.2025. URL: https://lb.ua/economics/2025/06/24/683366_ploshcha_potentsiyno_zaminovanih_zemel.html.
26. Levchenko D., Podorozhniak A., Liubchenko N. Tools and methods for explosive objects detection using artificial intelligence and computer vision. *Control, Navigation and*

Communication Systems. 2025. No. 3. P. 117–121. DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.3.117-121.

27. Nikulin A., de Smet T. S., Baur J., Frazer W. D., Abramowitz J. C. Detection and identification of remnant PFM-1 “butterfly mines” with a UAV-based thermal-imaging protocol. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, No. 11. Article 1672. DOI: https://doi.org/10.3390/rs10111672.
28. 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: https://doi.org/10.3849/aimt.01722.
29. 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. Article 5693. DOI: https://doi.org/10.3390/s23125693.
30. Rachkov, M. Y., Marques, L., & de Almeida, A. T. (2005). Multisensor demining robot. Autonomous Robots, 18(3), 275–291. https://doi.org/10.1007/s10514-005-6840-y
31. Santana P. F., Barata J., Correia L. Sustainable robots for humanitarian demining. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2007. Vol. 4, No. 2. P. 207–218. DOI: https://doi.org/10.5772/5695.
32. Šipoš D., Gleich D. A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 8. Article 2234. DOI: https://doi.org/10.3390/s20082234.
33. 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. Article 677. DOI: https://doi.org/10.3390/rs16040677.
34. Yoo L.-S., Lee J.-H., Lee Y.-K., Jung S.-K., Choi Y. Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 9. Article 3175. DOI: https://doi.org/10.3390/s21093175.

References

1. Horbulin, V. P. (2022). Svitova hlobalna problema rozminuvannia: Ukrainskyi vektor [The global problem of demining: The Ukrainian perspective]. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*, (2), 3–13. https://doi.org/10.15407/visn2022.02.003 [in Ukrainian].
2. Zhurakhov, O. V., Zakharchenko, D. S., & Cherednikov, O. M. (2025). Otsinka mozhlyvosti vykorystannia zrazkiv nazemnykh robotyzovanykh kompleksiv dlia tekhnichnoho obstezhennia terytorii, imovirno zabrudnenykh vybukhonebezpechnymy predmetamy [Assessment of the feasibility of using ground robotic systems for technical surveys of areas suspected of explosive ordnance contamination]. *Vyprobuvannia ta sertyfikatsiia, 3*(9), 22–28. https://doi.org/10.37701/ts.09.2025.03 [in Ukrainian].
3. Verkhovna Rada of Ukraine. (2018, June 21). *Pro natsionalnu bezpeku Ukrainy [On the national security of Ukraine]* (Law No. 2469-VIII). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19 [in Ukrainian].
4. Verkhovna Rada of Ukraine. (2018, December 6). *Pro protyminnu diialnist v Ukraini [On mine action in Ukraine]* (Law No. 2642-VIII). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2642-19 [in Ukrainian].
5. Kryvtsun, V. I., & Liashenko, V. A. (2024). Teoretychni pidkhody shchodo vyboru metodiv vyiavlennia vybukhonebezpechnykh predmetiv v seredovyshchakh, shcho yikh prykhovuiut, perevahy ta nedoliky [Theoretical approaches to selecting methods for detecting explosive ordnance in concealing environments: Advantages and disadvantages]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky*, (1[19]), 81–91. https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.10 [in Ukrainian].

6. Mynko, O. V., Fedorov, M. V., & Latashynskyi, O. P. (2024). Problemni pytannia orhanizatsii zastosuvannia bezpilotnykh kompleksiv u sylakh bezpeky ta oborony Ukrainy na suchasnomu etapi viiny [Problematic issues of organizing the employment of unmanned systems in the security and defense forces of Ukraine at the current stage of the war]. Chest i Zakon, 4(91), 68–74. https://doi.org/10.33405/2078-7480/2024/4/91/324077 [in Ukrainian].
7. Fedorenko, H. L., Fesenko, H. V., & Kharchenko, V. S. (2022). Analiz metodiv i rozroblennia kontseptsii harantovanoho vyiavlennia ta rozpiznavannia vybukhonebezpechnykh predmetiv [Analysis of methods and development of a concept for assured detection and recognition of explosive ordnance]. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti*, (4[22]), 20–31. https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.020 [in Ukrainian].
8. Shaforostov, D., & Yanushkevych, D. (2022). Robototekhnichni systemy ta yikh zastosuvannia dlia poshuku vybukhonebezpechnykh predmetiv [Robotic systems and their application in explosive ordnance detection]. In *M&MS 2022: Conference proceedings* (pp. 92–94). Kharkiv National University of Radio Electronics. [in Ukrainian].
9. Bajić, M., & Potočnik, B. (2023). UAV thermal imaging for unexploded ordnance detection by using deep learning. *Remote Sensing, 15*(4), Article 967. https://doi.org/10.3390/rs15040967
10. Baur, J., Steinberg, G., Nikulin, A., Chiu, K., & de Smet, T. S. (2020). Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines. *Remote Sensing, 12*(5), Article 859. https://doi.org/10.3390/rs12050859
11. Cho, S., Ma, J., & Yakimenko, O. A. (2023). Aerial multi-spectral AI-based detection system for unexploded ordnance. *Defence Technology, 27*, 24–37. https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.002
12. Daniels, D. J. (2006). A review of GPR for landmine detection. *Sensing and Imaging, 7*, 90–123. https://doi.org/10.1007/s11220-006-0024-5
13. de Smet, T. S., Nikulin, A., Frazer, W., Baur, J., Abramowitz, J., Finan, D., Denara, S., Aglietti, N., & Campos, G. (2018). Drones and “butterflies”: A low-cost UAV system for rapid detection and identification of unconventional minefields. *The Journal of Conventional Weapons Destruction, 22*(3), 50–58. https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol22/iss3/10/
14. Fedorenko, G., Fesenko, H., Kharchenko, V., Kliushnikov, I., & Tolkunov, I. (2023). Robotic-biological systems for detection and identification of explosive ordnance: Concept, general structure, and models. *Radioelectronic and Computer Systems*, (2), 143–159. https://doi.org/10.32620/reks.2023.2.12
15. Freese, M., Matsuzawa, T., Oishi, Y., Debenest, P., Takita, K., Fukushima, E. F., & Hirose, S. (2007). Robotics-assisted demining with Gryphon. *Advanced Robotics, 21*(15), 1763–1786.
16. García-Fernández, M., Álvarez-López, Y., Arboleya-Arboleya, A., González-Valdés, B., Rodríguez-Vaqueiro, Y., Las-Heras Andrés, F., & Pino García, A. (2018). Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access, 6*, 45100–45112. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863572
17. García-Fernández, M., Álvarez-López, Y., & Las-Heras Andrés, F. (2020). Airborne multi-channel ground penetrating radar for improvised explosive devices and landmine detection. *IEEE Access, 8*, 165927–165943. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3022624
18. Habib, M. K. (2007). Humanitarian demining: Reality and the challenge of technology – the state of the arts. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 4*(2). https://doi.org/10.5772/5699
19. Harvey, A., & LeBrun, E. (2023). Computer vision detection of explosive ordnance: A high-performance 9N235/9N210 cluster submunition detector. The Journal of Conventional Weapons Destruction, 27(2), Article 9. https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol27/iss2/9/
20. Heuschmid, D., Wacker, O., Zimmermann, Y., Penava, P., & Buettner, R. (2025). Advancements in landmine detection: Deep learning-based analysis with thermal drones. IEEE Access, 13, 91777–91794. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3572196

21. Hutsul, T., Khobzei, M., Tkach, V., Krulikovskyi, O., Moisiuk, O., Ivashko, V., & Samila, A. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon, 10*(7), Article e29142. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142
22. Kasban, H., Zahran, O., Elaraby, S. M., El-Kordy, M., & Abd El-Samie, F. E. (2010). A comparative study of landmine detection techniques. Sensing and Imaging, 11(3), 89–112. https://doi.org/10.1007/s11220-010-0054-x
23. Kuru, K., Sujit, A., Ansell, D., Pinder, J. M., Jones, D., Watkinson, B. J., Hamila, R., & Tinker-Mill, C. (2024). Intelligent, automated, rapid, and safe landmine, improvised explosive device and unexploded ordnance detection using Maggy. *IEEE Access, 12*, 165736–165755. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3493013
24. International Campaign to Ban Landmines – Cluster Munition Coalition. (2023). *Landmine Monitor 2023*. https://www.the-monitor.org/en-gb/reports/2023/landmine-monitor-2023/major-findings.aspx
25. LB.ua. (2025, June 24). *Ploshcha potentsiino zaminovanykh zemel porivniano z kintsem 2022 roku zmenshylasia na ponad 20% [The area of potentially mined land has decreased by more than 20% compared with the end of 2022]*. https://lb.ua/economics/2025/06/24/683366_ploshcha_potentsiyno_zaminovanih_zemel.html [in Ukrainian].
26. Levchenko, D., Podorozhniak, A., & Liubchenko, N. (2025). Tools and methods for explosive objects detection using artificial intelligence and computer vision. *Control, Navigation and Communication Systems*, (3), 117–121. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.3.117-121
27. Nikulin, A., de Smet, T. S., Baur, J., Frazer, W. D., & Abramowitz, J. C. (2018). Detection and identification of remnant PFM-1 “butterfly mines” with a UAV-based thermal-imaging protocol. *Remote Sensing, 10*(11), Article 1672. https://doi.org/10.3390/rs10111672
28. Popov, M. O., Stankevich, S. A., Mosov, S. P., Titarenko, O. V., Dugin, S. S., Golubov, S. I., & Andreiev, A. A. (2022). Method for minefields mapping by imagery from unmanned aerial vehicle. *Advances in Military Technology, 17*(2), 211–229. https://doi.org/10.3849/aimt.01722
29. Qiu, Z., Guo, H., Hu, J., Jiang, H., & Luo, C. (2023). Joint fusion and detection via deep learning in UAV-borne multispectral sensing of scatterable landmine. *Sensors, 23*(12), Article 5693. https://doi.org/10.3390/s23125693
30. Rachkov, M. Y., Marques, L., & de Almeida, A. T. (2005). Multisensor demining robot. Autonomous Robots, 18(3), 275–291. https://doi.org/10.1007/s10514-005-6840-y
31. Santana, P. F., Barata, J., & Correia, L. (2007). Sustainable robots for humanitarian demining. *International Journal of Advanced Robotic Systems, 4*(2), 207–218. https://doi.org/10.5772/5695
32. Šipoš, D., & Gleich, D. (2020). A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection. *Sensors, 20*(8), Article 2234. https://doi.org/10.3390/s20082234
33. Vivoli, E., Bertini, M., & Capineri, L. (2024). Deep learning-based real-time detection of surface landmines using optical imaging. *Remote Sensing, 16*(4), Article 677. https://doi.org/10.3390/rs16040677
34. Yoo, L.-S., Lee, J.-H., Lee, Y.-K., Jung, S.-K., & Choi, Y. (2021). Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. *Sensors, 21*(9), Article 3175. https://doi.org/10.3390/s21093175

This is an open access journal and all published articles are licensed under a Creative Commons «Attribution» 4.0.