

Віталій Іванович Зацерковний¹, Ігор Романович Ніколюк²¹доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики

Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. ScopusID: 57200165109²аспірант 1 року навчання, спеціальність 193 – Геодезія та землеустрій

Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)

E-mail: nikoliuk.igor@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-0750-2603>. ResearcherID: rid105343**ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ ТА ПОБУДОВИ КАРТ ПРИ ГУМАНІТАРНОМУ РОЗМІНУВАННІ**

Широкомасштабне вторгнення РФ спричинило безпрецедентне забруднення території України вибухонебезпечними предметами (ВНП), перетворивши її на одну з найбільш замінованих країн світу (близько 144 тис. км² потенційно небезпечні). Це становить довготривалу смертельну загрозу для цивільного населення, блокує соціально-економічне відновлення, особливо в аграрному секторі, руйнує інфраструктуру та завдає шкоди довкіллю.

Гуманітарне розмінування визначено як критично важливий процес для ліквідації цих загроз, що включає нетехнічне та технічне обстеження, картографування, маркування, знешкодження ВНП та інформування населення. Стаття підкреслює актуальність застосування сучасних технологій для оптимізації цього складного і небезпечного процесу.

Ключову роль у модернізації розмінування відіграють безпілотні літальні апарати (БПЛА). Вони дозволяють проводити дистанційне обстеження великих територій з мінімальним ризиком для людей. У статті детально розглянуто методи використання БПЛА: оснащення магнітометрами для виявлення металевих об'єктів, інфрачервоними (тепловими) сенсорами для фіксації температурних аномалій від ВНП, мультиспектральними та гіперспектральними камерами для аналізу змін у рослинності чи виявлення специфічних матеріалів. Згадано також георадари (GPR) та LiDAR.

Важливим аспектом є інтеграція даних з БПЛА з геоінформаційними системами (ГІС) та алгоритмами штучного інтелекту (ШІ). Це дозволяє створювати детальні ортофотоплани, цифрові моделі місцевості, автоматизовано аналізувати зображення, ідентифікувати потенційні загрози та будувати точні карти ризиків. Як приклад наведено дослідження території Петропавлівської ОТГ, де за допомогою БПЛА та ArcGIS було ідентифіковано вирви від вибухів, визначено небезпечні зони та створено 500-метрові буферні зони безпеки.

Незважаючи на певні виклики (наприклад, виявлення неметалевих мін), технології БПЛА демонструють високу ефективність та мають величезний потенціал для значного прискорення процесу очищення українських земель, збереження життів та сприяння повоєнному відновленню.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати (БПЛА); вибухонебезпечні предмети (ВНП); гуманітарне розмінування; виявлення ВНП; геоінформаційні системи (ГІС); сенсори; дистанційне зондування.

Рис.: 19. Табл.: 2. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Широкомасштабне військове вторгнення Російської Федерації 24 лютого 2022 року в Україну спричинило безпрецедентне забруднення її територій вибухонебезпечними предметами (ВНП). Із самого першого дня російські агресори почали руйнувати економіку та інфраструктуру країни, завдаючи ударів по енергетичних, нафтопереробних та інших промислових і сільськогосподарських підприємствах, житлових будинках, які створювалися десятиліттями. Почали гинути ні в чому невинні люди, флора та фауна, знищуватися техніка, обладнання, руйнуватись інфраструктура міст і сіл.

Артилерійські обстріли нашої країни агресором дали зрозуміти всьому світу, що російські злочинці розв'язали геноцидну війну. А звірства росіян у Бучі, Ірпені, Гостомелі залишили гіркий біль у серцях українського народу й усього прогресивного людства. Масові захоронення людей, які були знайдені після деокупації, стали сигналом для всього цивілізованого світу, що Україна стримує навалу фашистів ціною життя свого народу [1].

Протягом усього періоду бойових дій, який триває й досі, агресор використовував і продовжує використовувати різноманітні види озброєння, залишаючи після себе нерозірвані боєприпаси, вибухонебезпечні залишки війни та мінні загородження.

Найбільш поширеними ВНП якими забруднені території Україні є міни (протипіхотні фугасні, протипіхотні осколкові, протитанкові, протитанкові дистанційні, мінометні, пастки), ручні гранати, артилерійські й реактивні снаряди, касетні боєприпаси, балістичні, авіаційні та протитанкові ракети, авіаційні бомби.

При їх детонації окислюються навколишні ґрунти, деревина, дернина, конструкції, а також утворюється низка хімічних сполук та токсичних органічних речовин. Під час вибуху всі речовини проходять повне окиснення, а продукти хімічної реакції вивільняються в атмосферу. В атмосфері оксиди сірки і азоту стають причиною кислотних дощів, що змінюють кислотність ґрунту і викликають опіки рослин, до яких особливо чутливими є хвойні дерева. Кислотні дощі негативно впливають і на організм людини, ссавців та птахів, на стан слизових тканин та органів дихання [2].

Основні наслідки від спрацювання ВВП представлені на рис. 1.

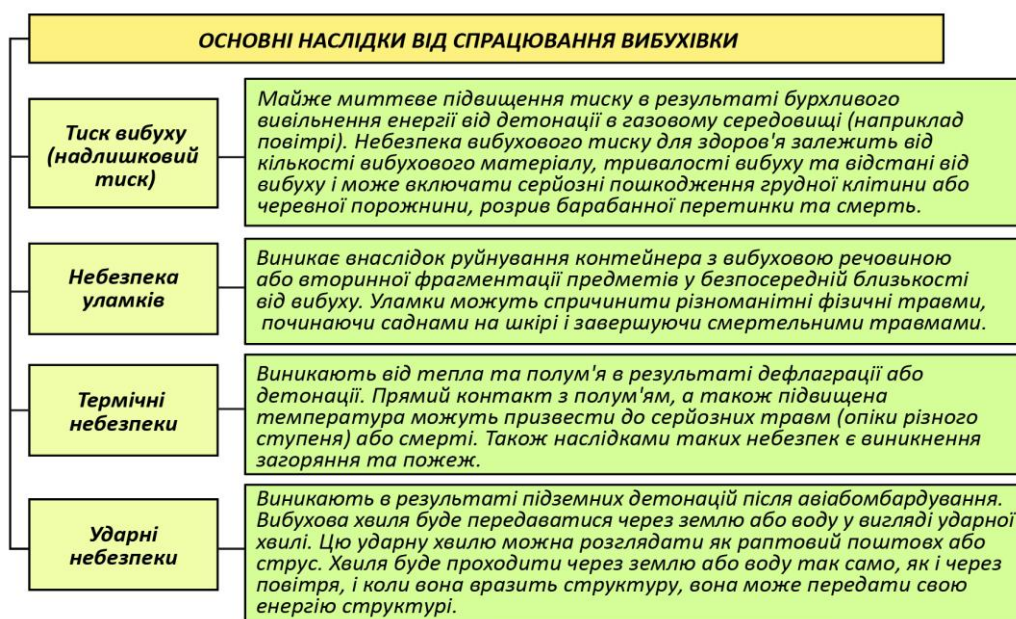


Рис. 1. Основні наслідки від спрацювання ВВП

Серед усього розмаїття ВВП, особливо небезпечними є міни, що встановлюються попри заборону згідно до «Конвенції про заборону або обмеження застосування конкретних видів звичайної зброї, які можуть вважатися такими, що завдають надмірних ушкоджень або мають невибіркову дію» та додаткового протоколу II до неї [3].

Перелік особливо небезпечних мін представлений на рис. 2.

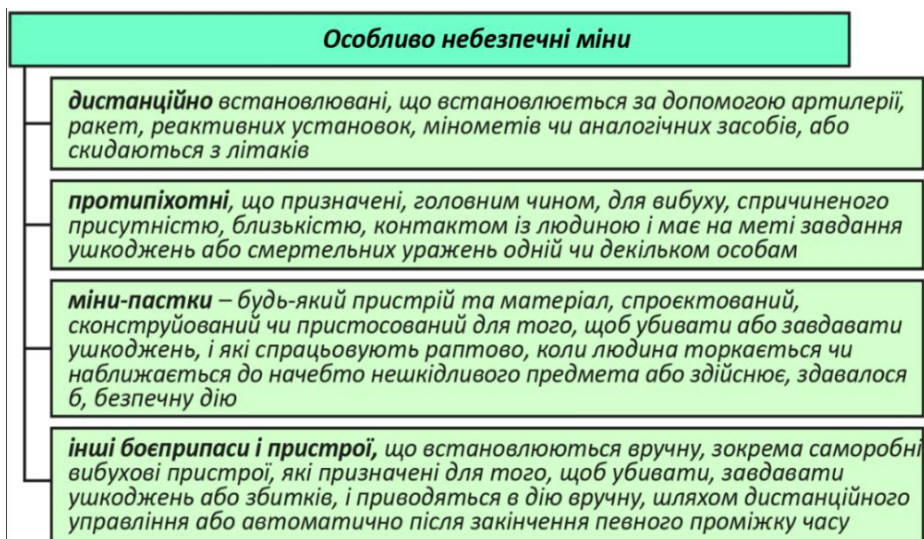


Рис. 2. Особливо небезпечні міни, що встановлюються попри заборону згідно з Конвенцією

Під розмінуванням розуміють процес повного знешкодження та утилізації мін, мін-пасток, саморобних вибухових пристроїв, які не розірвалися, вибухових предметів з певного району місцевості з метою забезпечення безпеки цивільного населення. На морі для розмінування часто використовують тральники, а для очищення сухопутних ділянок залучаються інженерні підрозділи, сапери, служба з надзвичайних ситуацій (у складі якої є відповідні підрозділи). Розмінування може проводитися вручну або механічним способом за допомогою спецмашин [4].

Виділяють три види розмінування (рис. 3).

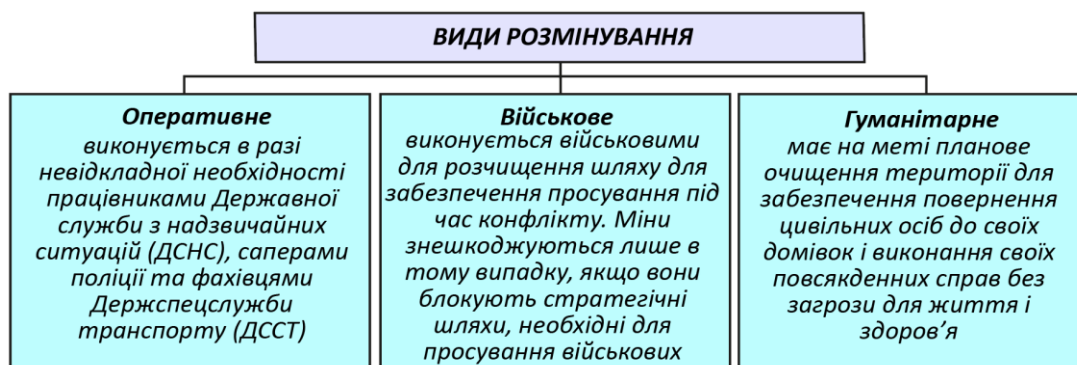


Рис. 3. Види розмінування

Гуманітарне розмінування – це один з основних компонентів протимінної діяльності, який передбачає дослідження, картографування та маркування мінних полів із наступним фактичним розмінуванням територій та інформуванням населення про мінну небезпеку. Цей процес потребує значних зусиль, координації дій між державними органами та міжнародною співпрацею. Від ефективності розмінування залежить не тільки безпека громадян, але й можливість відновлення інфраструктури та економіки в цілому на деокупованих територіях. Це питання національної безпеки.

З огляду на те, що на сьогодні замінованими залишаються близько 30 % території України. МВС та МО створило Міжнародний координаційний центр з гуманітарного розмінування. До цього процесу залучені всі сили МВС – підрозділи ДСНС, Нацполіції, сапери Нацгвардії. У 2024 році було створено Коаліцію протимінної діяльності за участю 22 країн НАТО, що сприяє посиленню координації та залученню додаткових ресурсів для розмінування. Крім того, зростає кількість сертифікованих операторів протимінної діяльності, що позитивно впливає на темпи розмінування. Актуальність гуманітарного розмінування представлена на рис. 4.

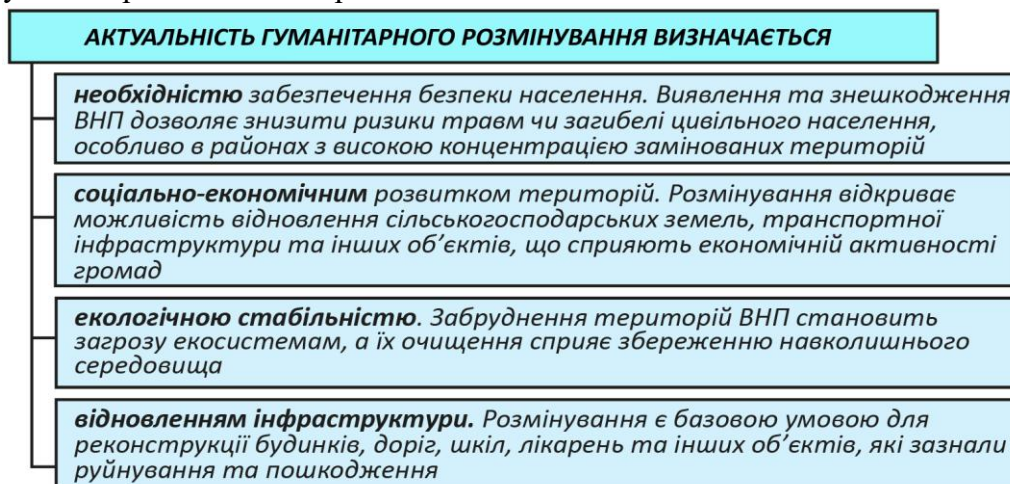


Рис. 4. Необхідність гуманітарного розмінування

Цілі гуманітарного розмінування відповідно Закону України від 06.12.2018 № 2642-VIII представлені на рис. 5.



Рис. 5. Цілі гуманітарного розмінування

Через мінну загрозу унеможлиблюється повернення внутрішньо переміщених осіб, відбудова інфраструктури, відновлення сільського господарства та промисловості. За оцінками Світового банку, на повне розмінування України може знадобитися понад 34,6 млрд дол. США, а процес може тривати десятиліттями [5].

Постановка проблеми. За даними Огляду протимінної діяльності 2023 року, Україна належить до країн із найвищим рівнем забруднення ВВП, перевершуючи навіть ті держави, де військові конфлікти тривають десятиліттями. Україна набула статусу однієї з найбільш забруднених (замінованих) країн світу. ВВП забруднені Чернігівська, Дніпропетровська, Донецька, Харківська, Херсонська, Київська, Луганська, Миколаївська, Одеська, Сумська та Запорізька області.

Площа потенційно забруднених територій на 1.01.2024 р. складала 156 тис. км², що становить близько чверті загальної площі країни [6]. Проте, вже станом на липень 2024 року зазначена площа становила 144 тис. км². Ці цифри зазнають постійних змін в ту чи іншу сторону, оскільки тривають бойові дії [7].

Попри наявність певної кількості досліджень, конкретні методи і результати гуманітарного розмінування потребують подальших наукових вишукувань, розробки ефективних методів і технологій очищення територій від ВВП, застосування технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для оптимізації процесів розмінування.

Незважаючи на значний прогрес, досягнутий у сфері гуманітарного розмінування в Україні, залишається ще низка викликів. Російські війська продовжують залишати мінні пастки навіть у цивільних будівлях, навчальних закладах та критичній інфраструктурі. Це ускладнює процес розмінування та потребує залучення ще більшої кількості фахівців і ресурсів. Також активно ведеться робота з інформування населення щодо ризиків, пов'язаних із ВВП, адже нерідко люди наражаються на небезпеку через брак знань про те, як діяти в потенційно небезпечних зонах.

Методи виявлення мін [8] представлені на рис. 6.

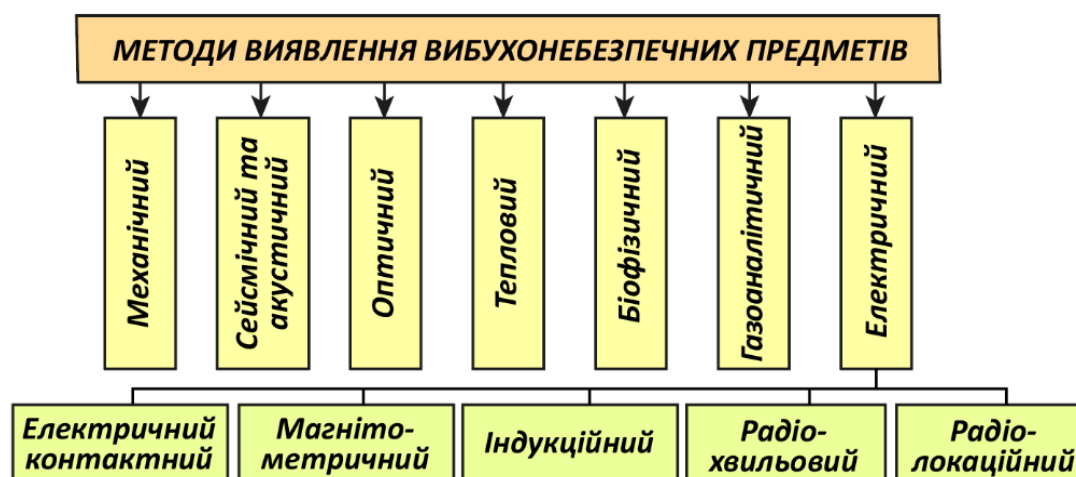


Рис. 6. Методи виявлення мін

Жоден із перерахованих методів не є універсальним, однак їх поєднання дозволяє підвищити ефективність розмінування. Подальше вдосконалення методів розмінування бачиться в інтеграції різних технологій у єдину систему.

Сучасні технології виявлення ВВП розширюють за рахунок їх дистанційного виявлення, зокрема за допомогою БПЛА. Організація Об'єднаних Націй визнала БПЛА реальним інструментом для протимінної діяльності. Алгоритм і етапи застосування БПЛА в процесі гуманітарного розмінування в загальному випадку представлений на рис. 7.

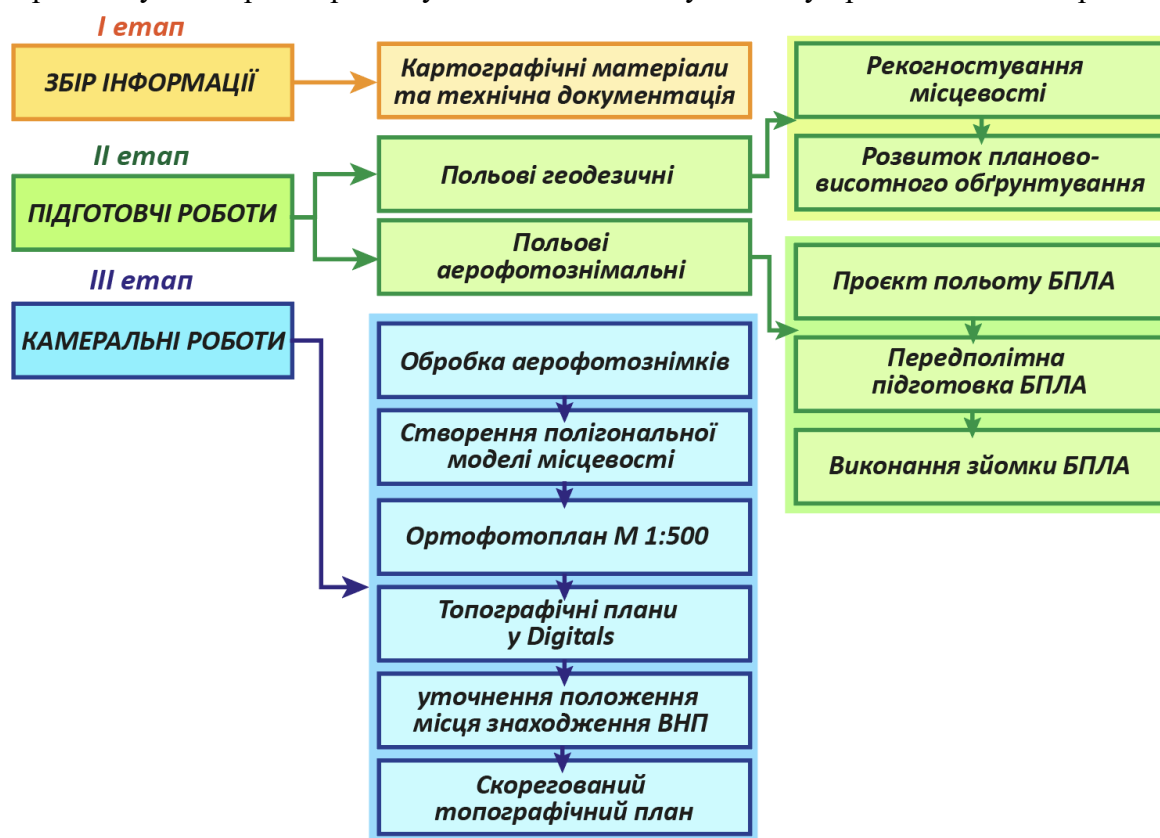


Рис. 7. Алгоритм і етапи застосування БПЛА в процесі гуманітарного розмінування

Метою статті є огляд ефективності та підходів до застосування БПЛА для виявлення ВНП та створення карт небезпечних територій в контексті гуманітарного розмінування в Україні.

Виклад основного матеріалу. Основні підходи до використання БПЛА для виявлення ВНП представлені на рис. 8.

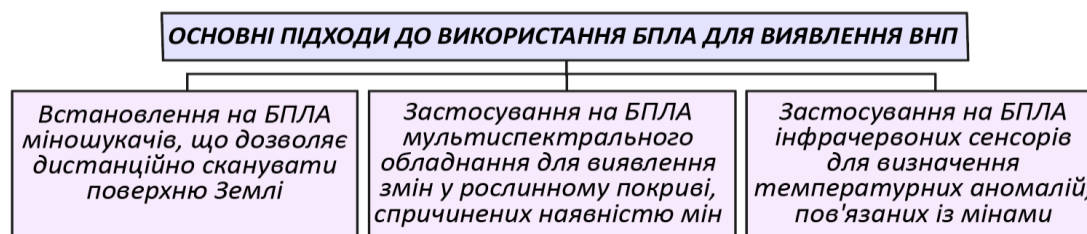


Рис. 8. Основні підходи до використання БПЛА для виявлення ВНП

Використання штучного інтелекту та геоінформаційних технологій дозволяє створювати карти мінних полів на основі аналізу супутникових знімків та даних від БПЛА. Крім того, перспективним напрямком є розробка автономних систем розмінування, які можуть працювати без безпосередньої участі людей.

При використанні БПЛА для виявлення ВНП керування ним відбувається з безпечної території (рис. 9).



Рис. 9. Проведення обстеження місцевості для виявлення ВНП за допомогою БПЛА

На додаток маршрут польоту обирається таким чином, щоб БПЛА не підлітав ближче заявлених тактико-технічних характеристик до дерев та ліній електропередач, виконував роботи щодо обстеження території в межах визначеної ділянки місцевості.

У разі втрати керування БПЛА і його падіння на небезпечну територію, забороняється йти по нього. Повернути втрачений БПЛА можна за допомогою іншого БПЛА на якому буде закріплено мотузку з гаком. У разі відсутності запасного БПЛА необхідно рухатись до втраченого БПЛА найкоротшим шляхом попередньо очищеним технічними засобами пошуку ВНП.

Залежно від висоти зйомки території розрізняють три основні методи виявлення ВНП: космічна зйомка, повітряна зйомка та зйомка БПЛА. Завдяки автономній роботі та зниженню людського фактора, БПЛА забезпечують ефективне сканування території з мінімальним відсотком помилок. Крім того, вони виступають платформами для збору даних ДЗЗ, що дозволяє отримувати інформацію про певні об'єкти без фізичного контакту.

Поєднання супутникових даних із даними, отриманими з БПЛА, значно покращує розуміння динаміки змін на поверхні Землі. Оскільки кожна з цих технологій має свої особливості, їх інтеграція дозволяє досягати оптимального балансу між розрізненністю, прямою видимістю та співвідношенням сигнал/шум.

Використання БПЛА для розмінування стало можливим завдяки розвитку авіоніки, збільшенню ємності акумуляторів, застосування композитних матеріалів, новітніх навігаційних систем та програмного забезпечення. Розвиток телекомунікаційних технологій, зокрема 5G та Інтернету речей (IoT), відіграє ключову роль у забезпеченні повітряного зв'язку БПЛА, розширенні мережевого покриття та підвищенні обчислювальних можливостей.

БПЛА можуть бути оснащені різноманітними датчиками, наприклад, камерами високої роздільної здатності, LiDARами, GNSS та інерціальними вимірювальними пристроями. Для аналізу досліджуваної території застосовуються мультиспектральні, гіперспектральні, теплові інфрачервоні камери та радіолокаційні системи. Камери високої розрізненості дозволяють визначати розташування мін завдяки методам прямого дешифрування. Наприклад, частково закопані міни можна виявити за слідами на полі, сухій траві серед зеленої рослинності, а також за аномальними змінами кольору, текстури та форми поверхні.

Використання стереоскопічних знімків дає можливість створювати тривимірні моделі місцевості, що значно покращує процес аналізу отриманих даних. Крім того, автоматизовані алгоритми та штучний інтелект дозволяють підвищити точність обробки та інтерпретації зображень.

Технології БПЛА розширилися від простих технічних оглядів до детального обстеження полів перед розмінуванням. За останні 5–10 років їх застосування значно зросло, що сприяло розвитку нових методів гуманітарного розмінування.

Сьогодні не існує повністю автоматизованих рішень для виявлення нерозірваних боєприпасів за допомогою тепловізорів, однак застосування штучних нейронних мереж показало високу ефективність ідентифікації ВНП. Іншою перспективною технологією є гіперспектральне зондування, що дозволяє реєструвати спектральні характеристики поверхні Землі. Так ЗС США запустили програму HMDP, спрямовану на виявлення мін за допомогою гіперспектрального аналізу, що дозволило зібрати значний масив даних про спектральні характеристики ВНП.

Перелік наявних технологій дистанційного виявлення ВНП представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Новітні технології, що використовуються в гуманітарному розмінуванні

Методи виявлення мін	Опис	Тип обладнання	Переваги
Інфрачервона (ІЧ) технологія	Використовує різницю в ІЧ-випромінюванні між мінами та навколишнім ґрунтом, особливо помітно на недавно закладених мінах	ІЧ-камери на БПЛА	Чутливість до температурних змін, здатність виявляти міни за допомогою різниці теплових характеристик поверхні.
Гіперспектральні датчики	Використовує камери з можливістю реєстрації електромагнітного спектра в широкому діапазоні	БПЛА з гіперспектральними камерами	Здатність розрізняти матеріали, які не видно в звичайному спектрі, точніші зображення
Георадар (GPR)	Виявляє закопані об'єкти за допомогою рефлектометрії та мікрохвильових хвиль.	Георадар на БПЛА	Розширений діапазон глибини виявлення, не залежить від металу, здатність працювати на різних типах ґрунтів

На рис. 10 як приклад представлено застосування БПЛА з магнітометром в процесі обстеження території та наступної візуалізації й обробки даних просторового вишукування ВНП.



Рис. 9. БПЛА з магнітометром у процесі обстеження території (а) та візуалізації та обробки даних просторового пошуку (б)

Джерело: [9].

На сьогодні, в Україні для виявлення ВНП вже активно розробляються спеціальні магнітометричні датчики для БПЛА, які працюють на висоті 5-10 м, здатні не лише локалізувати ВНП, а й точно ідентифікувати їх контури. Такі системи продемонстрували високу точність у виявленні мін калібру 82 мм та 120 мм, з точністю до сантиметра (за умови відсутності рослинності), що робить їх надзвичайно ефективними в гуманітарному розмінуванні. Крім того, вони мають значну перевагу в порівнянні з іншими методами, оскільки здатні працювати незалежно від часу доби і передавати дані в реальному часі, що дозволяє швидше скласти карти мінних полів.

Виявлення мін за допомогою БПЛА, обладнаного магнітометром під час польових випробувань (а) та отриманої карти мінного поля з ідентифікованими ВНП та мінами поблизу (б) представлено на рис. 11.

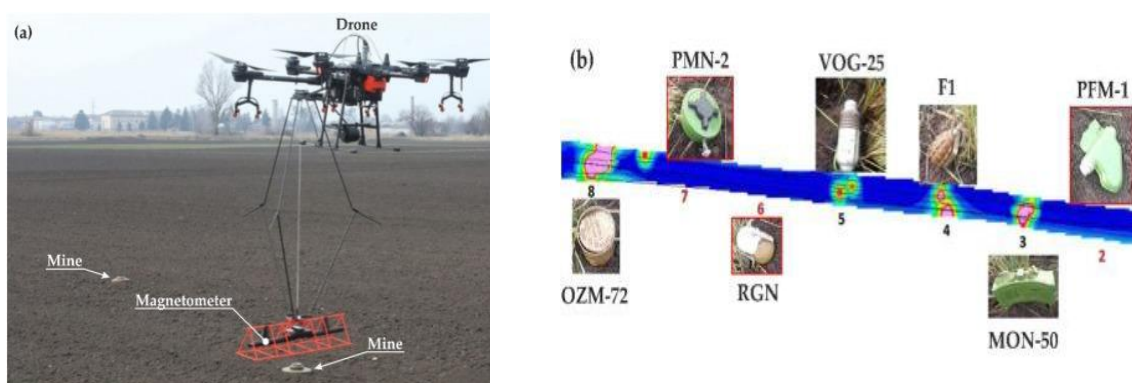


Рис. 11. Виявлення мін за допомогою безпілотного літального апарату (БПЛА), обладнаного магнітометром, під час польових випробувань (а) та отриманої карти мінного поля з ідентифікованими вибухонебезпечними об'єктами та мінами поблизу (б)

Джерело: [10].

У рамках співпраці з польським благодійним фондом «Поступ», розроблено магнітометричну систему, суміщену з БПЛА. Ця система дозволяє виявляти міни на глибині до 50-60 см, що є корисним для виявлення протитанкових мін. Однак система не завжди здатна виявити міни з невеликою кількістю металу, зокрема, ПФМ-1 та ПФМ-2.

Прогресивним досягненням на сьогодні є спільний проєкт канадської компанії DraganFly та українського фонду «Жовто-Блакитні», який передбачає використання БПЛА, оснащених дистанційними датчиками для виявлення мін на глибині до 3 м. Система використовує штучний інтелект для адаптації зібраних даних і формує тривимірні карти аномалій, що дозволяють визначити наявність мін на основі форми, розміру та матеріалу (рис. 12).

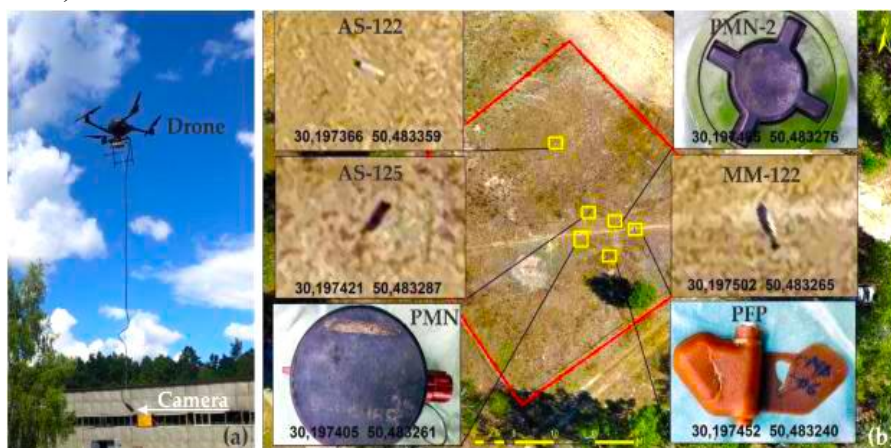


Рис. 12. Виявлення мін за допомогою безпілотного літального апарату (БПЛА), обладнаного магнітометром, у процесі обстеження території (а) та за результатами ідентифікації мінно-вибухонебезпечних предметів (б) на обстежуваній території Джерело: [11].

У результаті ефективність такої системи наближається до 100 %, а процес збору даних займає близько 1 години на 1 га.

Окремо варто відзначити розробки Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, який працює над вдосконаленням технології дистанційного виявлення мін за допомогою багатоспектральної зйомки. У результаті проведених випробувань, методика отримала високу точність у виявленні мін і вибухонебезпечних предметів. Система, що поєднує мультиспектральну та інфрачервону камери, забезпечує точність виявлення понад 90 % [12].

Використання БПЛА та результатів аналізу супутникових знімків під час обстеження забруднених ВВП унормовано на рівні державного стандарту (ДСТУ 8820-5:2924 «Протимінна діяльність. Процеси управління. Частина 5. Процеси вивільнення територій «ленд-реліз»).

Одним із перспективних напрямків виявлення ВВП є розробка роботів-саперів, що можуть використовуватися разом з БПЛА для покращення ефективності пошуку та знешкодження мін. Такі роботи можуть працювати в умовах складного рельєфу, а також на великих площах.

Підсумовуючи наведене, можна стверджувати, що Україна активно розвиває технології виявлення мін за допомогою БПЛА, і вже на сьогодні ці технології демонструють високу ефективність, зокрема, в умовах постконфліктних територій. Використання БПЛА в гуманітарному розмінуванні має великий потенціал для зменшення ризиків та прискорення процесу очищення територій від вибухонебезпечних предметів.

Розробка картосхем замінованих територій України. На підставі даних протимінної діяльності ДСНС було створено карту замінованих територій (рис. 13), на якій відображені місця, де вже було виявлено або теоретично знаходяться вибухонебезпечні предмети.

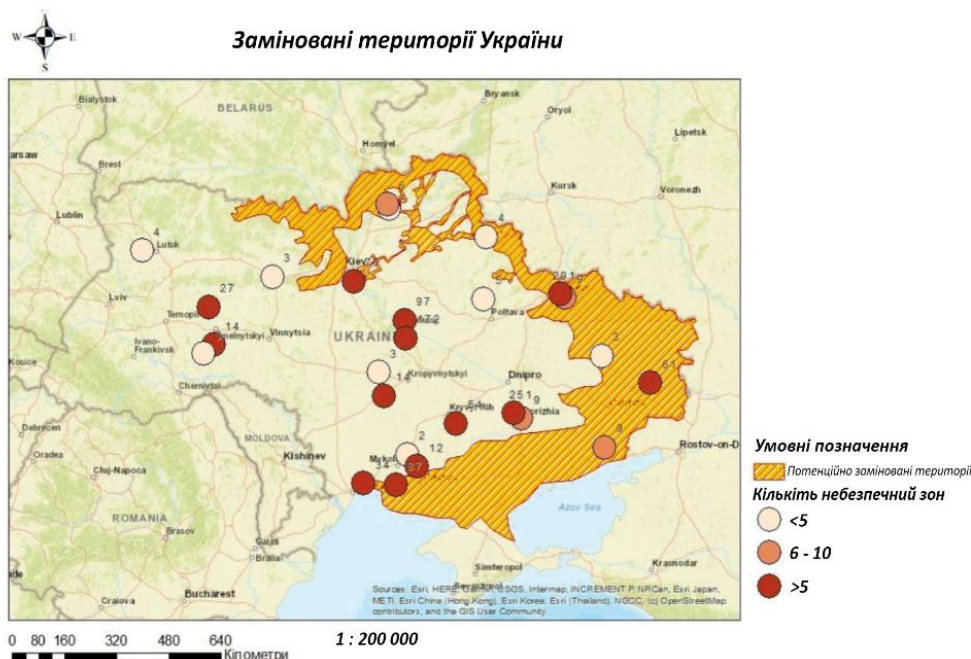


Рис. 13. Картосхема замінованих територій України.

Джерело: розроблено авторами на основі карти Open Street Map.

На карті вказано ступінь загрози кожного з регіонів. Найбільш забруднені області знаходяться безпосередньо в зоні бойових дій та в районах деокупованих територій: Київська, Чернігівська, Сумська, Харківська, Луганська, Донецька, Запорізька, Херсонська та Миколаївська області.

Карта замінованих територій України є важливим інструментом для аналізу ризиків та розробки стратегій з розмінування. Її створення базується на комплексному використанні геодезичних даних, супутникових знімків та інших технологій для точного визначення місцезнаходження замінованих об'єктів.

Слід зауважити, що замінованими територіями наразі можуть бути не тільки зони безпосередніх бойових дій, а й ліси та парки, поля й лісосмуги, зони інфраструктури, території біля мостів та переправ, будь-які водойми, зокрема ставки, річки та криниці, залишені бойові позиції, траншеї, контрольно-пропускні пункти та блокпости, військові та стратегічні об'єкти, знищені транспортні засоби та покинуті будівлі. Особливу небезпеку становлять так звані мініпастки, що їх встановлюють окупанти у будівлях при відступі чи зміні позицій. Трапляється, що заміновані таким чином об'єкти легше підірвати, ніж розмінувати.

Мінний терор – це форма російського терору, якій Україна буде змушена протидіяти продовж багатьох років. Загарбники свідомо намагаються залишити після себе якнайбільше смертельних пасток. Це, зокрема, і закопані «фугаси», і розтяжки, і заміновані житлові об'єкти, і транспорт [13].

На сьогодні в Україні потенційно забруднена мінами територія складає близько 139 000 км². Через заміновані поля економіка зазнає 11,2 млрд дол. США щорічних збитків [7].

Однією з ключових галузей національної економіки України є сільське господарство. Разом з переробною промисловістю воно забезпечує третину ВВП. При цьому на землі сільськогосподарського призначення України припадало 41,3 млн га – 68,5 % від загальної площі України. З цих сільськогосподарських угідь 32,7 млн га були орними землями (рілля).

Після початку повномасштабної війни все змінилося. Російська агресія завдала нищівного удару по українській сільськогосподарській галузі, що має глобальні наслідки. До війни Україна входила до трійки лідерів світового експорту усіх зернових культур і забезпечувала продовольством майже 400 млн людей у всьому світі. Блокада українських портів, руйнування сільськогосподарської інфраструктури та техніки, а також заміновані поля, які неможливо обробляти, призвели до продовольчої кризи на глобальному рівні та сприяли зростанню цін на продовольство.

Згідно з останніми розрахунками Центру досліджень продовольства та землекористування Київської школи економіки (KSE Агроцентр), проведеними спільно зі Світовим банком, український аграрний сектор зазнав понад 80 млрд дол. США прямих збитків та втрат унаслідок повномасштабного вторгнення.

Мінна загроза паралізувала роботу на великій кількості сільськогосподарських угідь України – близько 2 млн га залишаються незасіяними. Це призводить до колосальних економічних втрат: недоотримані доходи аграріїв, зменшення експорту сільгосппродукції, несплачені податки та втрата робочих місць в агросекторі. За оцінками експертів, українська економіка щороку втрачає 800 млн дол. США через неможливість використовувати ці землі [14].

Опис об'єкта дослідження. Для дослідження процесу виявлення ВМП і побудови карт забруднення ВМП було обрано територію Петропавлівської ОТГ Куп'янського району Харківської області (рис. 14).

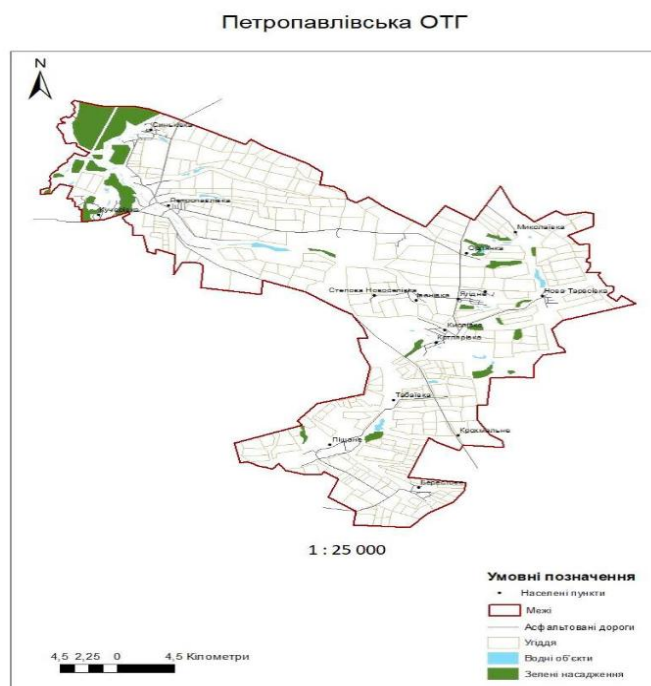


Рис. 14. Оцифрована територія Петропавлівської ОТГ

Джерело: розроблено авторами.

Вибір зумовлений тим, що Харківщина – це край, що чи не найбільше постраждав від російської окупації. І наразі продовжує страждати від її наслідків. Величезна територія краю нашіпигована мінами, у тому числі і протипіхотними, які заборонені міжнародними угодами.

Петропавлівська об'єднана територіальна громада розташована в Куп'янському районі Харківської області, а її адміністративним центром є село Петропавлівка. Громада має багату історію та унікальні природні особливості.

Петропавлівська сільська об'єднана територіальна громада була утворена 12 червня 2020 року шляхом об'єднання Петропавлівської, Кислівської, Піщанської та Ягідненської сільських рад. За результатами виборів, що відбулися 25 жовтня 2020 року, була сформована нова місцева влада громади.

Загальна площа громади складає 338,3 км², а чисельність населення станом на 2020 рік становила 4905 осіб. До складу громади входять 16 сіл: Петропавлівка, Берестове, Затишне, Іванівка, Кислівка, Котлярівка, Крохмальне, Кучерівка, Миколаївка, Нова Тарасівка, Орлянка, Піщане, Синьківка, Степова Новоселівка, Табаївка та Ягідне. Громада має значний природний потенціал. Її територією протікає річка Оскіл, що є важливим водним ресурсом для регіону.

Після деокупації Куп'янського району гуманітарне розмінування стало одним із першочергових завдань для спеціалістів вибухотехнічних підрозділів. За перші чотири місяці після звільнення території сапери повністю обстежили та очистили центральну частину Куп'янська. Основна увага була зосереджена на розмінуванні вулиць, об'єктів цивільної інфраструктури, газогонів та ліній електропередач, адже саме ці елементи мають критичне значення для життя та безпеки місцевих жителів. Усі знайдені вибухонебезпечні предмети або вивозили для подальшої утилізації, або знешкоджували безпосередньо на місці.

На території Харківської області з 23 січня піротехнічними підрозділами ДСНС було вилучено та знешкоджено 500 ВНП, і ця цифра продовжує зростати.

Процес гуманітарного розмінування в Куп'янському районі триває в умовах постійної небезпеки. Незважаючи на труднощі, вибухотехніки продовжують свою важливу роботу, рятуючи життя людей і відновлюючи безпечні умови для проживання та господарської діяльності на звільнених територіях.

Дуже багато жителів району загинуло та постраждало внаслідок вибухонебезпечних предметів, найбільше випадків виникало під час виконання сільськогосподарських робіт на полях.

Сільське господарство Харківщини стикається з серйозними викликами через мінну небезпеку, яка залишається актуальною навіть після деокупації територій. Незважаючи на активну роботу Державної служби з надзвичайних ситуацій, значні площі сільськогосподарських угідь залишаються непридатними для обробітки через загрозу вибухів. Особливо складна ситуація на півночі району, де триває процес розмінування, проте є ділянки, які поки що неможливо очистити через високу небезпеку. Крім мін, значна проблема – залишки від ракет та снарядів, що знаходяться на полях, які вже заросли бур'янами.

Через брак спеціалізованої техніки та кваліфікованих фахівців аграрії змушені шукати альтернативні способи розмінування, наприклад, старі трактори ХТЗ переобладнують у саморобні машини для очищення полів. Однак такі методи несуть ризики, оскільки техніка може вийти з ладу після наїзду на вибухонебезпечний предмет. Діяльність аграріїв значно ускладнюються відсутністю точних карт розмінування, адже вони є закритою інформацією у зв'язку з воєнним станом. Через це деякі господарства вдаються до послуг некваліфікованих спеціалістів, що підвищує ризики для працівників і техніки. Водночас ДСНС продовжує свою роботу, і в громадах Ізюмського району розмінування здійснюється спеціалізованою технікою з відповідними перевірками. Однак залишається багато ділянок, які поки що неможливо очистити.

Способи виявлення вибухонебезпечних предметів за допомогою БПЛА. Один із ключових аспектів дослідження полягає в аналізі просторового розташування вирв (рис. 15).



Рис. 15. Ідентифіковані вирви від мін. Розроблено на основі базової карти ArcGIS

Висока щільність таких об'єктів на обмеженій площі може свідчити про інтенсивне мінування або артилерійські обстріли. Використовуючи інструменти ArcGIS та інші геоінформаційні програми, можна визначати кластери вирв, які можуть вказувати на мінні поля, оцінювати ймовірність наявності нездетонованих боєприпасів на основі нерівномірного розподілу вибухів та будувати карти ризику для подальшого розмінування територій.

Даний метод використовується у військовій сфері для оцінки небезпеки на деокупованих територіях, у сільському господарстві для мінімізації ризиків під час обробки ґрунту, а також у гуманітарних місіях з розмінування. Використання БПЛА значно прискорює процес обстеження територій та зменшує ризики для саперів. Саме таким чином було розроблено картосхему Петропавлівської ОТГ із позначенням вирв від мін та небезпечних ділянок – рис. 16.

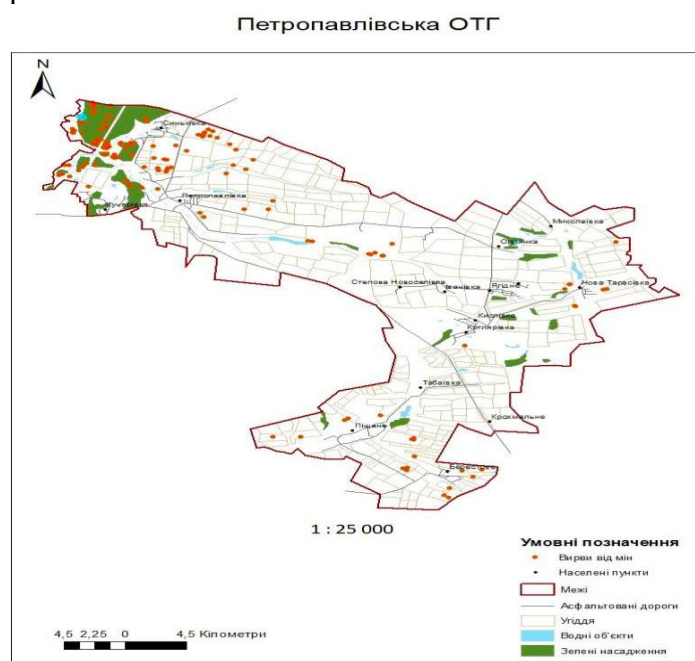


Рис. 16. Ідентифікація небезпечних зон. Власна розробка

БПЛА мають датчики та камери, завдяки яким за 1 годину він спроможний просканувати 1 га території.

Під час дослідження виявлено 144 небезпечні зони.

Наступним кроком було побудовано буферні зони навколо небезпечних зон у радіусі 500 м, оскільки саме така відстань від вибухонебезпечних предметів є безпечною для населення (рис. 17 та рис. 18).

Безпечна відстань у 500 метрів від ВНП визначається виходячи з радіуса ураження вибухової хвилі, розльоту осколків та можливості вторинних детонацій.



Рис. 17. Буферна зона 500 м навколо вибухонебезпечних предметів

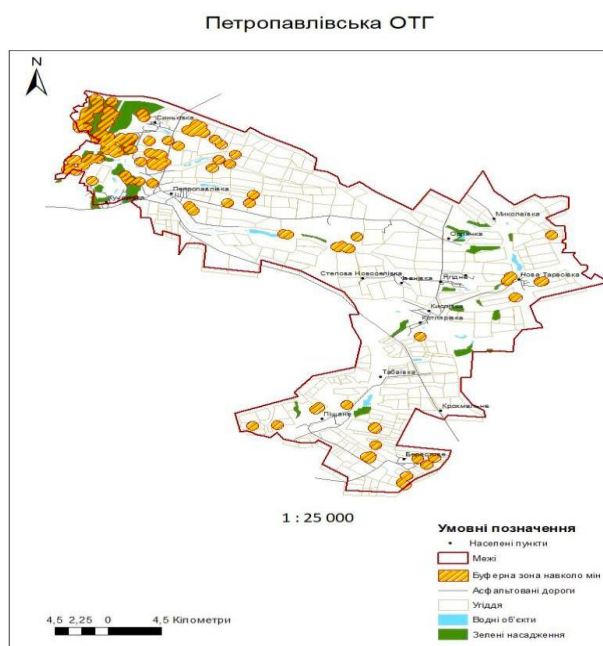


Рис. 18. Буферна зона 500 м навколо вибухонебезпечних предметів

Вибухові пристрої можуть мати різну потужність, але така відстань мінімізує ризик отримання смертельних поранень або пошкодження техніки. Крім того, вона дає змогу саперам безпечно проводити знешкодження або контрольовані підриви небезпечних предметів без загрози для цивільного населення.

ВНП становлять серйозну загрозу в різних ландшафтних умовах. На сільськогосподарських угіддях вони можуть детонувати під час польових робіт, завдаючи шкоди техніці, врожаю та, найголовніше, життю аграріїв. На водних об'єктах такі предмети можуть залишатися невидимими, створюючи небезпеку для рибалок, плавців та судноплавства. У лісах

міни та нерозірвані боєприпаси ускладнюють доступ до ресурсів, становлять загрозу для тварин і людей, які збирають гриби чи займаються лісовими роботами. На дорогах вони можуть призвести до трагічних наслідків для автомобілістів, автобусних перевезень і рятувальних служб, ускладнюючи логістику та роботу з відновлення інфраструктури.

Далі, за допомогою інструмента вибірки були визначені небезпечні для населення сільськогосподарські угіддя, ділянки автомобільних доріг, ареали зелених насаджень та водних об'єктів, що можуть нести мінну небезпеку (рис. 19).

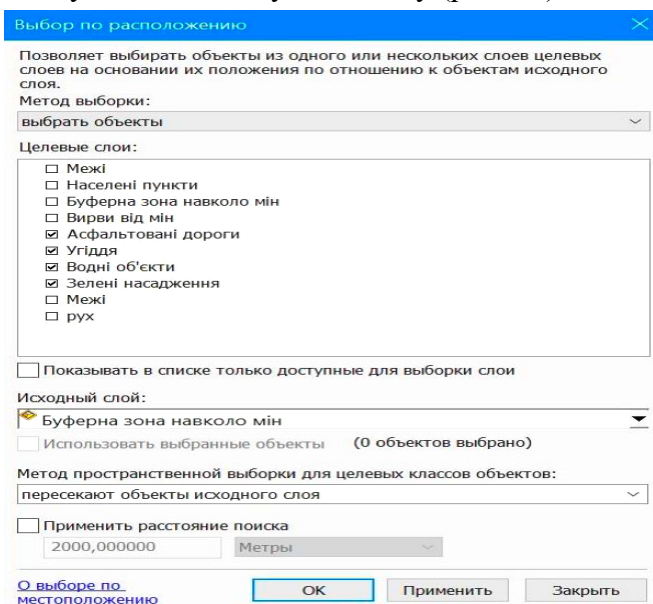


Рис. 19. Інструмент вибірки ArcGIS

Аналізуючи картосхему вибірки небезпечних територій Петропавлівської ОТГ (рис. 19), були визначені небезпечні ділянки, представлені в табл. 2.

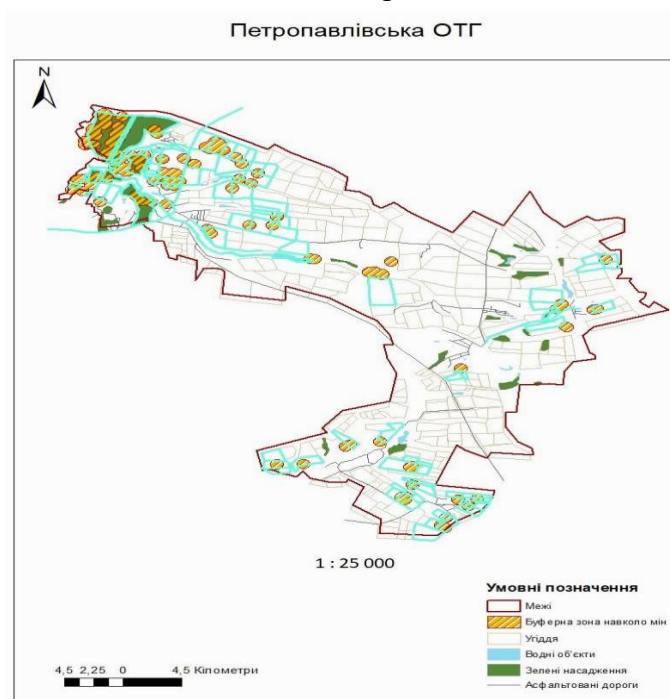


Рис. 19. Виборка небезпечних територій

Джерело: розроблено авторами.

Таблиця 2 – Визначення кількості небезпечних ділянок

Кількість небезпечних ділянок ОТГ	
<i>Сільськогосподарські угіддя</i>	75
<i>Дороги</i>	9
<i>Зелені насадження</i>	9
<i>Водні об'єкти</i>	6

Висновки. Гуманітарне розмінування передбачає комплекс заходів з метою ліквідації небезпек, пов'язаних із вибухонебезпечними предметами, включаючи нетехнічне та технічне обстеження територій, складення карт, виявлення, знешкодження та (або) знищення вибухонебезпечних предметів, маркування, підготовку документації після розмінування, надання громадам інформації щодо протимінної діяльності та передачу очищеної території. Триваючий конфлікт високої інтенсивності зумовлює значну небезпеку та унікальність розмінування території України.

Гуманітарне розмінування в Україні є важливою складовою частиною державної політики у сфері цивільного захисту та національної безпеки. Процес очищення територій від вибухонебезпечних предметів потребує значних зусиль, координації між державними органами та міжнародною співпрацею. Від ефективності розмінування залежить не тільки безпека громадян, але й можливість відновлення економіки та життєдіяльності на деокупованих територіях. На сьогодні гуманітарне розмінування в Україні є не лише питанням національної безпеки, але й важливою частиною міжнародних зобов'язань, що мають сприяти відновленню миру та стабільності в країні.

Практика систематичного ретельного гуманітарного розмінування є необхідною передумовою сталого управління навколишнім природним середовищем у подальшому на пост конфліктних територіях, адже дозволить запобігти та мінімізувати деградацію ґрунтів, земельних ресурсів, біорізноманіття, забруднення цих компонентів, викиди забруднюючих речовин, які можуть навіть сприяти зміні клімату, а також сприяти збереженню природних ресурсів.

Існуюча практика використання магнітометрів разом з БПЛА для виявлення ВВП свідчить, що магнітометри не можуть виявити міни, зроблені з пластику, кераміки та інших неметалевих матеріалів. Проте, застосування технологій штучного інтелекту дозволяє позбутися цієї вади. А машинне навчання може взагалі покращити пошук мін та подолання перепон у цій роботі.

Незважаючи на те, що БПЛА не спроможні самостійно викопувати міни, однак просторові дані, отримані за їх допомогою та наступна побудова карт дозволяє суттєво прискорити роботу з гуманітарного розмінування.

Список використаних джерел

1. Коваль М. С. та ін. (2023). *Дії підрозділів ДСНС України в умовах воєнного стану*. ЛДУ БЖД.
2. Перга Т. Ю. (2022). Екологічні наслідки війни Росії проти України. <https://ivinas.gov.ua/viina-rf-proti-ukrainy/ekolohichni-naslidky-viiny-rosii-proti-ukrainy.html>.
3. Безпека і здоров'я на роботі у воєнний та післявоєнний час. Досвід України в умовах російської агресії (2023). https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@europe/@ro-geneva/@sro-budapest/documents/genericdocument/wcms_856143.pdf.
4. Розмінування українських територій. (б.д.). <https://zn.ua/ukr/war/rozminuvannja-ukrajinskikh-teritorij-jak-svit-dopomahaje-ukrajini.html>.
5. Humanitarian demining. (б.д.). <https://ua-energy.org/en/posts/28-01-2025-5aac62ba-1c5b-4567-8125-c00639a1ca71>.

6. Національна стратегія протимінної діяльності на період до 2033 року. (2024). <https://demine.gov.ua/static-objects/demine/uploads/public/66c73d9d9/66c73d9d9494f494441892.pdf>.
7. Міністерство оборони України. (2024). *Площа територій України, потенційно забруднених мінами та ВВП, зменшилась на 17000 км² у 2024 році*. <https://mod.gov.ua/news/ploshha-teritorij-ukrayini-potenczijno-zabrudnenih-minami-ta-vibuhonebezpechnimi-predmetami-zmenshilas-na-17-000-km-u-2024-rocz>.
8. Ментус, І.Е., Ясько, В.А., Саприкін, Є.Ю. (2024). Методи виявлення мін для гуманітарного розмінування: огляд. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 11(3), 22–28.
9. *Український дрон*. (б.д.). <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2851546-ukrainskij-dron-zdatnij-viavlati-mini-z-tocnistu-do-santimetra-armiainform.html>.
10. Моїсєєв, В. (2023). До 30% території України забруднено вибухонебезпечними предметами: що допоможе їх прибрати. *Економіка України*.
11. Taranova, E. (2022, 22 червня). Як за допомогою технологій на основі штучного інтелекту Україна планує розмінувати території. *Delo.ua*. <https://delo.ua/ru/technologies/kak-s-pomoshhyu-technologii-na-baze-iskusstvennogo-intellekta-ukraina-planiruet-razminirovat-territorii-399802>.
12. Попов, М.О., Станкевич, С.А., Мосов, С.П., Титаренко, О.В., Дугін, С.С., Голубов, С.І., & Андреев, А.А. (2021). Технологія автоматизованого виявлення мін за результатами комплексування багатоспектральної та інфрачервоної зйомки з безпілотних літальних апаратів. У *Аерокосмічні технології в Україні: проблеми та перспективи* : матеріали IV науково-практичної конференції (9–10 вересня 2021 р.) (с. 13–15). Національний центр управління та випробувань космічних засобів.
13. *Сервіс протимінної діяльності ДСНС*. (2023). <https://mine.dsns.gov.ua>.
14. *Скільки Україна втрачає на замінованих полях?* (2024). <https://epravda.com.ua/columns/2024/09/19/719540>.

References

1. Koval, M.S. et al. (2023). *Dii pidrozdiliv DSNS Ukrainy v umovakh voiennoho stanu [Actions of the 1 units of Ukraine under martial law]*. Lviv LDU BZhD.
2. Perha, T.Iu. (2022). *Ekolohichni naslidky viiny Rosii proty Ukrainy [Environmental consequences of Russia's war against Ukraine]*. <https://ivinas.gov.ua/viina-rf-proti-ukrainy/ekolohichni-naslidky-viiny-rosii-proti-ukrainy.html>.
3. *Bezpeka i zdorovia na roboti u voiennyi ta pisliavoiennyi chas. Dosvid Ukrainy v umovakh rosiiskoi ahresii [Occupational safety and health in wartime and post-war times. Experience of Ukraine in the conditions of Russian aggression]*. (2023). https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@europe/@ro-geneva/@sro-budapest/documents/genericdocument/wcms_856143.pdf.
4. Moskalenko, Y. (2023). *Rozminuvannia ukrainskyi terytorii [Demining of Ukrainian territories]*. <https://zn.ua/ukr/war/rozminuvannja-ukrajinskikh-teritorij-jak-svit-dopomahaje-ukrajini.html>.
5. *Humanitarian demining*. (n.d.). <https://ua-energy.org/en/posts/28-01-2025-5aac62ba-1c5b-4567-8125-c00639a1ca71>.
6. *Natsionalna stratehiia protyminnoi diialnosti na period do 2033 roku [National mine action strategy for the period up to 2033]*. (2024). <https://demine.gov.ua/static-objects/demine/uploads/public/66c73d9d9/66c73d9d9494f494441892.pdf>.
7. *Ploshcha terytorii Ukrainy, potentsiino zabrudnenykh minamy ta VNP, zmenshylas na 17000 km² u 2024 rotsi [The area of Ukrainian territory potentially contaminated with mines and UXO decreased by 17,000 km² in 2024]*. (n.d.). <https://mod.gov.ua/news/ploshha-teritorij-ukrayini-potenczijno-zabrudnenih-minami-ta-vibuhonebezpechnimi-predmetami-zmenshilas-na-17-000-km-u-2024-rocz>.
8. Mentus, I.E., Yasko, V.A., & Saprykin, Ye.Iu. (2024). Metody vyivlennia min dlia humanitar-noho rozminuvannia: ohliad [Methods of mine detection for humanitarian demining: a review]. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia zemli – Ukrainian journal of remote sensing*, 11(3), 22–28.
9. *Ukrinform*. (2020). *Ukrainskyi dron [Ukrainian drone]*. <https://www.ukrinform.ua/rubric-technology/2851546-ukrainskij-dron-zdatnij-viavlati-mini-z-tocnistu-do-santimetra-armiainform.html>.
10. Moiseev, V. (2023). Up to 30% of Ukraine's territory is contaminated with explosive ordnance: what will help clean it up. *Economy of Ukraine*.

11. Taranova, E. (2022, 22 June). Yak za dopomohoiu tekhnolohii na osnovi shtuchnoho intelektu Ukraina planuie rozminuvaty terytorii [How Ukraine plans to demine territories using artificial intelligence technologies]. *Delo.ua*. <https://delo.ua/ru/technologies/kak-s-pomoshhyu-texnologii-na-baze-is-kusstvennogo-intellekta-ukraina-planiruet-razminirot-territorii-399802>.

12. Popov, M.O. (2022). *Tekhnolohiia dystantsiinoho vyivlennia min na osnovi analizu materialiv ziomky z bezpilotnykh litalnykh aparativ: stan i perspektyvy. Stenohrama dopovidi na zasidanni Prezydii HAH Ukrainy 6 kvitnia 2022 roku [Technology of remote mine detection based on the analysis of UAV imagery: state and prospects. Transcript of the report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine on April 6, 2022]*.

13. Servis protymynnoi diialnosti DSNS [Mine action service of the SES]. (2023). <https://mine.dsns.gov.ua>.

14. Skilky Ukraina vtrachaie na zaminovanykh poliakh? [How much does Ukraine lose on mined fields?]. (2024). *Ekonomichna pravda – Economic truth*. <https://epravda.com.ua/columns/2024/09/19/719540>.

Отримано 20.03.2025

UDC 351.86

Vitalii Zatserkovnyi¹, Igor Nikoliuk²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University of Kyiv, SRI "Institute of Geology" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com **ORCID** <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125> **ScopusID:** 57200165109

²1st year postgraduate student, specialty 193 – Geodesy and land management

Taras Shevchenko National University of Kyiv, SRI "Institute of Geology" (Kyiv, Ukraine)

E-mail: nikoliuk.igor@gmail.com **ORCID** <https://orcid.org/0009-0006-0750-2603> **Researcher ID:** rid105343

USING UAVS TO DETECT EXPLOSIVES AND CREATE MAPS IN HUMANITARIAN DEMINING

Russia's full-scale invasion has led to unprecedented contamination of Ukrainian territory with unexploded ordnance (UXO), making it one of the most mine-affected countries globally (approx. 144,000 sq km potentially hazardous). This poses a long-term lethal threat to civilians, hinders socio-economic recovery (especially in the agricultural sector), damages infrastructure, and harms the environment.

Humanitarian demining is identified as a critically important process to eliminate these threats. It includes non-technical and technical surveys, mapping, marking, neutralization of UXO, and risk education for the population. The article emphasizes relevance of applying modern technologies to optimize this complex and dangerous process.

Unmanned aerial vehicles (UAVs) play the key role in modernizing demining efforts. They enable remote surveys of large areas with minimal risk to personnel. The article details methods of using UAVs: equipping them with magnetometers to detect metallic objects, infrared (thermal) sensors to capture temperature anomalies from UXO, and multispectral/hyperspectral cameras to analyze changes in vegetation or detect specific materials. Ground-penetrating radar (GPR) and LiDAR are also mentioned.

A crucial aspect is the integration of UAV data with geographic information systems (GIS) and artificial intelligence (AI) algorithms. This allows for the creation of detailed orthophotomaps, digital terrain models, automated image analysis, identification of potential threats, and construction of accurate risk maps. The study of the Petropavlivka OTHG territory is presented as an example, where UAVs and ArcGIS were used to identify explosion craters, define hazardous zones, and create 500-meter safety buffer zones.

Despite certain challenges (e.g., detecting non-metallic mines), UAV technologies demonstrate high efficiency and hold immense potential for significantly accelerating the process of clearing Ukrainian land, saving lives, and facilitating post-war recovery.

Keywords: *unmanned aerial vehicles (UAVs); unexploded ordnance (UXO); humanitarian demining; UXO detection; geographic information systems (GIS); sensors; remote sensing.*

Fig.: 19. Table: 2. References.: 25.