

**ХОМЕНКО Євген Валентинович,**

Науково-дослідний центр Державної спеціальної служби транспорту, Дніпро, Україна,  
<https://orcid.org/0009-0006-7006-3439>

**РИБАЛКА Віктор Вікторович,**

Державна спеціальна служба транспорту, Дніпро, Україна,  
<https://orcid.org/0009-0008-6344-5791>

**КОСТИРЯ Сергій Володимирович,**

кандидат технічних наук,  
Науково-дослідний центр Державної спеціальної служби транспорту, Дніпро, Україна,  
<https://orcid.org/0000-0001-5215-080X>

**ТКАЧ Марина Володимирівна,**

Науково-дослідний центр Державної спеціальної служби транспорту, Дніпро, Україна,  
<https://orcid.org/0009-0001-1478-004X>

## ОСНОВНІ ВИКЛИКИ МІННОЇ НЕБЕЗПЕКИ У ПРОЦЕСІ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ В УМОВАХ РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ ТА РОЛЬ СУЧАСНИХ ЗАХИСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Метою статті є характеризування основних викликів мінної небезпеки з урахуванням необхідності адаптації організаційних і технологічних підходів до гуманітарного розмінування в умовах російсько-української війни та визначення ролі сучасних захисних технологій у зниженні ризиків для фахівців з розмінування й цивільного населення.*

*Методи дослідження.* У дослідженні використано методи системного аналізу, порівняльного аналізу, узагальнення наукових джерел, зокрема, міжнародних стандартів протимінної діяльності. Основою слугували матеріали звітів міжнародних організацій і практичний досвід проведення гуманітарного розмінування в зонах бойових дій.

*Отримані результати дослідження.* Проаналізовано сучасний стан гуманітарного розмінування та виявлено основні виклики, пов'язані з високою інтенсивністю бойових дій, різноманітним вибухонебезпечним предметом і складністю доступу до забруднених територій. Обґрунтовано необхідність адаптації існуючих підходів шляхом впровадження наземних роботизованих систем, сенсорних технологій, безпілотних платформ і засобів індивідуального та колективного захисту, що підвищують ефективність і безпеку протимінних операцій.

*Елементи наукової новизни.* У статті доведено необхідність переходу від традиційних методів до інтегрованої моделі, що поєднує технології безпілотних літальних апаратів, наземні роботизовані системи, сенсорні пристрої та алгоритми штучного інтелекту.

*Теоретична й практична значущість викладеного у статті.* Теоретична значущість статті полягає в раціоналізації інтеграції традиційних методів з інноваційними методами для формування комплексної моделі протимінної діяльності. Практична значущість полягає у можливості використання отриманих висновків для підвищення безпеки, ефективності планування та прискорення процесу гуманітарного розмінування.

*Ключові слова:* гуманітарне розмінування, мінна небезпека, вибухонебезпечні предмети, наземні роботизовані комплекси, технології безпілотних літальних апаратів, сенсорні технології, штучний інтелект, протимінна діяльність.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Гуманітарне розмінування є одним із ключових елементів відновлення безпеки та життєдіяльності населення на територіях, що зазнали впливу збройного конфлікту. В умовах повномасштабної війни, спричиненої агресією росії проти України, масштаби мінного забруднення набули безпрецедентного характеру як за площею ураження, так і за різноманітним вибуховим пристроєм. Сучасні бойові дії супроводжуються використанням новітніх

технологій дистанційного мінування, касетних боєприпасів, саморобних вибухових пристроїв, мін із складними механізмами спрацювання. Це суттєво ускладнює процес їх виявлення та знешкодження, підвищує загрозу для цивільного населення та саперів. Забруднення вибухонебезпечними предметами (далі - ВВП) охоплює значні площі сільськогосподарських угідь, населених пунктів і природних екосистем. Такий масштаб проблеми потребує не лише технічного

очищення територій, а й системної організації процесу розмінування з урахуванням довгострокових соціально-економічних наслідків. Традиційні методи гуманітарного розмінування, що базуються переважно на ручному обстеженні та використанні стандартних металодетекторів, виявляються недостатньо ефективними в умовах значної щільності мінування, обмеженості ресурсів та необхідності прискореного відновлення територій. Це актуалізує потребу в інтеграції інноваційних технологій, розвитку міжнародної співпраці та підготовці висококваліфікованих фахівців.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Гуманітарне розмінування стало однією з головних та довгострокових задач для України після повномасштабного вторгнення росії у 2022 році [1, 160]. Обсяг мінної небезпеки суттєво сповільнює соціально-економічне відновлення, повернення людей, використання сільськогосподарських угідь, відбудову інфраструктури, а також створює загрозу для цивільного населення та саперів. В. Поплавський, В. Нікорич, Т. Гуцул у своїй роботі зазначають: «Ширше використання технологій може дозволити проводити виявлення мін, підготовку ґрунту і розмінування, а також інші елементи протимінної діяльності більш економічно, швидко і з меншим ризиком».

Останні декілька років активно розвиваються інноваційні підходи і технічні рішення у сфері гуманітарного розмінування [3; 4]. Україна та міжнародні партнери працюють над створенням та тестуванням дронів та роботизованих комплексів, здатних виконувати частину розмінувальних операцій без прямої участі людини. Відбувається випробування дронів, наземних роботизованих комплексів, що дозволяють скоротити час виконання робіт та знизити ризики для саперів [7-9]. За результатами статті О. Семененко, С. Баранова, Т. Акініна, Ю. Добровольського, М. Ярмольчика, В. Мусієнко авторами визначені основні напрями співпраці з іноземними державами в сфері розвитку НРК – це технологічний обмін, закупівля готових рішень, спільні дослідження та розробки, навчання та тренування, інформаційний обмін. Автори також зауважують: «Конкретні напрями співробітництва залежать від потреб та можливостей України та іноземних держав». Крім того, з'являється впровадження штучного інтелекту (далі – ШІ) для автоматичного аналізу даних з сенсорів та зображень, що відкриває перспективи значного підвищення точності виявлення мін у складних умовах [12-17]. Т. Гуцул у своїй роботі звертає увагу: «Використання геоінформаційної системи (далі – ГІС) у протимінній діяльності оптимізує процес вивільнення земель шляхом ефективного картографування та визначення пріоритетів зон ризиків, пов'язаних з мінами та ВНП».

Одним із найбільш динамічних напрямів досліджень є застосування безпілотних літальних апаратів для виявлення ВНП та створення карт мінної небезпеки. Наукова публікація М. Мільохіна «Мульти-сенсорні технології для виявлення вибухонебезпечних предметів при розмінуванні з використанням роїв БПЛА»

продемонструвала, що мультиспектральні датчики, поєднані з алгоритмами машинного навчання, можуть підвищити якість оцінки ймовірних загроз [11]. Такі системи здатні швидко збирати дані на великих площах, зменшуючи потребу в ризикованих традиційних методах розмінування. Це робить їх ключовими елементами в плануванні та оптимізації операцій гуманітарного розмінування.

Тема даної статті є актуальною, оскільки в науковій літературі вона висвітлена недостатньо. Аналіз останніх досліджень та публікацій свідчить, що гуманітарне розмінування в Україні трансформується від традиційних методів до високотехнологічних рішень. Суттєвими викликами залишаються масштабність мінної загрози, технологічна складність вибухових пристроїв, виконання робіт у складних умовах, організаційні труднощі, нестача фахівців, але разом із цим з'являється потужний технологічний напрям, який включає дрони, НРК, сенсорні технології і штучний інтелект.

**Метою статті** є характеризування основних викликів мінної небезпеки з урахуванням необхідності адаптації організаційних і технологічних підходів до гуманітарного розмінування в умовах російсько-української війни та визначення ролі сучасних захисних технологій у зниженні ризиків для фахівців з розмінування й цивільного населення.

#### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Сучасні війни характеризуються застосуванням різних типів ВНП – протипіхотних і протитранспортних мін, саморобних вибухових пристроїв (далі – СВП), а також боеприпасів, що не вибухнули. Значна кількість, різноманіття типів і складність конструкції ВНП значно ускладнюють процес їх виявлення та знешкодження. Такі пристрої можуть бути малопомітними, виготовленими з неметалевих матеріалів або встановленими у важкодоступних місцях. Це суттєво знижує ефективність традиційних методів пошуку й потребує використання інноваційних технологій. Особливу небезпеку становлять касетні боеприпаси, які розкриваються в повітрі та розсіюють численні суббоеприпаси на великій території. Частина з них не детонує одразу і може залишатися активною протягом тривалого часу. Тому мінно-вибухова загроза може зберігатися навіть після завершення бойових дій. За таких умов гуманітарні організації мають швидко адаптувати свої стратегії до змін обстановки, використовуючи інноваційні технології, які підвищують ефективність операцій і зменшують ризики для саперів та цивільного населення.

Найбільш уразливою категорією залишаються цивільні особи. Вибухи мін і боеприпасів призводять до загибелі людей, тяжких поранень, інвалідності, а також до довготривалих психологічних наслідків, зокрема, посттравматичного стресового розладу. Страх перед повторними вибухами уповільнює повернення населення до нормального життя та відновлення економічної діяльності.

Крім того, гуманітарне розмінування є складним і ресурсоємним процесом. Воно потребує значних фінансових витрат на технічне обладнання, підготовку

фахівців, логістику та безпосереднє проведення робіт. У регіонах, де тривали бойові дії, інфраструктура часто пошкоджена, що ускладнює доставку техніки й фахівців. Недостатнє фінансування та організаційні труднощі можуть суттєво уповільнювати темпи очищення територій.

Сучасні умови збройних конфліктів вимагають комплексного підходу до гуманітарного розмінування: поєднання інноваційних технологій, ресурсного забезпечення та ефективної координації всіх залучених сторін. Одним із основних напрямів удосконалення гуманітарного розмінування є покращення способів виявлення ВВП. Основними методами розмінування є традиційне, дистанційне та комбіноване розмінування. Традиційні методи розмінування – ручне обстеження територій та використання службових собак – залишаються важливими, однак вже не забезпечують необхідної ефективності в умовах сучасної війни. Зростання кількості нестандартних мін і СВП, які можуть мати складні механізми підриву, мінімальний вміст металу або бути замаскованими під побутові предмети, суттєво ускладнює їх виявлення звичайними засобами. У зв'язку з цим адаптація гуманітарного розмінування включає активне впровадження сучасних технологій. Йдеться про метод дистанційного розмінування, що включає використання безпілотних літальних апаратів для обстеження територій, наземних роботизованих комплексів для дистанційної роботи в небезпечних зонах, а також інтелектуальних сенсорних систем і алгоритмів штучного інтелекту для аналізу отриманих даних. Комбінований метод розмінування дозволяє підвищити

швидкість і безпеку розмінування, що особливо актуально для гуманітарного розмінування великих територій.

Такі рішення дають змогу підвищити точність виявлення ВВП, скоротити час обстеження територій і зменшити ризик для персоналу. Крім того, в умовах війни гуманітарне розмінування набуває міждисциплінарного характеру. До процесу залучаються не лише сапери, а й фахівці з інформаційних технологій, інженери, екологи, аналітики з управління ризиками, представники органів влади та гуманітарних організацій. Така взаємодія сприяє ефективному поєднанню технологічних рішень із гуманітарними та безпековими методами. Комплексний підхід дає змогу зменшити ризики для цивільного населення, а також сприяє захисту критично важливих об'єктів інфраструктури та зміцненню національної безпеки [1].

Жоден із наведених вище методів розмінування не є універсальним і не може забезпечити повну безпеку сам по собі. Кожен із них має свої переваги та обмеження залежно від типу боєприпасів, умов місцевості й рівня забруднення території. Водночас їх комплексне застосування дозволяє суттєво підвищити ефективність виявлення та знешкодження ВВП. Перспективним напрямом розвитку розмінування є поєднання різних технологій в єдину інтегровану систему. Такий підхід дає змогу оптимізувати процес обстеження територій, зменшити ризики для саперів і прискорити очищення забруднених ділянок.

Охарактеризуємо основні напрями технологій, що використовуються для гуманітарного розмінування (табл. 1):

Таблиця 1

Порівняльні характеристики основних технологій, що застосовуються у гуманітарному розмінуванні

Напрями технологій	Основне призначення	Основні характеристики	Переваги	Обмеження
Безпілотні літальні апарати	Дистанційне обстеження територій, картографування, моніторинг	Велика площа огляду, висока мобільність, використання камер, тепловізорів, мультиспектральних і гіперспектральних сенсорів, можливість швидкого збору геоданих	Швидке обстеження значних територій, зменшення ризику для людей, можливість роботи у важкодоступних місцях	Обмежена тривалість польоту, залежність від погодних умов, складність виявлення об'єктів під ґрунтом
Наземні роботизовані комплекси	Виявлення та знешкодження мін та вибухонебезпечних предметів	Дистанційне керування, висока прохідність, використання металодетекторів, механічних засобів розмінування	Зменшення ризику для саперів, можливість роботи на мінному полі, висока точність операцій	Невелика швидкість роботи, обмежена мобільність на складному рельєфі; висока вартість
Сенсорні технології	Виявлення мін та вибухонебезпечних предметів	Металодетектори, георадар, тепловізійні сенсори, гіперспектральні та мультиспектральні сенсори	Підвищення точності виявлення, можливість знаходити об'єкти з різними фізичними характеристиками	Ймовірність хибних спрацьовувань, залежність від типу ґрунту та умов середовища
Аналіз даних і штучний інтелект	Обробка та інтерпретація великих масивів даних	Алгоритми машинного навчання, автоматичне розпізнавання об'єктів, інтеграція з геоінформаційними системами, створення цифрових карт	Підвищення швидкості аналізу інформації, автоматизація прийняття рішень, покращення прогнозування мінної небезпеки	Потреба у великих масивах даних, складність алгоритмів, залежність від якості вхідної інформації

*Технології безпілотних літальних апаратів* (далі – БпЛА або дрон). Одним із основних напрямів сучасного гуманітарного розмінування є використання безпілотних літальних апаратів (дронів). Вони дають змогу виявляти ВВП дистанційно, без перебування сапера в небезпечній зоні. БпЛА здійснюють обстеження територій із безпечної відстані, передаючи оператору зображення та інші дані в режимі реального часу. Завдяки цьому сапери можуть попередньо оцінити рівень мінної небезпеки та визначити найбільш ризиковані ділянки ще до початку наземних робіт. Автономні режими польоту дають змогу сканувати великі площі з мінімальною ймовірністю помилок.

Важливою перевагою дронів є їх використання як платформ для дистанційного зондування землі. Вони збирають фото, відео та спектральні дані, що допомагає отримувати інформацію про об'єкти на місцевості без фізичного контакту з ними. Поєднання матеріалів із БпЛА та супутникових знімків, а також застосування ШІ і ГІС, дає можливість створювати детальні карти потенційно небезпечних територій і відстежувати зміни на поверхні ґрунту.

Ефективність використання дронів стала можливою завдяки розвитку сучасної авіоники, вдосконаленню акумуляторів, застосуванню легких композитних матеріалів, точних навігаційних систем і спеціалізованого програмного забезпечення. Важливу роль також відіграє розвиток телекомунікацій, зокрема, мобільних мереж нового покоління та технологій Інтернету речей, які забезпечують стабільний зв'язок, передачу великих обсягів даних і координацію роботи різних елементів системи розмінування. БпЛА можуть бути оснащені різноманітними датчиками, наприклад, камерами високої роздільної здатності, LIDAR (ідентифікація, виявлення та визначення дальності світла), GNSS (глобальна навігаційна супутникова система) та інерціальними вимірювальними пристроями. Для аналізу досліджуваної території застосовуються мультиспектральні, гіперспектральні, теплові інфрачервоні камери та радіолокаційні системи.

Камери високої роздільної здатності дають змогу виявляти можливі місця розташування мін за характерними ознаками на поверхні ґрунту. Такий підхід ґрунтується на візуальному аналізі зображень. Зокрема, частково заглиблені міни можуть видавати себе непрямими ознаками: слідами порушення ґрунту, ділянками сухої трави серед зеленої рослинності, нехарактерними змінами кольору або текстури поверхні. Іноді помітними є незначні відмінності у формі рельєфу чи щільності покриття. Саме такі візуальні аномалії дають змогу фахівцям визначати потенційно небезпечні ділянки для подальшого детального обстеження [2; 3].

Використання стереоскопічних знімків дає змогу створювати тривимірні моделі місцевості. Це допомагає точніше оцінювати рельєф, виявляти незначні зміни поверхні та краще аналізувати отримані дані. Додатково застосування автоматизованих алгоритмів і систем ШІ підвищує точність обробки

зображень та зменшує вплив людського фактора під час інтерпретації результатів. За останні 5–10 років використання БпЛА у гуманітарному розмінуванні суттєво зросло. Якщо раніше дрони переважно застосовувалися для загального технічного огляду територій, то сьогодні вони виконують детальне обстеження полів перед початком робіт. Це сприяло розвитку нових методів виявлення вибухонебезпечних предметів.

У лютому 2025 року компанія Ailand Systems представила нове покоління дронів-детекторів мін ST1 (рис. 1) під час інноваційної сесії з протимінної діяльності в Україні, організованою Женевським міжнародним центром з гуманітарного розмінування.



Рисунок 1 – Дрон-детектор мін ST1 для виявлення мін та вибухонебезпечних предметів [5]

Розробка поєднує апаратну та програмну платформу з елементами ШІ й підповерхневими сенсорами та оптимізована для роботи в умовах радіоелектронної протидії та складних польових умов. Оновлена версія ST1 оснащена високочутливою камерою, здатною працювати навіть за низького рівня освітлення без втрати якості виявлення. Крім того, дрон обладнано новими пошуковими котушками, створеними у співпраці з компанією Mars MD - виробником відомих українських металодетекторів Gauss MiL. Це підвищує точність пошуку металевих елементів мін та інших ВВП. Цей дрон застосовує LIDAR, ультразвук, стереозір і ШІ для виявлення мін та ВВП. ST1 також може самостійно обходити перешкоди, автоматично повертатися при низькому заряді батареї та розпізнавати міни з низьким вмістом металу.

Компанія Prodrone Co., Ltd. уклала Грантову угоду з Організацією Об'єднаних Націй з промислового розвитку (UNIDO) на «Проект зеленого промислового відновлення для України шляхом передачі технологій та спільного створення нових підприємств з приватними галузями Японії», що фінансується за рахунок фінансового внеску Міністерства економіки, торгівлі та промисловості Японії. UNIDO реалізує програму зеленого промислового відновлення для України на 2024–2028 роки. «Проект зеленого промислового відновлення для України шляхом

передачі технологій та спільного створення нових підприємств з приватними галузями Японії», який очолює Prodrone як бенефіціар гранту, у співпраці з Padeco, Blue Bridge Partners та українськими компаніями Ailand Systems та Drone UA, що фінансується Міністерством економіки, торгівлі та промисловості Японії, має на меті підтримання промислового відновлення країни та розбудови інноваційної екосистеми шляхом передачі технологій, нарощування потенціалу та спільного створення бізнесу між українським та японським приватними секторами.

Завдяки інтеграції аналізу ШІ, цей проєкт спрямований на досягнення безпечнішої та ефективнішої діяльності з виявлення мін, сприяючи зменшенню кількості жертв та травм під час операцій виявлення. Цей технологічний розвиток використовується для створення нових промислових підприємств в Україні, покращує технологію стабільного польоту БпЛА на низькій висоті для виявлення мін і працює над досягненням глобальної мети ліквідації мін.

У вересні 2025 року вперше представлено ST2 – нове покоління дронів для виявлення мін та ВНП. Презентація відбулася у Львові на виставці Defense Tech Valley 2025, організованій Brave1 – головному європейському саміті оборонних інновацій, який зібрав понад 5000 учасників та 1500 міжнародних гостей із більш ніж 50 країн.

Дрон ST2 (рис. 2) поєднує досвід в гуманітарному розмінванні з вимогами фронту та є багатофункціональним автономним дроном з камерою. Він легший і компактніший за ST1, обладнаний двохосьовим гімбалом та камерою з 50× гібридним зумом. Основні можливості дрону ST2:

- автоматичне виявлення широкого спектра ВНП, включно з СВП та FPV-«ждунами»;
- автоматичне виявлення змін уздовж маршруту обстеження;
- ефективна робота в умовах активних засобів РЕБ; виконання завдань як удень, так і вночі [4–6].

**AILAND  
SYSTEMS**



**ST2 RAPTOR**

Рисунок 2 – Багатофункціональний автономний дрон з камерою ST2 [5]

Далі розглянемо такий напрям технологій для виявлення вибухонебезпечних предметів як «Наземні

роботизовані комплекси» (далі – НРК). Сучасні означені комплекси значно полегшують процес розмінвання (без присутності сапера в небезпечній зоні). Вони здатні самостійно наближатися до підозрілих предметів, проводити їх детальне обстеження, а за необхідності – і нейтралізацію, мінімізуючи людські втрати. Із впровадженням роботизованих систем у сферу гуманітарного розмінвання відкрилися нові можливості для підвищення безпеки та ефективності робіт. Активний розвиток НРК розпочався після усвідомлення того, що традиційні методи не забезпечують достатній рівень захисту саперів і потрібну швидкість очищення територій. НРК здатні виконувати завдання, які потребують високої точності та пов'язані з підвищеним ризиком для життя людини. Водночас їх адаптація до реальних умов роботи є складним процесом, що охоплює технічні, фізичні та організаційні аспекти.

Окремим аспектом є баланс між автономністю НРК і контролем з боку оператора. Попри значний прогрес у розвитку автономних функцій, більшість НРК потребують нагляду людини для ухвалення критично важливих рішень. Під час розмінвання можуть виникати нестандартні ситуації, що вимагають швидкої реакції і оцінки ризиків, яку не завжди можливо повністю автоматизувати. Крім того, умови на місцевості можуть змінюватися в процесі роботи, тому необхідне постійне коригування дій НРК. Це означає, що ефективне застосування НРК у гуманітарному розмінванні потребує не лише сучасної техніки, а й підготовлених фахівців, здатних професійно керувати такими комплексами та оперативно адаптувати їхню роботу до нових викликів.

Попри очевидні переваги, використання НРК у гуманітарному розмінванні супроводжується низкою серйозних викликів, які ускладнюють їх широке впровадження та ефективне застосування. НРК, оснащені сучасними сенсорами, камерами для знешкодження ВНП, потребують значних інвестицій. Додаткових витрат вимагають технічне обслуговування, ремонт, модернізація обладнання та регулярне оновлення програмного забезпечення. Для багатьох країн, що постраждали від війни, а також для гуманітарних організацій, такі витрати є суттєвим фінансовим навантаженням, що обмежує можливості масштабного застосування НРК.

Не менш важливими є технічні обмеження, пов'язані з умовами експлуатації. НРК мають працювати на складних територіях – із високою щільністю ВНП, зруйнованою інфраструктурою, враховувати стійкість до механічних пошкоджень і здатність працювати в екстремальних умовах – підвищеній вологості, пилу чи високих температурах. У таких середовищах ефективність робіт може знижуватися. Особливо складним завданням залишається точне виявлення мін із мінімальним вмістом металу або тих, що маскуються під природні об'єкти. Велика кількість уламків, металевих сміття

чи органічних матеріалів також може створювати перешкоди для сенсорних систем і спричиняти хибні сигнали. Тому НРК оснащують спеціалізованими сенсорами – металодетекторами, радіохвильовими детекторами, тепловізорами, відеокамерами для аналізу місцевості. Їх конструкція має забезпечувати прохідність на складних ділянках, зокрема там, де робота людини є небезпечною або фізично неможливою.

Окремим викликом є підготовка фахівців. Оператори НРК мають не лише володіти технічними навичками керування обладнанням, а й мати професійні знання у сфері розмінування. Вони мають вміти правильно оцінювати ситуацію, адаптувати роботу техніки до конкретних умов і приймати обґрунтовані рішення в ризикованих ситуаціях. Високий рівень кваліфікації є критично важливим, адже помилки в процесі розмінування можуть мати серйозні наслідки [7; 8].

Машина механізованого розмінування Nikken VM307-V24, передана Україні Японським агентством міжнародного співробітництва (JICA), підтвердила свою ефективність у реальних польових умовах. Вона суттєво спрощує очищення територій, особливо на складних ділянках - з густою рослинністю, нерівним рельєфом або щільним ґрунтом (рис. 3).



Рисунок 3 – Японська машина механізованого розмінування Nikken VM307-V24

Машина створена на базі екскаватора компанії Hitachi та оснащена спеціальним розмінувальним механізмом із 31 «зубом». Під час роботи високошвидкісна ротаційна фреза занурюється в землю приблизно на 30 см, підриваючи та знешкоджуючи ВВП. Такий принцип дії допомагає знешкоджувати міни без прямого контакту сапера з небезпечною зоною. Продуктивність техніки становить у середньому від 400 до 800 квадратних метрів на годину - залежно від складності місцевості. Це значно пришвидшує процес розмінування та підвищує безпеку персоналу. Завдяки екскаваторній

конструкції машина може працювати не лише на відкритих ділянках, а й у важкодоступних місцях. Важливо, що разом із передачею техніки японська сторона забезпечує навчання українських фахівців. Українські сапери відзначають надійність, маневреність і практичну ефективність цієї машини під час виконання завдань з гуманітарного розмінування [9].

Перспективи розвитку НРК у гуманітарному розмінуванні є значними, але для повноцінного використання їх потенціалу необхідно й надалі інвестувати в наукові дослідження. Серед основних напрямів удосконалення можна виділити такі:

розвиток штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання;

запровадження більш чутливих сенсорів;

оптимізація виробництва, використання доступніших компонентів і перехід до серійного виготовлення НРК.

Далі розглянемо такий напрям як «Сенсорні технології». Сучасні сенсорні системи – це різноманітні технічні пристрої, які здатні виявляти та аналізувати фізичні або хімічні сигнали в навколишньому середовищі [<https://nakypilo.ua/novyny/ozbroieni-tekhnohiiamy-yaki-it-rishennia-dopomozhut-u-rozminuvanni-ukrainy/>]. У гуманітарному розмінуванні вони застосовуються для пошуку та ідентифікації ВВП, що залишилися після бойових дій. Найпоширенішими є металодетектори, георадарні системи та інфрачервоні сенсори.

Металодетектори являються одними з найстаріших і найвідоміших інструментів розмінування. Вони працюють за принципом виявлення металу в ґрунті. Сучасні моделі оснащені чутливими сенсорами, які дозволяють знаходити навіть невеликі металеві елементи на глибині до одного метра (залежно від типу ґрунту та розміру об'єкта). Водночас металодетектори мають обмеження: вони менш ефективні для мін із мінімальним вмістом металу або повністю неметалевих конструкцій. Крім того, наявність металевих уламків чи сміття може створювати перешкоди та викликати хибні сигнали.

Георадарні системи допомагають подолати частину цих обмежень. Вони працюють за допомогою радіохвиль, які проникають у ґрунт і відбиваються від підземних об'єктів. Аналізуючи відбиті сигнали, фахівці можуть виявляти аномалії, що свідчать про наявність мін або інших ВВП. Перевагою георадара є здатність знаходити не лише металеві, а й неметалеві об'єкти. Наприклад, пластикові або дерев'яні елементи сучасних мін. Крім того, ця технологія дає змогу здійснювати глибинне сканування та отримувати зображення підземних структур (рис. 4), що допомагає точніше визначати місце розташування ВВП.

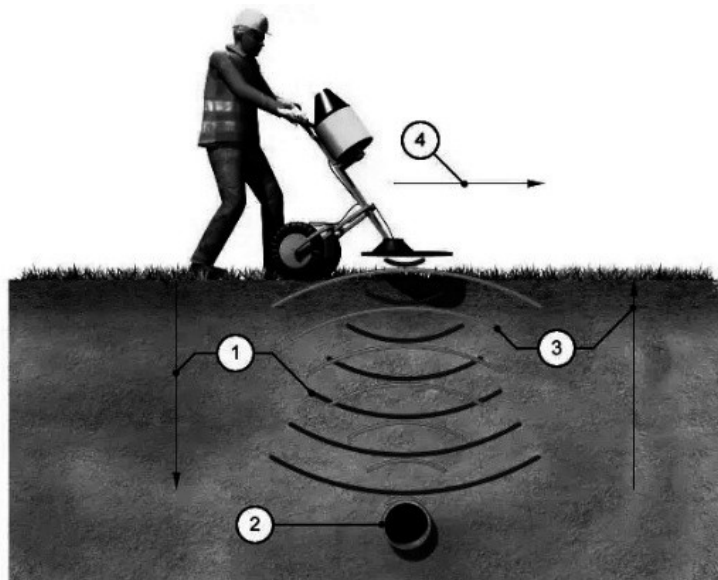


Рисунок 4 – Метод роботи георадара.

- 1 – георадар випромінює електромагнітну хвилю;
- 2 – хвиля проходить через середовище, доки не відобразиться через зміну матеріалу;
- 3 – генерація відбитої хвилі, яка фіксується георадаром;
- 4 – цей процес дослідження продовжується в лінійному напрямку, коли оператор переміщує георадар поверхнею).

Інфрачервоні сенсори працюють на основі фіксації температурних відмінностей. Вони можуть виявляти теплові аномалії, наприклад, у випадку активних мін або предметів, які нагрілися під дією сонця. Такі сенсори особливо ефективні в умовах обмеженої видимості – вночі, під час туману або за несприятливої погоди. Вони також можуть використовуватися для моніторингу великих територій і виявлення потенційно небезпечних ділянок за змінами температурного фону.

Поєднання різних сенсорних технологій дає змогу підвищити точність виявлення ВВП, компенсуючи обмеження кожного методу окремо [10; 11]. У пасивному дистанційному зондуванні Землі (далі – ДЗЗ) використовують мультиспектральні або гіперспектральні сенсори. Вони вимірюють інтенсивність сигналу за допомогою комбінації каналів, які різняться за їхньою кількістю (смуги двох або більше видів довжини). Діапазон каналів містить спектри в межах та за межами людського зору (видимий, ближній та тепловий інфрачервоний, а також мікрохвилі). Гіперспектральні сенсори забезпечують можливість отримання детальної інформації про зображення, розділяючи спектр на численні вузькі смуги, що дозволяє з високою точністю визначати характеристики об'єктів. Гіперспектральне зображення поєднує традиційне зображення з спектроскопічним аналізом, що дає змогу одночасно отримувати як просторову, так і спектральну інформацію. Гіперспектральне зображення надає багатшаровий спектральний профіль кожного пікселя, що дозволяє детально

аналізувати властивості матеріалів, такі як хімічний склад, текстура та вологість. У військових застосуваннях технологія використовується для точного визначення військових цілей, оскільки один піксель може представляти площу близько 1–2 м<sup>2</sup>, що робить її незамінною для виявлення мін і ВВП [12; 13].

Насамкінець розглянемо такий напрям технологій виявлення ВВП, як «Аналіз даних і штучний інтелект». Розвиток штучного інтелекту у гуманітарному розмінванні відкриває значні можливості для підвищення ефективності та безпеки робіт. Сучасні алгоритми можуть аналізувати дані, отримані з БпЛА, обладнаних камерами та сенсорами. Вони здатні помічати навіть незначні зміни на поверхні ґрунту чи в рельєфі, які можуть свідчити про наявність вибухонебезпечних предметів. Крім того, ШІ допомагає швидко обробляти великі обсяги інформації та використовувати її для планування робіт. Завдяки цьому можна точніше визначати пріоритетні ділянки, раціонально розподіляти ресурси й оптимізувати процес розмінування загалом.

Рої дронів інтегрують передові комп'ютерні алгоритми з технологіями зондування та зв'язку для синхронізації кількох дронів для досягнення мети. Вони можуть використовувати різні методи управління та контролю (рис. 5), включно із заздалегідь запрограмованими місіями з певними визначеними траєкторіями польоту, централізоване управління наземною станцією або одним керуючим дроном, або розподілене управління, де дрони спілкуються та співпрацюють на основі спільної інформації.

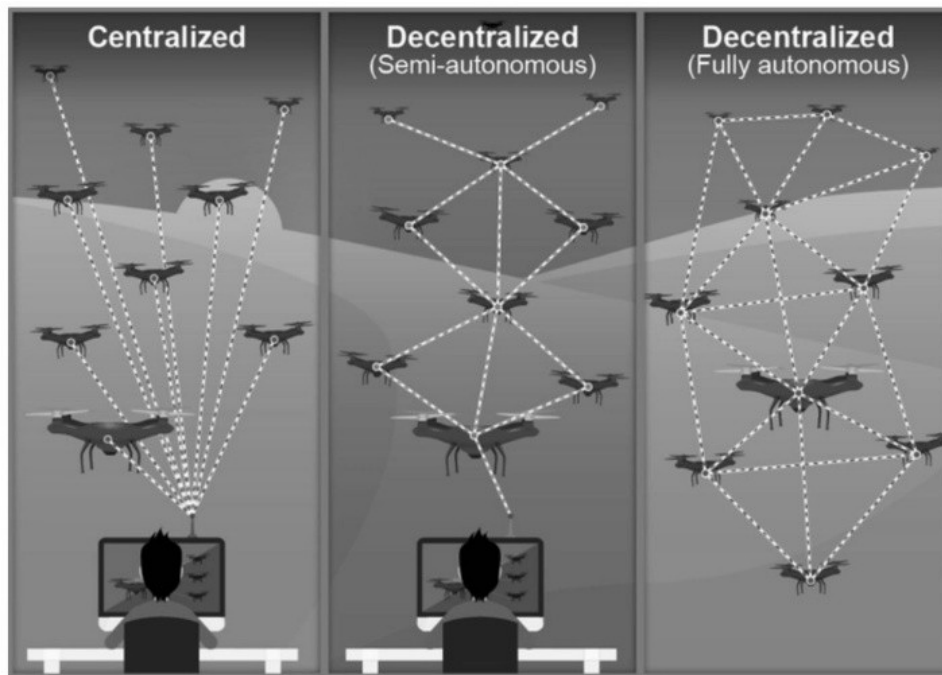


Рисунок 5 – Методи управління та контролю роєм дронів (зліва направо: централізований метод, коли всі рішення приймає людина; децентралізований метод напівавтономний - метод, коли кожен дрон приймає рішення на місцевому рівні; децентралізований метод повністю автономний – метод, за якого дрони координують свої дії через мережу та обмінюються інформацією між собою, кожен дрон взаємодіє з іншими і спільно виконує поставлене завдання)

Більш просунуті методи управління містять ройовий інтелект, натхненний колективною поведінкою колоній комах та зграй птахів, а також методи ШІ для навчання роїв дронів реагувати на нові або неочікувані ситуації [14].

Аналіз даних у гуманітарному розмінванні є важливим елементом системи управління ризиками. Саме завдяки якісному аналізу можна правильно оцінити рівень небезпеки та визначити, де роботи потрібно розпочати насамперед. Інформація надходить із багатьох джерел: звітів саперів, супутникових знімків, аеророзвідки, архівів бойових дій, даних геофізичних сенсорів, результатів польових обстежень і карт руйнувань. Обсяг цих даних дуже великий, тому без спеціальних цифрових систем їх опрацювання було б повільним та менш точним.

Завдяки аналізу створюються карти та моделі ризику, які показують можливі зони мінування й рівень забруднення території ВНП. На основі цих даних визначаються пріоритети очищення, плануються маршрути та логістика, розраховується потреба в персоналі й техніці. Важливу роль у цьому процесі відіграють ГІС, які поєднують просторову інформацію з аналітичними інструментами та допомагають приймати обґрунтовані рішення щодо ресурсів і строків виконання робіт [15].

Ще однією важливою перевагою аналітики є можливість поєднувати дані з різних періодів – як історичні, так і поточні. Наприклад, відомості про інтенсивність бойових дій, маршрути пересування військової техніки, типи застосованих боєприпасів і результати первинних обстежень допомагають

точніше визначити території з найвищим рівнем мінної небезпеки. Це дає змогу уникнути зайвих витрат часу, зменшити ризики для саперів і швидше повернути очищені землі до безпечного цивільного використання.

ШІ у розмінванні допомагає автоматизувати частину процесів, які раніше вимагали значних людських ресурсів. Алгоритми машинного та глибокого навчання можуть аналізувати зображення, обробляти сигнали з сенсорів, розпізнавати об'єкти та оцінювати рівень ризику з високою точністю – часто ефективніше традиційних методів.

Одним із найперспективніших напрямів аналізу даних є автоматизований аналіз супутникових і аерофотознімків. Системи комп'ютерного зору здатні виявляти траншеї, вирви, зміни рельєфу, залишки техніки та інші ознаки можливого замінування. Завдяки цьому можна заздалегідь створювати карти потенційно небезпечних ділянок, ще до виїзду саперів на місце. Такі технології дають змогу швидко аналізувати великі території, що особливо важливо в регіонах із масштабним забрудненням ВНП.

Використання ШІ у роботі сенсорних систем є не менш важливим напрямом. Сучасні сенсори під час обстеження території формують великі обсяги первинних сигналів. Аналізувати їх вручну складно, довго і не завжди точно. Алгоритми ШІ допомагають автоматично обробляти ці сигнали: відфільтрувати перешкоди, визначати форму та структуру підземних об'єктів, розрізняти ВНП, металеві уламки чи природні мінерали. У результаті підвищується

точність виявлення та зменшується кількість хибних спрацювань.

У поєднанні з роботизованими платформами, ШІ забезпечує часткову або повну автономність роботи. Такі системи можуть самостійно планувати маршрути, обходити перешкоди, адаптуватися до особливостей місцевості, збирати та передавати дані для подальшого аналізу, а також контролювати вже очищені ділянки. Це знижує навантаження на саперів і підвищує рівень їхньої безпеки, особливо у важкодоступних або небезпечних зонах.

Особливу цінність має створення єдиної цифрової системи, яка об'єднує аналіз даних і ШІ. Такі платформи інтегрують інформацію з різних джерел, автоматично її обробляють і формують цілісну картину мінної небезпеки на території. До основних елементів такої системи належать:

- цифрові карти ризику;
- моделі можливого розташування ВВП;
- алгоритми прогнозування для планування операцій;
- інструменти візуалізації результатів обстежень.

Усі ці складові працюють у безперервному циклі: збір даних – аналіз – прогнозування – виконання робіт – перевірка – оновлення моделей. Кожна нова операція доповнює систему інформацією, роблячи її точнішою, а процес очищення ефективнішим.

Водночас впровадження аналізу даних і ШІ у гуманітарне розмінування має певні труднощі. Найбільшою з них є доступ до якісних і стандартизованих даних. Для цього потрібна інформація про типи мін, вид ґрунту, характеристики сенсорів і результати польових робіт. Однак різні організації часто використовують власні формати та методи збору інформації, що ускладнює об'єднання даних і розробку універсальних рішень [16].

Ще однією проблемою є складність ландшафту та умов, у яких працюють системи ШІ. Алгоритми, що показують хороші результати в одному регіоні, можуть працювати гірше в іншому. Причинами можуть бути інша структура ґрунту, клімат, рельєф або типи застосованих боєприпасів. Тому моделі потребують постійного налаштування та адаптації до конкретних умов.

Окремої уваги потребують питання захисту даних, безпечної використання автономних систем і належної підготовки фахівців. Робота із сучасними цифровими платформами та алгоритмами вимагає спеціальних знань і навичок, без яких ефективно впровадження технологій є неможливим.

Серед перспективних напрямів аналізу даних варто виділити створення моделей «digital twin» - цифрових двійників територій. Це віртуальні моделі реальних ділянок, у яких можна відтворювати можливі сценарії мінування, планувати операції та перевіряти різні варіанти дій без ризику для людей. Такий підхід дозволяє точніше прогнозувати результати робіт, краще розподіляти ресурси та значно пришвидшувати очищення територій [17].

Узагальнюючи зазначимо, що запровадження нових технологій суттєво змінює підхід до

гуманітарного розмінування. Наприклад, використання дронів дає змогу швидко й точно обстежувати великі території без прямої участі людей у небезпечних зонах. Це зменшує ризик для життя саперів і пришвидшує оцінку ситуації.

Наземні роботизовані комплекси зі спеціальними сенсорами можуть працювати там, де перебування людини є надто небезпечним. Вони допомагають виявляти ВВП, обстежувати складні ділянки та збирати дані для подальшого аналізу. У результаті потреба в безпосередній присутності саперів на найбільш ризикованих ділянках зменшується.

Аналіз даних і штучний інтелект дають змогу точніше визначати пріоритетні зони для розмінування. Це означає, що ресурси (техніка, час і фахівці) використовуються більш раціонально, а процес очищення територій відбувається швидше.

Водночас гуманітарне розмінування в умовах сучасної війни має ширшу мету, ніж просто усунення безпосередньої загрози для цивільного населення. Йдеться також про відновлення нормального життя на постраждалих територіях: повернення людей до своїх домів, відновлення інфраструктури, сільського господарства та економічної діяльності. Технології захисту в цьому процесі не лише підвищують безпеку, а й забезпечують можливість ефективно діяти в складних умовах.

## Висновки

Особливість російсько-української війни у поєднанні надзвичайно великих масштабів уражень територій із технологічною складністю застосованих ВВП, що суттєво ускладнює процеси виявлення, ідентифікації та знешкодження. Головним викликом гуманітарного розмінування залишається структурна неоднорідність мінно-вибухового забруднення (касетні боєприпаси з відкладеним або частковим спрацюванням, саморобні вибухові пристрої та значну кількість вибухонебезпечних залишків війни). Використання мін із низьким вмістом металу, дистанційних способів мінування та маскування під елементи довкілля суттєво знижує ефективність традиційних методів розмінування й підвищує ризики для саперів.

Складні умови сучасного конфлікту (обстріли, повторне мінування, густа рослинність, складний рельєф) роблять традиційні методи розмінування недостатніми з погляду безпеки і оперативності, що зумовлює необхідність технологічної трансформації всієї системи протимінної діяльності.

Аналіз наукових досліджень підтверджує, що поряд із традиційними методами все активніше застосовуються сучасні захисні технології - дрони, НРК, сенсорні системи, геоінформаційні технології та штучний інтелект. Сучасні захисні технології в гуманітарному розмінуванні допомагають краще контролювати ризики та зменшують небезпеку для саперів та цивільного населення. Використання БпЛА з гіперспектральними сенсорами та високоточними геоданими дає змогу дистанційно обстежувати великі території і попередньо визначати рівень мінної небезпеки. Завдяки НРК небезпечні роботи

виконуються дистанційно та зменшується ризик травмування саперів під час розмінування. Інтеграція алгоритмів штучного інтелекту і машинного навчання підвищує точність аналізу даних та зменшує кількість помилкових спрацювань. Водночас масштаб мінної загрози та складність розмінування потребують подальших досліджень, розвитку технологій і активної міжнародної співпраці.

Варто наголосити, що жодна окрема технологія не є універсальним рішенням. Обмеження глибини виявлення, складність роботи в умовах густої рослинності або зруйнованої інфраструктури, висока вартість обладнання та потреба в спеціалізованій підготовці фахівців зумовлюють необхідність комплексного підходу. Найбільш ефективною визнається інтегрована модель, у якій поєднуються дистанційне зондування, сенсорні технології, робототехніка і аналітика великих даних зі штучним інтелектом.

Отже, сучасні наукові досягнення доводять, що гуманітарне розмінування в умовах російсько-української війни має розглядатися не лише як технічне завдання, а як міждисциплінарна система безпеки, що поєднує інженерні, інформаційні, військово-технічні та гуманітарні компоненти. Роль сучасних захисних технологій у цій системі зводиться не лише до підвищення ефективності робіт, але й у збереженні людського життя, мінімізації соціально-економічних наслідків війни та створенні умов для відновлення постраждалих територій.

## Список бібліографічних посилань

1. Поплавський В.М., Нікорич В.А., Гуцул Т.В. Аналіз методів виявлення наземних мін та значення вивчення ґрунтових властивостей для їх ефективного застосування. *Biological systems*. 2024. Vol. 16. Is.1. DOI: <https://doi.org/10.31861/biosystems2024.01.160>.

2. Зацерковний В., Ніколюк І. Використання БПЛА для виявлення вибухонебезпечних предметів та побудови карт при гуманітарному розмінуванні. *Технічні науки та технології*. 2025. № 1(39). DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-328-345](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-328-345).

3. Як БПЛА зробили революцію у галузі лазерного сканування. 2022. URL: [https://scanx.com.ua/article/10\\_2022/5.html](https://scanx.com.ua/article/10_2022/5.html) (дата звернення: 06.12.2025).

4. Представлення нового покоління дронів-детекторів мін ST1. Участь у міжнародному проєкті ООН із розробки технології виявлення мін. Ми презентували дрон ST2 на Defense Tech Valley 2025. 2025. URL: <https://ailandsystems.com/ua/company-ua/> (дата звернення: 12.12.2025).

5. **Prodrone Concluded a Grant Agreement** with UNIDO for the «Green industrial recovery Project for Ukraine through technology transfer from and the co-creation of new business with Japan's private industries». 2025. URL: <https://www.padeco.co.jp/en/notice.html?itemid=212&dispmid=589> (Accessed: 12 December 2025).

6. **Україна та JICA: підписано Меморандум про гуманітарне розмінування**. 2025. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/ukraina-ta-jica-pidpysano-memorandum-pro-humanitarne-rozminuvannia> (дата звернення: 14.12.2025).

7. **Роботизовані комплекси ЗСУ: коли інженерія стає зброєю**. 2025. URL: <https://armyinform.com.ua/2025/09/11/robotyzovani-kompleksy-zsu-koly-inzheneriya-stave-zbroeyevu/> (дата звернення: 15.12.2025).

8. Semenenko O., Baranov S.,

*Перспективи і напрями подальших досліджень*. Подальші наукові дослідження у сфері гуманітарного розмінування мають бути направлені на розвиток міждисциплінарних досліджень, із залученням інженерів, фахівців з безпеки, екологів, економістів і соціологів. Важливо і надалі удосконалювати технології виявлення та знешкодження ВВП, розробляти комплексні підходи для прискорення та підвищення ефективності розмінування. Це особливо важливо в умовах російсько-української війни, коли значні площі залишаються забрудненими ВВП, а ризики для цивільного населення залишаються високими.

*Конфлікт інтересів*. Повідомляємо про відсутність конфліктів інтересів, що впливають на результати дослідження.

*Фінансування*. Фінансування дослідження не здійснювалося.

*Доступність даних*. Дослідження виконано з використанням виключно відкритих даних, доступних у публічних джерелах.

*Використання засобів штучного інтелекту*. Під час написання статті застосовувалися засоби ШІ для пошуку інформації, перекладу англійських статей та анотації. Використання засобів ШІ не призвело до порушення авторських прав й етичних норм наукового дослідження, а згенерований контент був перевірений і відповідає дійсності.

Akinina T., Dobrovolskyi Y., Yarmolchuk M., Musienko Y. Conceptual views on the development and application of robotic systems in the Armed Forces of Ukraine (concept, tasks, classification, management system, application challenges, prospects). *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*. 2023. Vol. 13. № 3. DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.2>.

9. **Японська машина Nikken демонструє ефективність на замінованих полях Миколаївщини**. 2025. URL: <https://mk.dsns.gov.ua/news/ostanni-novini/iaponska-masina-nikken-demonstruje-efektivnist-na-zaminovanix-poliakh-mikolayivshhini-videofoto> (дата звернення: 15.12.2025).

10. **Сенсори для виявлення мін: на Харківщині випробували інноваційні технології в гуманітарному розмінуванні**. 2024. URL: <https://demine.gov.ua/news/sensory-dlia-vyivlennia-min-na-kharkivshchyni-vyprobuvaly-innovatsiini-tekhnologii-v-humanitarnomu-rozminuvanni> (дата звернення: 17.12.2025).

11. **Milokhin M.** Multi-sensor technologies for the detection of explosive objects in mining using UAV swarms. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2024. Issue 2. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-40>.

12. **Корут П.** Види дистанційного зондування Землі. EOS Data Analytics. 2023. URL: <https://eos.com/uk/blog/vydy-dystantsiinoho-zonduvannia/> (дата звернення: 23.12.2025).

13. **Стражніков А.А., Кисіль Т.М., Халапова С.В., Жебка В.В.** Гіперспектральний аналіз для розпізнавання та класифікації матеріалів земної поверхні. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2025. № 2. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.022314>.

14. **Science & Tech Spotlight: Drone Swarm Technologies**. GAO U.S.

Government Accountability Office. 2023. URL: <https://www.gao.gov/products/gao-23-106930> (дата звернення: 23.12.2025). 15. Hutsul T. Geographic information systems in humanitarian demining: history, development, and modernity. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv Military-Special Sciences. Military-special sciences*. 2025. № 3. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.63.85-92>. 16. Пістрюга Т. Від металошукачів до дронів і роботів: як

розмінування в Україні стало high-tech. 2025. URL: <https://dev.ua/blogs/posts/pistriuha-1751629554> (дата звернення: 23.12.2025). 17. Панкратова Н., Панкратов В., Голінко І. Стратегія застосування цифрового двійника за умов децентралізованого керування роєм безпілотних літальних апаратів. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2025. № 6. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.06.023>.

## KEY CHALLENGES OF MINE HAZARDS IN THE PROCESS OF HUMANITARIAN DEMINING DURING THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR AND THE ROLE OF MODERN PROTECTIVE TECHNOLOGIES

**KHOMENKO Yevhen**, Scientific Research Center of the State Special Transport Service of Ukraine, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0006-7006-3439>

**RYBALKA Viktor**, State Special Transport Service, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0008-6344-5791>

**KOSTYRIA Serhii**, PhD in Engineering, Scientific Research Center of the State Special Transport Service of Ukraine, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-5215-080X>

**TKACH Maryna**, Scientific Research Center of the State Special Transport Service of Ukraine, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0001-1478-004X>

**Formulation of the problem in general.** *The purpose of the article is to conduct a comprehensive analysis of the specifics of humanitarian demining in the context of modern warfare, considering the need to adapt organisational and technological approaches. It aims to identify key challenges of mine danger and evaluate the role of modern protective technologies in mitigating risks for demining specialists and the civilian population.*

**Research methods.** *The study employs methods of systemic and structural-functional analysis, comparative analysis, and the synthesis of scientific sources and regulatory documents, including international mine action standards. The research is based on reports from international organisations and practical experience in conducting humanitarian demining operations in combat zones.*

**Literature review.** *Based on the analysis of publications, the following conclusions can be drawn regarding the current state and prospects of humanitarian demining: uniqueness of the Ukrainian experience (no existing methodology in the world was designed for such a high density and diversity of landmine contamination), priority of automation (the primary method is the maximum distancing of personnel from hazardous objects), the need for complexity (the efficiency of the process depends not only on hardware but also on a comprehensive approach, including the creation of a unified digital database for mine action) and long-term nature of the challenge (literature analysis confirms that even with the use of state-of-the-art technologies, the process of complete land clearance will span decades, necessitating sustained long-term funding and continuous professional training of personnel).*

**Research results.** *The current state of humanitarian demining is analysed, revealing primary challenges associated with high-intensity combat, a wide diversity of explosive remnants of war, and the complexity of accessing contaminated territories. The study substantiates the need to adapt existing approaches through the implementation of ground robotic systems, sensor technologies, unmanned aerial platforms, and individual and collective protective equipment to enhance the efficiency and safety of mine action operations.*

**Research novelty.** *The scientific novelty lies in the systematisation of humanitarian demining challenges specifically within the context of modern warfare, as well as a comprehensive examination of protective technologies as an integrated element of mine action rather than merely an auxiliary safety tool for specialists and civilians.*

**Theoretical and practical significance.** *The theoretical value of this research lies in the expansion and systematisation of scientific approaches to optimising humanitarian demining processes in the context of modern military threats. The practical importance of the study is found in the potential application of its findings and recommendations by international organisations and mine action specialists. These insights aim to enhance the overall efficiency and operational safety of demining activities.*

**Conclusion and future work.** *The study identifies key challenges of humanitarian demining in Ukraine, including unprecedented mining density and the use of sophisticated fuses that bypass traditional safety protocols. It is demonstrated that modern protective technologies, such as ground robotic systems and multi-sensor UAVs, are essential for transitioning from manual to remote demining. Future research will focus on developing AI algorithms for automated landmine detection using machine vision.*

**Keywords:** *humanitarian demining, mine hazards, explosive ordnance, ground-based robotic systems, unmanned aerial vehicle technology, sensor technology, artificial intelligence, mine action.*

## References

1. Poplavskiy, V.M., Nikorych, V.A., Hutsul, T. V., (2024). Analysis of landmine detection methods and the importance of studying soil properties for their effective application. *Biological Systems*, 16(1). DOI:

<https://doi.org/10.31861/biosystems2024.01.160>.

2. Zatserkovnyi, V., Nikoliuk, I., (2025). Use of UAVs for detecting explosive objects and mapping in humanitarian demining. *Technical Sciences and Technologies*, 1(39). DOI:

[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1\(39\)-328-345](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-1(39)-328-345).

**3. How UAVs revolutionized the field of laser scanning** [online]. Available at: [https://scanx.com.ua/article/10\\_2022/5.html](https://scanx.com.ua/article/10_2022/5.html) [Accessed: 06.12.2025]. **4. Presentation of the new generation of ST1 mine-detecting drones. Participation in the UN international project to develop mine detection technology. We presented the ST2 drone at Defence Tech Valley 2025** [online]. Available at: <https://ailandsystems.com/en/company/> [Accessed: 12.12.2025]. **5. Prodrone Concluded a Grant Agreement with UNIDO for the «Green industrial recovery Project for Ukraine through technology transfer from and the co-creation of new business with Japan’s private industries»** [online]. Available at: <https://www.padeco.co.jp/en/notice.html?itemid=212&dispmid=589> [Accessed: 12.12.2025]. **6. Ukraine and JICA: Memorandum on humanitarian demining signed** [online]. Available at: <https://www.kmu.gov.ua/en/news/ukraina-ta-jica-pidpysano-memorandum-pro-humanitarne-rozminuvannia> [Accessed: 14.12.2025]. **7. Robotic systems of the AFU: When engineering becomes a weapon** [online]. Available at: <https://armyinform.com.ua/2025/09/11/robotyzovani-kompleksy-zsu-koly-inzheneriya-staye-zbrojeyu/> [Accessed: 15.12.2025]. **8. Semenenko O., Baranov S., Akinina T., Dobrovolskyi Y., Yarmolchuk M., Musiienko V., (2023). Conceptual views on the development and application of robotic systems in the Armed Forces of Ukraine (concept, tasks, classification, management system, application challenges, prospects). *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*, 13(3). DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.3.2>. (Accessed: 15.12.2025). **9. Japanese Nikken machine demonstrates efficiency in the mined fields of Mykolaiv region** [online]. Available at: <https://mk.dsns.gov.ua/en/news/> [Accessed: 15.12.2025]. **10. Mine detection sensors: Innovative technologies in humanitarian demining tested in****

**Kharkiv region** [online]. Available at: <https://demine.gov.ua/en/news/sensory-dlia-vyivlennia-min-na-kharkivshchyni-vyprobuvaly-innovatsiini-tekhnologii-v-humanitarnomu-rozminuvanni> [Accessed: 17.12.2025]. **11. Milokhin M., (2024). Multi-sensor technologies for the detection of explosive objects in mining using UAV swarms. Measuring and computing devices in technological processes. *International Scientific-technical journal «Measuring and computing devices in technological processes*, 2. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-40>. **12. Kohut P., (2023). Types of Earth Remote Sensing. *EOS Data Analytics* [online]. Available at: <https://eos.com/blog/types-of-remote-sensing/> [Accessed: 23.12.2025]. **13. Strazhnikov A.A., Kysil T.M., Khalapova S.V., Zhebka V.V., (2025). Hyperspectral analysis for recognition and classification of earth surface materials. *Telecommunication and Information Technologies*, 2. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2025.022314>. **14. Science & Tech Spotlight: Drone Swarm Technologies. GAO U.S. Government Accountability Office** [online]. Available at: <https://www.gao.gov/products/gao-23-106930> [Accessed: 23.12.2025]. **15. Hutsul, T., (2025). Geographic information systems in humanitarian demining: history, development, and modernity. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv Military-Special Sciences. Military-special sciences*, 3. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.63.85-92>. **16. Pistriuha, T., (2025). From metal detectors to drones and robots: How demining in Ukraine became high-tech** [online]. Available at: <https://dev.ua/blogs/posts/pistriuha-1751629554> [Accessed: 23.12.2025]. **17. Pankratova N., Pankratov V., Holinko I., (2025). Strategy for applying a digital twin under conditions of decentralised swarm control of unmanned aerial vehicles. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 6. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2025.06.023>.**********

Рукопис надійшов до редакції	21.01.2026
Рукопис прийнято до друку після рецензування	06.04.2026
Дата публікації	30.04.2026