

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-43>
УДК 004.7, 004.8

АФОНІН ЮРІЙ

Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
<https://orcid.org/0009-0005-6971-417X>
e-mail: yurii.afonin@chmnu.edu.ua

САВІНОВ ВОЛОДИМИР

Чорноморський національний університет ім. Петра Могили
<https://orcid.org/0000-0002-0862-5879>
e-mail: volodymyr.savinov@chmnu.edu.ua

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ НА ОСНОВІ РОЮ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У статті представлено аналіз актуальних викликів та тенденцій застосування сучасних інформаційних технологій у галузі гуманітарного розмінування, використання безпілотних апаратів та машинного навчання для виконання завдань розмінування. Представлено концептуальну модель розподіленої системи, яка включає гетерогенну комп'ютерну мережу на основі рою безпілотних апаратів, наземних роботизованих комплексів та віддаленої станції керування. Гетерогенна мережа передбачає зв'язок між усіма типами безпілотних апаратів (літальними, наземними). Такі апарати, використовуючи спеціальні сенсори, алгоритми машинного навчання, комп'ютерний зір, призначені спростити роботу операторів-демінерів для виявлення та класифікації вибухонебезпечних предметів, пришвидшити процес ідентифікації об'єктів з метою їх подальшого розмінування.

Важливим аспектом виділено позитивну роль віддаленого керування безпілотними апаратами на безпеку оператора. Зроблено висновок про доцільність розвитку та перспективи застосування роїв гетерогенних безпілотних апаратів із машинним навчанням для виконання завдань гуманітарного розмінування.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; машинне навчання; рої дронів; гуманітарне розмінування; наземні роботизовані комплекси; комп'ютерна мережа.

AFONIN YURIY, SAVINOV VOLODYMYR

Petro Mohyla Black Sea National University

CONCEPTUAL MODEL OF A DISTRIBUTED HUMANITARIAN DEMINING SYSTEM BASED ON SWARM INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING

This article provides an analysis of the challenges and emerging trends in humanitarian demining, emphasizing the transformative potential of unmanned solutions and artificial intelligence. The escalating complexity of contaminated areas necessitates a shift from manual detection to automated, high-precision systems. The central contribution of this research is the development of a conceptual model for a distributed system that utilizes a heterogeneous unmanned systems network. Such a network based on swarm of unmanned aerial vehicles (UAV), ground robotic complexes (GRC) and coordinated through remote control station, creates a framework for autonomous site survey and unexploded ordnances (UXO) identification.

A significant portion of the study is dedicated to the application of deep learning algorithms in the recognition of explosive ordnance (EO). The paper highlights the critical relevance of Convolutional Neural Networks (CNNs) as the industry standard for spatial feature extraction and real-time object detection. Additionally, the research finds promising potential of hybrid deep machine learning models and multimodal AI models.

Modern UAVs and GRCs are increasingly designed as versatile carriers capable of hosting a wide array of equipment, ranging from high-resolution optical and thermal sensors to active induction tools and ground-penetrating radars. Installing magnetometers, hyperspectral cameras, LiDAR – allows for a multi-layered data acquisition strategy which opens opportunities for distributed systems containing various unmanned vehicles with special sensors.

The study also emphasizes the importance of demining operator safety. Shifting the UXO detection and neutralization burden to autonomous drone swarms removes human deminers from high-risk zones. The article concludes that the transition toward distributed, heterogeneous autonomous systems, powered by machine learning, represents one of the most viable paths for the future of humanitarian demining.

Keywords: unmanned aerial vehicles; machine learning; drone swarms; humanitarian demining; ground robotic complexes; computer networks.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.02.2026
Прийнята до друку / Accepted 24.02.2026
Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Афонін Юрій, Савінов Володимир

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Проблематика замінованих територій, на жаль, є як ніколи нагальною для України. За висновками експертів ООН з безпеки, Україна є однією із найбільш замінованих країн світу станом на 2025 рік (близько 140 тис. км² заміновано, проте, це не остаточні дані, оскільки активні бойові дії російського агресора проти України тривають) [1]. Беручи до уваги загальний обсяг замінованих територій, оцінку часу і коштів, які потрібні на розмінування таких масштабів, постає питання застосування сучасних ефективних методів та засобів розмінування, досвід використання яких доцільно систематизувати і масштабувати. Розвиток безпілотних технологій, штучного інтелекту (ШІ) та роїв дронів містить неабиякий потенціал для вирішення проблем, спричинених мінуванням, що також підкреслюється національною стратегією протимінної діяльності [2], технічним альманахом з промінної діяльності від МО України [3] та збільшенням кількості вітчизняних і

закордонних наукових публікацій на дотичну тематику [4–10, 13, 19].

Гуманітарне розмінування, як одне із напрямів протимінної діяльності, націлене на повне, 100 % розмінування та очищення територій від залишків вибухонебезпечних предметів (ВНП) з метою відновлення нормальної соціально-економічної активності населення на цих ділянках. Під час виконання завдань гуманітарного розмінування для виявлення ВНП використовують спеціальні пристрої, які вимагають обов'язкової присутності в зоні розмінування кваліфікованих спеціалістів – операторів-демінерів. До таких пристроїв належать [3]:

- металошукачі, міношукачі,
- магніметри,
- LiDAR-сенсори,
- інфрачервоні датчики,
- камери (RGB, тепловізійні, мультиспектральні, гіперспектральні) та ін.

Більшість пристроїв є ручними, що несе великий ризик і часто призводить до травматизації або летальних випадків у наслідок підриву ВНП. В еру стрімкого розвитку безпілотних технологій та широкого асортименту компонентів на ринку, вищезгадані пристрої можуть використовуватись у спеціалізованих наземних роботизованих комплексах (НРК) і безпілотних літальних апаратах (БпЛА). Більш того, сучасні апаратно-програмні рішення дозволяють застосувати різноманітні алгоритми, насамперед машинне навчання і технології комп'ютерного зору, що однозначно спрощує, полегшує і автоматизує виконання надзвичайно складних і небезпечних завдань гуманітарного розмінування.

Однією з найбільших переваг застосування безпілотних апаратів при технічному обстеженні потенційно небезпечних територій є безпековий чинник або, принаймні, зменшення ризиків для операторів-демінерів, оскільки вони не беруть безпосередньої участі при контакті із ВНП, перебуваючи на достатній відстані. Поєднання такої переваги із використанням алгоритмів виявлення та розпізнавання об'єктів (*комп'ютерного зору*) однозначно зменшує час ідентифікації ВНП та прийняття рішення про їх знешкодження. Серед успішних і яскравих прикладів застосування вітчизняних безпілотних технологій у галузі розмінування варто виділити НРК «Змій» [11], БпЛА «MinesEye» [12]. Завдяки поєднанню сенсорів та віддаленого керування такі апарати збільшують ефективність виконання завдань із розвідки, виявлення та знешкодження ВНП.

Аналіз досліджень та публікацій

Оглядаючи проблематику розмінування та впровадження інновацій у галузі, варто відзначити роль технологій візуального аналізу аерофотознімків, здійснених з висоти супутниками, БпЛА літакового і коптерного типів [4, 5]. Отримані фотографії опрацьовуються завдяки класичним і новітнім методам обробки зображень (*в т.ч. ШІ*) з метою виявлення потенційно небезпечних ділянок (*воронки від вибухів, випалені ділянки, місця бойових дій*), що вносяться у спеціалізовані геоінформаційні системи (ГІС) з відповідною прив'язкою до координат [6]. Такі системи дозволяють підтримувати ситуативну обізнаність та усвідомлювати масштаб забруднення територій.

Традиційні методи виявлення ВНП і розмінування включають застосування спеціалізованої механізованої техніки (*тралів, броньованих авто, машин розмінування*), спорядження (*міношукачі, металошукачі, саперні «кішки»*), навчених спеціалістів, та зазвичай ручної роботи, яка займає великий обсяг часу та несе підвищену небезпеку для життя фахівців [3]. Окрім безпосереднього шансу травматизації та загибелі від підриву ВНП, існує великий ризик ураження гуманітарних місій розмінування дронами, ракетами та іншими активними засобами ураження. Очевидно, що неможливо повністю нівелювати фізичну присутність фахівців при виконанні специфічних завдань, проте наявні ризики наштовхують на роздуми про доцільність переходу від традиційних методів до збільшення ролі безпілотної компоненти у завданнях гуманітарного розмінування.

Вбудована відеокамера як стандарт БпЛА дозволяє фахівцям візуально обстежувати небезпечні ділянки з висоти та робити аерофотозйомку для подальшого візуального аналізу. Утім, використання моделей машинного навчання та алгоритмів комп'ютерного зору в БпЛА здатне підвищити ефективність виявлення підозрілих об'єктів під час виконання завдань гуманітарного розмінування.

Моделі згорткових нейронних мереж (CNN), наприклад сімейство моделей YOLO [8, 10], моделі архітектури Transformer (ViT, DETR, RT-DETR) [13], гібридні архітектури (CNN + Transformer) [19] дозволяють розпізнавати об'єкти у режимі реального часу не лише на фото, а і відео, що надає можливість виявляти та розпізнавати дрібні об'єкти на поверхні землі з достатньо високою точністю (>50 %) за умови достатнього рівня навченості моделей на якісних датасетах. БпЛА, які «навчені» розпізнавати обриси мін та ВНП, дозволяють автоматизувати частину роботи із виявлення таких небезпечних об'єктів.

У ході 18-місячного польового дослідження, проведеного організацією Norwegian People's Aid (NPA) спільно з американською компанією Safe Pro Group, було встановлено, що використання платформи ШІ SpotlightAI для аналізу знімків з дронів підвищує продуктивність обстеження замінованих територій на понад 800 % порівняно з традиційними методами, знайдено на 550 % більше ВНП на гектар, а швидкість обстеження зросла на 300 % за годину на одну команду, що підтверджує доцільність застосування БпЛА та ШІ [14].

Окрім БпЛА у галузі розмінування активно розвиваються НРК [15]. Такі роботизовані комплекси, що керуються за допомогою пульта дистанційного керування є логічним безпілотним розвитком великих гусеничних та колісних машин розмінування. Основним застосуванням НРК зазвичай є процеси розчищення

ділянок та безпосереднього контакту із ВВП: підрив чи його переміщення. Важливим аспектом є зменшення ризику для операторів-демінерів завдяки дистанційному керуванню.

Останнім часом у різних галузях (*військовій, рятувальній, промисловій, логістичній, аграрній*) починає зростати кількість досліджень та запитів на застосування роїв дронів [7]. Такі системи працюють на основі бездротових мереж, де апарати автономно обмінюються телеметрією для виконання спільних завдань [16]. Так у Ізраїлі вже використовують рої дронів зі штучним інтелектом для збору урожаю яблук [17], а в Німеччині тестують рої ударних FPV-дронів. Настає той час, коли впровадження роїв дронів стає актуальним і для гуманітарного розмінування [18].

Формулювання цілей статті

Метою статті є узагальнення сучасних технологічних підходів виявлення ВВП, обґрунтування доцільності застосування роїв безпілотних апаратів для виконання завдань гуманітарного розмінування та представлення концептуальної моделі розподіленої системи гуманітарного розмінування, що використовує безпілотні апарати та машинне навчання.

Для досягнення мети, передбачено виконання таких завдань:

1. Здійснити узагальнення типів ВВП та сучасних засобів і методів їх виявлення при технічному обстеженні потенційно небезпечних ділянок.
2. Дослідити наявні методи використання БпЛА та НРК при виконанні завдань гуманітарного розмінування.
3. Порівняти гомогенні та гетерогенні мережі безпілотних апаратів (*рої дронів*), проаналізувати потенціал їх застосування у галузі гуманітарного розмінування.
4. Описати концептуальну модель розподіленої системи, яка використовує гетерогенну комп'ютерну мережу на основі рою безпілотних апаратів з машинним навчанням.

Реалізація завдань дозволить оцінити тенденції використання безпілотних апаратів у галузі та перспективи застосування роїв дронів з машинним навчанням для завдань гуманітарного розмінування.

Виклад основного матеріалу

Основні завдання гуманітарного розмінування поділяються на:

- нетехнічне обстеження (*збір інформації, опитування свідків, експертний аналіз фотознімків потенційно небезпечних ділянок*);
- технічне обстеження (*використання спеціальних пристроїв та техніки для підтвердження та виявлення ВВП на небезпечних ділянках*);
- розмінування (*знешкодження ВВП*);
- маркування небезпечних ділянок (*стрічки, знаки тощо*);
- внесення небезпечних ділянок у спеціальні ГІС (*занесення координат та меж ділянок на мапи мінних полів/небезпечних територій*).

Кожне із цих завдань має свою специфіку, проте найнебезпечнішими є технічне обстеження (*виявлення*) та розмінування (*знешкодження*), адже вони несуть ризик здоров'ю і життю для операторів-демінерів [3]. Ця небезпека проявляється у безпосередньому фізичному контакті із ВВП, типи яких представлено у табл. 1. Саме для виконання цих завдань використання сучасних безпілотних технологій є найбільш затребуваним.

Таблиця 1

Типи ВВП, засоби, методи їх виявлення і знешкодження

Тип ВВП	Матеріал ВВП	Виявлення		Знешкодження	
		Методи	Засоби	Методи	Засоби
Натискної дії (<i>протипіхотні, протитанкові міни, скиди дронів</i>)	Метал, сталь	Візуально-оптичний, тепловізійний, радіохвильовий, електромагнітний	Металошукачі, міношукачі, магнітometri, мультиспектральні камери, георадари LiDAR-сенсори	Викручення запалу, дистанційний/контрольований підрив	Сапери, роботи-сапери, трали, саперні «кішки», контрольовані підривники
	Дерево, пластмаси, поліетилен	Візуально-оптичний, тепловізійний, біофізичний	Мультиспектральні камери, георадари мінно-пошукові собаки, бджоли		
Магнітної, інфрачервоної, теплової дії (<i>протипіхотні, протитанкові міни, морські/річкові міни</i>)	Метал, сталь, пластик	Візуально-оптичний, тепловізійний, радіохвильовий, акустичний	Мультиспектральні камери, магнітometri, акустичні сенсори, георадари	Дистанційний/контрольований підрив, використання електромагнітного/акустичного впливу	Сапери, електромагнітні трали, саперні «кішки», контрольовані підривники

Продовження таблиці 1

Тип ВВП	Матеріал ВВП	Виявлення		Знешкодження	
		Методи	Засоби	Методи	Засоби
Саморобні вибухові предмети (розтяжки, замасковані гранати, фугаси)	Пластмаси, підручні матеріали, скло	Візуально-оптичний, газоаналітичний, біофізичний	Оглядові дзеркала, детектори парів вибухових речовин, мінно-пошукові собаки, бджоли	Дистанційний/контрольований підрив, від'єднання/перерізання дротів, викручення запалу	Сапери, роботи-сапери, саперні «кішки», інструменти для перерізання дротів
Нерозірвані боеприпаси (фугаси, рештки ракет, бойових частин дронів, торпед тощо)	Композитні матеріали, сплави різних металів	Візуально-оптичний, тепловізійний, біофізичний	Металошукачі, міношукачі, магнітометри, мультиспектральні камери	Викручення запалу, дистанційний/контрольований підрив	Сапери, роботи сапери, контрольовані підривники

Методи виявлення обирають залежно від завдання, наявних пристроїв детекції та потенційних типів ВВП. Традиційні методи включають використання ручних міно- та металошукачів, які працюють на основі створення власного магнітного поля та здатні виявляти аномалії в ґрунті (*присутність металевих об'єктів*). Проте багато сучасних мін окрім натискної дії можуть мати магнітні, інфрачервоні або теплові датчики, так звані «міни-пастки», що зменшує ефективність виявлення стандартними засобами та збільшує шанс підриву, наприклад через магнітне поле від індукційного міношукача [3]. Також такі засоби не здатні виявляти неметалеві ВВП. До сучасних методів виявлення належить використання спеціальних засобів: LiDAR-сенсорів, магнітометрів, мультиспектральних камер, георадарів, покращених металошукачів (рис. 1).



Рис. 1. Сучасні сенсори, які використовуються для виявлення ВВП

Мультиспектральні камери, які встановлюються на БпЛА, дозволяють оператору здійснювати попередню розвідку небезпечної ділянки з висоти та проводити аерофотозйомку для подальшого візуального аналізу. Змінюючи спектральні налаштування та параметри відображення камери, оператор може виявляти аномалії, що дозволяє підтвердити або спростувати наявність підозрілих об'єктів. Окрім камер для виявлення ВВП на поверхні використовують магнітометри, георадари та LiDAR-сенсори для глибинного аналізу. Такі сенсори за рахунок радіохвиль без створення магнітного поля (*магнітометр є пасивним пристроєм*) здатні виявляти аномалії в ґрунті.

Методи використання БпЛА

Застосування БпЛА при гуманітарному розмінуванні є відповіддю на виклики часу та технічний прогрес. БпЛА сьогодні часто асоціюють із військовими технологіями, насамперед через ефективність аеророзвідки або ураженням цілей, проте інші галузі не відстають у розвитку власних методів їх застосування. Типи БпЛА за конструкцією поділяють на:

- літакові або крило (з англ. *fixed wing*);
- мультироторні (*квадрокоптери, гексакоптери, октакоптери* тощо);
- аеростати;
- гібридні.

Кожен із наведених типів здатен вирішувати певний набір завдань. Для гуманітарного розмінування, а особливо при технічному обстеженні, найбільш доречними є БпЛА-коптери завдяки своїй керованості та маневреності. БпЛА-літаки можуть застосовуватись для візуального обстеження ділянок з висоти для здійснення аерофотозйомки і подальшого картографування ділянок (*занесення даних в ГІС*), проте, у силу своїх аеродинамічних властивостей, поступаються коптерам.

БпЛА великих габаритів, звичай гекса- або октакоптери здобули широке застосування у аграрній галузі. Такі дрони здатні нести доволі відчутну корисну вагу (*до прикладу Matrice 400 від DJI здатен нести до 6 кг*), завдяки чому стає можливим встановлення (*підвіска*) спеціальних пристроїв, насамперед магнітометрів, рамкових детекторів та інших сенсорів для завдань розмінування. Яскравим прикладом подібного рішення

стало випробування у 2024-2025 рр. вітчизняного БпЛА «MinesEye» шляхом підвіски магнітометра на певній відстані від корпусу БпЛА (рис. 2а). При прольоті над ділянкою, окрім візуального аналізу поверхні вбудованою камерою, «MinesEye» за допомогою підвішених сенсорів створює мапу аномалій ґрунту із координатами, що підвищує ефективність виявлення ВНП на і навіть під землею (рис. 2б).

Аналіз мультисенсорних даних є основою для створення ознак аномалій (*feature engineering*), на основі яких моделі виявляють та ідентифікують ВНП [9]. Станом на сьогодні «MinesEye» вже використовується українськими фахівцями ДСНС та окремими організаціями гуманітарного розмінування для проведення технічного обстеження потенційно замінованих ділянок [12].



Рис. 2. а – гексакоптер «MinesEye» із магнітометром; б – мапа аномалій ВНП створена «MinesEye»

Менші БпЛА, зазвичай FPV-дрони (*від англ. first person view*), теж отримали власні методи застосування при технічному обстеженні замінованих ділянок. Оператор за допомогою пульту та FPV-окулярів (*або ж дисплею, куди виводиться відеотрансляція*) здійснює обліт ділянки з метою візуально-оптичного виявлення ВНП. Такі дрони мають невеликі розміри і оснащені переважно відеокамерами (*RGB, тепловізійна, мультиспектральна, тощо*). Виходячи з цього, використання алгоритмів машинного навчання та технологій комп'ютерного зору є логічним кроком автоматизації процесу виявлення візуальних ознак ВНП на поверхні землі у режимі реального часу.

Наявність актуальних датасетів із класифікованими ВНП є невід'ємною складовою тренування моделей машинного навчання, адже номенклатура мін і ВНП постійно змінюється. Сучасні середовища 3D моделювання (*Blender, 3Ds Max*), ігрові рушії (*Unreal Engine, Unity*), візуальні генеративні моделі ШІ дають можливість створювати синтетичні датасети на основі рендерів і генерованих зображень, що дещо спрощує процес підготовки даних до процесу навчання.

Для розпізнавання ВНП на зображеннях найчастіше використовуються CNN-моделі сімейства YOLO [19], навчені на наборах даних, що містять класифіковані зображення мін. Головною проблемою є апаратні обмеження БпЛА, адже бортовий комп'ютер та вбудована камера не здатні виконувати складних обчислень, тому використовуються спрощені моделі.

Згідно з результатами експериментів, представленими у дослідженні, порівняння односпектрального і мультиспектрального аналізу показало підвищення точності виявлення ознак ВНП на 12,5 % саме при комбінуванні спектрів (*використанні мультиспектральної камери*). У наборі даних із 184 зображень, що містили 194 ВНП, модель YOLOv2 на основі нейромережі ResNet-50 із 40 шарами, мала показник середньої точності 77,4 % і 87,1 % для односпектральної і мультиспектральної камер відповідно [8].

Окрім CNN-моделей (наприклад YOLOv2-tiny, найновішої YOLOv26 без NMS) цікавості викликають моделі-Transformer'и (ViT, DETR, RT-DETR) [13] та гібридні архітектури (ConViT). Іншим потенційним методом виявлення ВНП є мультимодальні моделі ШІ, що здатні розпізнавати ознаки об'єктів на зображеннях і відео у різних контекстах [21]. Справжнім науково-технічним проривом 2025 року стало представлення відкритої мультимодальної моделі Gemma 3n від Google на основі архітектури MatFormer (*Matryoshka Transformer*), яка здатна працювати із текстом, аудіо, зображеннями та відео, балансуючи апаратними можливостями відповідно до завдання. Ця модель призначена для смартфонів, планшетів, ноутбуків і є автономною (*локальною*) без потреби постійного зв'язку із серверами, що підкреслює її ефективність навіть при обмежених апаратних можливостях. Використання мультимодальних моделей може суттєво зменшити час, який потрібен при традиційному навчанні CNN моделей, проте ефективність таких моделей для виявлення ВНП, в тому числі у поєднанні з БпЛА, вимагає додаткових емпіричних досліджень і даних.

Методи використання НРК

Розвиток різноманітних НРК також не стоїть на місці, підтвердженням чого став захід «Майбутнє розмінування: Україна в дії», що пройшов на базі навчально-випробувального комплексу UTTC (*Ukrainian Training and Testing Complex*) у червні 2025, продемонструвавши передові вітчизняні розробки [15]. НРК відіграють ключову роль під час гуманітарного розмінування, знижуючи ризик для операторів-демінерів при виконанні складних завдань, як-от підриз протитанкових чи протипіхотних мін (*ПММ-2, ТМ-62, ПТМ-4 та інші*) або розчищення шляху від перешкод (*висока трава, каміння, сміття*).



Рис. 3. Великогабаритні комплекси: а – GART 5100; б – Germina URCM-3000; в – GSC-200

Одними з прикладів великогабаритних дистанційно-керованих розмінувальних комплексів є вітчизняні «GART 5100» (рис. 3а), «Germina URCM-3000» (рис. 3б) і німецько-швейцарський «GSC-200» (рис. 3в). Перераховані комплекси вже використовуються різними організаціями гуманітарного розмінування, демонструючи свою ефективність «у гектарах» завдяки засобам очищення і візуального спостереження. Проте варто враховувати специфіку таких комплексів: низька мобільність, висока економічна вартість, амортизація/ремонт/підтримка.

Станом на сьогодні існують багатоцільові та спеціалізовані (як колісні так і гусеничні) НРК менших габаритів, детально вивчені у монографії [22], які призначені для виконання схожих завдань з меншими витратами, адже потребують менше: палива, фінансових витрат, обслуговування, часу навчання, масштабування. Варто зазначити, що такі НРК не є заміною великим роботизованим платформам, а ще одним альтернативним технічним рішенням. Так український комплекс наземного роботизованого очищення (КНРО) «Змій» [11] (рис. 4) має вагу у 950 кг на відміну від вищезгаданого «GART 5100» вагою у 17 тон, підтримує дистанційне керування до 3 км на відкритій місцевості, та аналогічно може використовувати різні засоби очищення (лопасті, ланцюги, трали) і спостереження (відеокамери, датчики).



Рис. 4. КНРО «Змій»

Роль штучного інтелекту як ніколи актуальна для застосування НРК. Прокладання маршрутів, навігація невідомою місцевістю, розпізнавання і класифікація об'єктів (CNN-моделі), жестів людей, машинне навчання на даних отриманих із сенсорів [22] – усі перераховані методи вже мають власну нішу у багатьох сферах застосування НРК, в тому числі гуманітарного розмінування.

Гомогенні та гетерогенні рої дронів

Мережі безпілотних апаратів сьогодні асоціюють із терміном «рої дронів» (англ. *drone swarms*), такі рої використовують динамічні топології комп'ютерних мереж, що здатні перебудовуватись під впливом швидких змін [16]. В умовах постійного просторового переміщення підтримка стабільності з'єднання і функціонування рухомої комп'ютерної мережі є найбільшим пріоритетом.

Передача телеметрії у таких мережах вимагає наявності зв'язку через бездротові технології [23]. Зокрема, для реалізації таких систем застосовується мережева архітектура FANET (*Flying Ad-hoc Networks*), де кожен вузол мережі виступає одночасно і клієнтом, і маршрутизатором. Це забезпечує децентралізацію та високу стійкість рою за допомогою протоколів Mesh-маршрутизації (наприклад, *HWMP* або *V.A.T.M.A.N.*), які автоматично перераховують шляхи передачі даних при виході окремих апаратів із ладу (втраті зв'язку) або зміні топології рою. У контексті комп'ютерних мереж під поняттями гомогенності (однорідності) та гетерогенності (неоднорідності) розуміють ступінь однорідності:

- апаратних складових (виробники, архітектура, обладнання, компоненти);
- каналів зв'язку (802.11b/g/n/ac, 802.15.1, 802.15.3, інші бездротові технології);
- програмних складових (ОС, програмне забезпечення).

Для безпілотних апаратів такий термін значить, що мережа, яка, наприклад, складається лише з БпЛА здатна містити однакові (рис. 5а) або різні (рис. 5б) характеристики як:

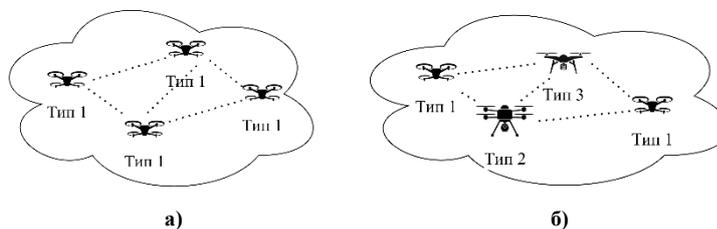


Рис. 5. Рої дронів: а – гомогенний рій дронів; б – гетерогенний рій дронів

- тип апаратів (наприклад квадрокоптер *DJI Mavic 3T* + квадрокоптер *DJI Mavic 3T* або квадрокоптер *DJI Mavic 3T* + гексакоптер *Matrice 600*);
- апаратні характеристики (фізичні розміри БпЛА, ємність акумуляторів, дальність польоту, підтримувані діапазони частот, наприклад 2,4 ГГц, 5,8 ГГц, пропускна здатність модемів, Мбіт/с, тощо);
- програмні прошивки (виробник ПЗ, функція *return-to-home*, комп'ютерний зір, ШІ) і т.д.

Від наявних компонентів кожного вузла (апарату) залежить загальна спроможність системи виконувати конкретні завдання. Наприклад гомогенний рій із малих спортивних FPV-дронів, на відміну від рою аграрних гексакоптерів, не зможе застосувати обладнання для розпилювання добрива, оскільки малі апарати не розраховані на таке навантаження. Прикладом автономного виконання спільної цілі є гомогенний рій дронів Tevel із ШІ для збору яблук, який був представлений ізраїльською компанією у 2023 р. [17]. Завдяки автономності дрони здатні працювати одночасно, а ШІ допомагає БпЛА розпізнавати і збирати лише свіжі яблука.



Рис. 6. Гомогенний рій дронів Tevel

У контексті гуманітарного розмінування, рої БпЛА здатні масштабувати виконання задач технічного обстеження візуально-оптичним методом, збільшивши ділянку обстеження у рази. Окрім переваги масштабування, рої дронів, завдяки автономності можуть керуватись одним оператором, який може «перемикатись» між вузлами такої безпілотної мережі для коригування маршрутів обстеження чи зміни загальної цілі.

У 2024-2025 рр. дансько-український стартап-проект «Dronla» представив екосистему розмінування, що включає рій дронів із ШП для виявлення ВНП, який складається із БпЛА DJI з 4 різними видами сенсорів: RGB камери, тепловізійні камери, мультиспектральні камери, магнітометри [18]. Окрім рою, пропонується система, яка включає пункти управління, звідки оператори здійснюють керування роєм БпЛА та багаторічковими НРК (наприклад для скошення трави, прибирання перешкод, дрібного розмінування тощо).

Відповідно до результатів представлених у дослідженні [24], порівняльні експерименти продуктивності гомогенних і гетерогенних роїв БпЛА показали вищу ефективність для останніх. Для завдань гуманітарного розмінування і методів їх виконання гетерогенна мережа безпілотних апаратів є більш привабливим рішенням, ніж гомогенна, адже наявність різнотипних БпЛА (малі коптери та великі гексакоптери) з різними сенсорами і НРК (колісні та гусеничні) дає можливість виконувати більший спектр завдань зумовлених різними обставинами (місцевість, погодні умови, розміри апаратів, специфіка завдань тощо). До прикладу БпЛА-гексакоптер із магнітометром отримує значні пошкодження при прольоті між деревами у густій лісоосузі, натомість малий БпЛА-FPV, завдяки меншим розмірами і плавному керуванню, зможе обстежити її візуально-оптичним методом. Проте на БпЛА-FPV, на відміну від гексакоптера, складно підвісити важкий чи рамковий магнітометр у силу технічних обмежень.

Повертаючись до питання мережі, можливість обмінюватись телеметрією між вузлами підвищує автономність системи, а за наявності натренованих моделей машинного навчання стає ключовою перевагою у розподіленні обчислювальних завдань та процесів прийняття рішень між усіма вузлами. Таким чином, мережа безпілотних апаратів (рій дронів) слугує розподіленою системою, де кожен безпілотної апарат виконує своє завдання, а обробка певних даних може відбуватись безпосередньо «на борту».

Концептуальна модель розподіленої системи гуманітарного розмінування

На рис. 7 представлено концептуальну модель розподіленої системи, яка включає гетерогенну мережу (рій) безпілотних апаратів, базову наземну станцію і віддалену станцію керування. Головною відмінністю представленої моделі від наявних рішень є поєднання БпЛА і НРК в єдину гетерогенну мережу. Таке поєднання надає можливість прямого обміну телеметрією між кінцевими вузлами мережі.

Ключовими перевагами моделі системи є:

- безпека оператора із мінімізацією ризиків;
- керування кількома апаратами у режимі реального часу з можливістю прийняття керування конкретним через базову наземну або віддалену станцію керування;
- наявність різнотипних безпілотних апаратів для виконання різних завдань;
- обмін телеметрією між елементами мережі, дублювання телеметрії на базову і віддалену станції;
- використання комп'ютерного зору і алгоритмів машинного навчання для виявлення ВНП;
- можливість планування маршрутів і автономної навігації;
- можливість дистанційного керування на великих відстанях за умови стабільного інтернет-підключення;
- геопозиціонування та аерофотозйомка ВНП;
- виявлення ВНП за допомогою моделей машинного навчання (візуально-оптичне, мультисенсорне виявлення);
- можливість резервного інтернет-з'єднання (LTE/супутниковий інтернет/Wi-Fi мости);
- потенційне збільшення дистанції дії апаратів у рою за рахунок Mesh-маршрутизації (перебудови мережі і визначення найближчих «репів» зв'язку до базової станції).

Окрім зазначених переваг модель має і видимі недоліки:

- різноманітність апаратів і пристроїв вимагають високої кваліфікації операторів;
- поточний стан технологій (апаратних і програмних) поки що не досяг можливості повної автономності прийняття ройових рішень;
- як БпЛА так і деякі НРК мають обмежені АКБ, що знижує оперативний час роботи апаратів;
- висока вартість обладнання та навчання моделей комп'ютерного зору і ШП;
- технічна і програмна складність розробки подібних систем.

Попри недоліки, поточний розвиток алгоритмів глибинного машинного навчання, автономної навігації, технологій застосування роїв дронів показує, що цей напрямок є як ніколи перспективним [7, 16–18, 24–25].

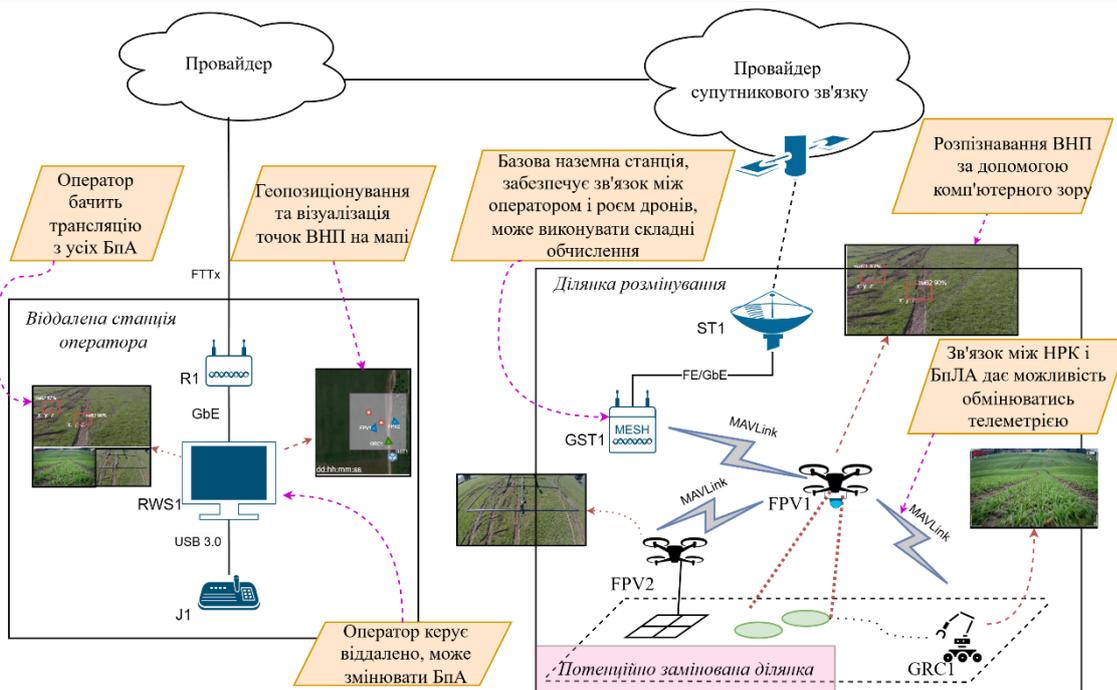


Рис. 7. Концептуальна модель розподіленої системи гуманітарного розмінування

Більшість сучасних БПЛА та НРК підтримують режими автопілоту, круїз-контролю та програмування маршрутів навігації через спеціалізоване ПЗ (наприклад *Ardupilot*, *MissionPlanner*). Проте основною проблемою навігації для НРК залишається неоднорідна місцевість, а для БПЛА – природні перешкоди (*дерева, куці тощо*). Станом на сьогодні, більшість безпілотних апаратів керуються оператором, який корегує маршрут вручну, якщо було помічено перешкоду. Оминання перешкод завдяки комп'ютерному зору і оновлення маршрутів є одними із найскладніших викликів і подальших покращень алгоритмів автономної безпілотної навігації [24–25].

Виконання завдань гуманітарного розмінування першочергово включає проведення технічного обстеження, що вимагає використання спеціальних сенсорів [3]. Магнітометри, мультиспектральні камери, LiDAR-сенсори вже показали свою ефективність під час застосування на безпілотних апаратах, але в силу апаратних (*технічних*) обмежень, вони не можуть встановлюватись лише на один БПЛА чи НРК. Відповідно є розподілення структурних компонентів на різних вузлах мережі (рис. 8). До прикладу, БПЛА-гексакоптер оснащений підвишеним рамковим магнітометром, LiDAR-сенсором, а БПЛА-квадрокоптер двома відеокамерами (*RGB і мультиспектральну*) із комп'ютерним зором на основі моделей CNN. Це створює загальну гетерогенність системи, що в свою чергу дозволяє використовувати ці елементи за їхнім конкретним призначенням. Зменшення кількості компонентів може збільшити оперативний час роботи БПЛА не витрачаючи цінні mAh АКБ на енергоживлення «зайвих» частин апаратів.

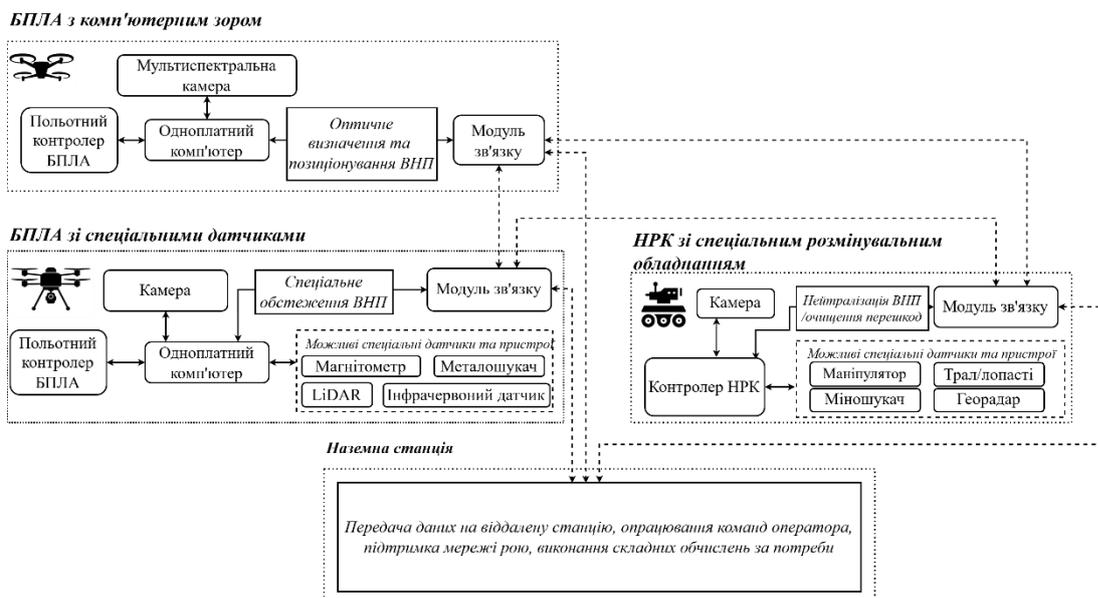


Рис. 8. Структурна схема деяких компонентів різнотипних безпілотних апаратів у мережі системи гуманітарного розмінування

Для НРК аналогічно, в залежності від рухомої бази (колісна чи гусенична) застосування може відрізнятися, як і оснащення для виконання цих завдань (додаткові відеокамери, лопасті, маніпулятори, георадари, міношукачі).

Іншим важливим аспектом є «ситуативна обізнаність» безпілотних апаратів за рахунок передачі телеметрії. Так НРК може отримати дані від БпЛА про наявність класифікованого ВВП за певними координатами, від НРК ці дані дублюються на базову/віддалену станцію із пропозицією для оператора змінити маршрут НРК до нових координат. Таким чином, поєднання різнотипних безпілотних апаратів (БпЛА, НРК) у гетерогенну комп'ютерну мережу, як частину розподіленої системи гуманітарного розмінування містить неабиякий потенціал.

Висновки з дослідження і подальші перспективи

Аналіз досліджень і публікацій показав стрімкі тенденції зміни процесу розмінування від традиційних ручних методів на інтеграцію безпілотних апаратів (БпЛА і НРК) у тандемі із ШІ, що зменшує безпекові ризики для операторів-демінерів і підвищує ефективність виконання завдань. У ході дослідження узагальнено наявні типи ВВП, методи їх виявлення і знешкодження. Відзначено роль і перспективи сучасних візуально-оптичних методів виявлення об'єктів алгоритмами глибокого машинного навчання (комп'ютерного зору) на базі CNN-моделей (сімейства YOLO), трансформерів, гібридних і мультимодальних моделей ШІ.

На прикладах вітчизняних розробок БпЛА «MinesEye», НРК «Змій», системи «Dropa» розглянуто сучасні методи використання БпЛА і НРК у галузі гуманітарного розмінування. Порівняльний аналіз гомогенних і гетерогенних безпілотних мереж дозволив обґрунтувати переваги використання ройових структур у розподіленні завдань. Обґрунтовано доцільність використання гетерогенних мереж для завдань гуманітарного розмінування.

Запропоновано концептуальну модель розподіленої системи гуманітарного розмінування на основі гетерогенної мережі, яка передбачає зв'язок між безпілотними апаратами (БпЛА та НРК) і використання машинного навчання для виявлення ВВП. Наведено переваги і недоліки концепції системи. Перспективи подальшого розвитку напряму полягають у пошуку найбільш оптимальних моделей глибокого машинного навчання, створенні сучасних датасетів для тренування моделей, дослідженні апаратно-програмних рішень для обґрунтування методів застосування роїв дронів із використанням ШІ.

У висновку, для галузі гуманітарного розмінування є доцільним збільшення ролі автоматизації і розвитку методів застосування роїв дронів із ШІ, що сприятиме пришвидшенню очищення забруднених ділянок і відновленню нормальної соціально-економічної активності населення.

Література

1. Ukrinform. ООН: Мінне забруднення України - глобальна проблема, що впливає на безпеку й світові ціни. *Укрінформ - актуальні новини України та світу*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/4001207-oon-minne-zabrudnenna-ukraini-globalna-problema-so-vplivae-na-bezpeku-j-svitovi-cini.html> (дата звернення 17.02.2026).
2. Про схвалення Національної стратегії протимінної діяльності на період до 2033 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024 - 2026 роках : Розпорядж. Каб. Міністрів України від 28.06.2024 № 616-р : станом на 16 січ. 2026 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/616-2024-p#Text> (дата звернення 17.02.2026).
3. Міноборони розпочало випуск першого в Україні практичного довідника для операторів протимінної діяльності // *МО України*. 2026. URL: <https://mod.gov.ua/news/minoboroni-rozpochalo-vipusk-pershogo-v-ukrayini-praktichnogo-dovidnika-dlya-operatoriv-protiminnoyi-diyalnosti> (дата звернення 17.02.2026).
4. Попов М. О. Технологія дистанційного виявлення мін на основі аналізу матеріалів зйомки з безпілотних літальних апаратів: стан та перспективи. *Вісник Національної академії наук України*. 2022. № 5. С. 56–62. URL: <https://doi.org/10.15407/visn2022.05.056> (дата звернення 17.02.2026).
5. Zatserkovnyi V., Nikoliuk I. Using UAVs to detect explosives and create maps in humanitarian demining. *Technical sciences and technologies*. 2025. No. 1 (39). P. 328–345. URL: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-328-345](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-328-345).
6. Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case / Т. Hutsul та ін. *Heliyon*. 2024. С. e29142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142> (date of access 17.02.2026).
7. Shruti Goel. Swarm Intelligence: Revolutionizing Drone Technology Through Collective Behavior. *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*. 2025. Vol. 11, no. 2. P. 2703–2712. URL: <https://doi.org/10.32628/cseit25112739> (date of access 17.02.2026).
8. Cho S., Ma J., Yakimenko O. A. Aerial multi-spectral AI-based detection system for unexploded ordnance. *Defence Technology*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.002> (date of access 17.02.2026).
9. Ściegienka P., Blachnik M. On the development of a neural network architecture for magnetometer-based UXO classification. *Applied sciences*. 2025. Vol. 15. URL: <https://doi.org/10.3390/app15158274> (date of access 17.02.2026).

10. 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. P. 677. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16040677> (date of access 17.02.2026).
11. КНРО "Змії" v1.2. *Rovertech*. URL: <https://rovertech.co.ua/en/civilian-en/> (дата звернення 17.02.2026).
12. Поступ та ДСНС України експериментально впроваджують нову систему MinesEye для прискорення розмінування. *Фундація Поступ*. URL: <https://postup.com.pl/news/postup-ta-dsns-ukrayini-eksperimentalno-vprovadzhuut-novu-sistemu-mineseye-dlya-priskorennya-rozminuvannya> (дата звернення 17.02.2026).
13. Craioveanu M., Stamatescu G., Popescu D. Ensemble Strategy with Multi-Step Hard Sample Mining for Improved UXO Localisation and Classification. *IEEE Access*. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3588184> (date of access 17.02.2026).
14. Safe Pro's Artificial Intelligence Delivers 800% Productivity Surge in Ukraine Demining Surveys According to Independent Research Presented at Leading Global Conference. *Business Wire*. URL: <https://surl.la/stxrvp> (date of access 17.02.2026).
15. Роботи і дрони, що рятують життя: на полігоні УТТС продемонстрували сучасні засоби розмінування. *Міністерство Оборони України*. 2025. URL: <https://mod.gov.ua/news/roboti-i-droni-shho-ryatuyut-zhittya-na-poligoni-uttc-prodemonstruvani-suchasni-zasobi-rozminuvannya> (дата звернення 17.02.2025).
16. Журавська І. М. Гетерогенні комп'ютерні мережі критичного застосування на основі роїв та зграй БПЛА : монографія. Миколаїв : Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. 192 с.
17. Ізраїльські розробники навчили дрони зі штучним інтелектом збирати лише спілі яблука. *UKR.NET*. URL: <https://www.ukr.net/news/details/technologies/98431230.html> (дата звернення 17.02.2025).
18. Розумне розмінування: роботи + ШІ. *Dropla*. URL: <https://dropla.tech/ukr> (дата звернення 17.02.2025).
19. Dodić D. et al. Contribution of the YOLO model to the UXO detection process. 2025 24th international symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). 2025. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/INFOTEH64129.2025.10959228> (date of access 17.02.2026).
20. Ukrinform. MinesEye – дрон, який «бачить» крізь землю. *Укрінформ - актуальні новини України та світу*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/3849803-mineseye-dron-akij-bacit-kriz-zemlu.html> (дата звернення 17.02.2025).
21. Sapkota R., Karkee M. Object detection with multimodal large vision-language models: An in-depth review. *Information Fusion*. 2025. P. 103575. URL: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103575> (date of access 17.02.2026).
22. Струтинський В. Б., Гуржій А. М. Наземні роботизовані комплекси: монографія. Житомир: ПП «Рута», 2023. 524 с.
23. Yao H., Mai T. UAV swarm cooperation. Cham : Springer Nature Switzerland, 2026. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-96444-2> (date of access 17.02.2026).
24. Albrecht Y., Pysarenko A. Exploring the power of heterogeneous UAV swarms through reinforcement learning. *Technology audit and production reserves*. 2023. Vol. 6, no. 2(74). P. 6–10. URL: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.293063> (date of access 17.02.2026).
25. Advances in UAV path planning: a comprehensive review of methods, challenges, and future directions / W. Meng et al. *Drones*. 2025. Vol. 9, no. 5. P. 376. URL: <https://doi.org/10.3390/drones9050376> (date of access 17.02.2026).

References

1. Ukrinform. OON: Minne zabrudnennia Ukrainy – hlobalna problema, shcho vplyvaie na bezpeku y svitovi tsiny. Ukrinform. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/4001207-oon-minne-zabrudnenna-ukraini-globalna-problema-so-vplyvae-na-bezpeku-y-svitovi-cini.html> (date of access 17.02.2026).
2. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy «Pro skhvalennia Natsionalnoi stratehii protyminnoi diialnosti na period do 2033 roku ta zatverdzhennia ...». Ofitsiinyi vebportal Kabinetu Ministriv Ukrainy. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-natsionalnoi-stratehii-protyminnoi-diialnosti-na-period-do-2033-roku-ta-zatverdzhennia-t280624> (date of access 17.02.2026).
3. Minoborony rozpochalo vypusk pershoho v Ukraini praktichnogo dovidnyka dlia operatoriv protyminnoi diialnosti // MO Ukrainy. 2026. URL: <https://mod.gov.ua/news/minoborony-rozpochalo-vipusk-pershogo-v-ukrayini-praktichnogo-dovidnika-dlya-operatoriv-protiminnoyi-diyalnosti> (date of access 17.02.2026).
4. Popov M. O. Tekhnolohii dystantsiinoho vyavlennia min na osnovi analizu materialiv ziomky z bezpilotnykh litalnykh aparativ: stenohrama dopovidi na zasidanni Prezhydii NAN Ukrainy 6 kvitnia 2022 roku. *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2022. DOI: 10.15407/visn2022.05.056 (date of access 17.02.2026).
5. Zatserkovnyi V. I., Nikoljuk I. R. Vykorystannia BPLA dlia vyavlennia vybuchonebezpechnykh predmetiv ta pobudovy kart pry humanitarnomu rozminuvanni. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*. 2025. № 1(39). С. 328–345. DOI: 10.25140/2411-5363-2025-1(39)-328-345.
6. Hutsul T. et al. Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: ukrainian case. *Heliyon*. 2024. P. e29142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142> (date of access 17.02.2026).
7. Shruti Goel. Swarm intelligence: revolutionizing drone technology through collective behavior. *International journal of scientific research in computer science, engineering and information technology*. 2025. Vol. 11, no. 2. P. 2703–2712. URL: <https://doi.org/10.32628/cseit25112739> (date of access 17.02.2026).
8. Cho S., Ma J., Yakimenko O. A. Aerial multi-spectral AI-based detection system for unexploded ordnance. *Defence technology*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.002> (date of access 17.02.2026).
9. Ściegienka P., Blachnik M. On the development of a neural network architecture for magnetometer-based UXO classification. *Applied sciences*. 2025. Vol. 15. URL: <https://doi.org/10.3390/app15158274> (date of access 17.02.2026).

10. 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. P. 677. URL: <https://doi.org/10.3390/rs16040677> (date of access 17.02.2026).
11. KNRO "Zmii" v1.2. *Rovertch*. URL: <https://rovertch.co.ua/en/civilian-en/> (date of access 17.02.2026).
12. Postup ta DSNS Ukrainy eksperymentalno vprovadzhuut novu systemu MinesEye dlia pryskorennia rozminuvannia. *Fundatsiia Postup*. URL: <https://postup.com.pl/news/postup-ta-dsns-ukraini-eksperymentalno-vprovadzhuut-novu-sistemu-mineseye-dlya-priskorennia-rozminuvannya> (date of access 17.02.2026).
13. M. Craioveanu, G. Stamatescu and D. Popescu, "Ensemble Strategy With Multi-Step Hard Sample Mining for Improved UXO Localisation and Classification," in *IEEE Access*, vol. 13, pp. 123546-123558, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3588184.
14. Safe Pro's Artificial Intelligence Delivers 800% Productivity Surge in Ukraine Demining Surveys According to Independent Research Presented at Leading Global Conference. *Business Wire*. URL: <https://surl.lu/stxrvp> (date of access 17.02.2026).
15. Roboty i drony, shcho riatuiut zhyttia: na polihoni UTTC prodemonstruvaly suchasni zasoby rozminuvannia. *Ministerstvo Oborony Ukrainy*. 2025. URL: <https://mod.gov.ua/news/roboti-i-droni-shho-ryatuyut-zhittya-na-poligoni-uttc-prodemonstruvali-suchasni-zasobi-rozminuvannya> (date of access 17.02.2026).
16. Zhuravska I. M. Heterohenni kompiuterni merezhi krytychnoho zastosuvannia na osnovi roiv ta zhrai BPLA : monohrafiia. Mykolaiv : Vyd-vo ChNU im. Petra Mohyly, 2019. 192 s.
17. Izraillski rozrobnyky navchyly drony zi shtuchnym intelektom zbyraty lyshe spili yabluka. *UKR.NET*. URL: <https://www.ukr.net/news/details/technologies/98431230.html> (date of access 17.02.2026).
18. Rozumne rozminuvannia: roboty + ShI. *Dropla*. URL: <https://dropla.tech/ukr> (date of access 17.02.2026).
19. Dodić D. et al. Contribution of the YOLO model to the UXO detection process. 2025 24th international symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH). 2025. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.1109/INFOTEH64129.2025.10959228> (date of access 17.02.2026).
20. MinesEye – dron, yakyi «bachyt» kriz zemliu. *Ukrinform*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/3849803-mineseye-dron-akij-bacit-kriz-zemlu.html> (date of access 17.02.2026).
21. Sapkota R., Karkee M. Object detection with multimodal large vision-language models: An in-depth review. *Information Fusion*. 2025. P. 103575. URL: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103575> (date of access 17.02.2026).
22. Strutynskiy V. B., Hurzhii A. M. Nazemni robotyzovani komplekсы: monohrafiia. Zhytomyr: PP "Ruta", 2023. 524 s.
23. Yao H., Mai T. UAV swarm cooperation. *Cham : Springer Nature Switzerland*, 2026. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-96444-2> (date of access 17.02.2026).
24. Albrekht Y., Pysarenko A. Exploring the power of heterogeneous UAV swarms through reinforcement learning. *Technology audit and production reserves*. 2023. Vol. 6, no. 2(74). P. 6–10. URL: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.293063> (date of access 17.02.2026).
25. Advances in UAV path planning: a comprehensive review of methods, challenges, and future directions / W. Meng et al. *Drones*. 2025. Vol. 9, no. 5. P. 376. URL: <https://doi.org/10.3390/drones9050376> (date of access 17.02.2026).