

ГЕОПРОСТОРОВА ПІДТРИМКА



Стаття та будь-який пов'язаний з нею опублікований матеріал поширюється за ліцензією Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).
The article and any related published material are licensed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

УДК 528.8:629.735]:623.674

DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2026.66.120-131>

Тарас ГУЦУЛ, канд. техн. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0002-7192-3289

e-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ДАТЧИКІВ БПЛА ДЛЯ ЗБИРАННЯ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ У ЗАДАЧАХ ПРОТИМІННОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Вступ. Мінне забруднення територій – загроза для безпеки населення та сталого розвитку. Традиційні методи розмінування залишаються небезпечними, ресурсоємними й повільними, що потребує впровадження інноваційних технологій. Одним із перспективних напрямів є використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як платформ для збирання геопросторових даних із застосуванням різних типів датчиків. Метою дослідження є аналіз можливостей використання датчиків БПЛА у протимінній діяльності (ПМД) та оцінювання їх потенціалу для підвищення ефективності виявлення мін і вибухонебезпечних предметів (ВНП).

Методи. Дослідження базується на теоретичному аналізі сучасних наукових публікацій, нормативних документів і технічних рішень у сфері ПМД. Застосовано методи систематизації та узагальнення для класифікації датчиків за принципом дії, функціональним призначенням і можливостями використання на платформах БПЛА. Проведено порівняльний аналіз їхніх переваг, обмежень і сфер застосування. Проаналізовано класифікацію датчиків для гуманітарного розмінування, обґрунтовано й доповнено її з урахуванням сучасних рішень.

Результати. Проаналізовано чотири основні групи сенсорів: механічні, електромагнітні, електрооптичні й детектори вибухових речовин. Сенсори генерують первинні вимірювання параметрів, які в процесі геоприв'язки (із використанням координатно-часових міток, навігаційних і орієнтаційних даних) трансформуються у геопросторові дані відповідного типу. Інтеграція цих даних до геоінформаційних систем (ГІС) забезпечує формування комплексних моделей середовища (растрових, векторних і тривимірних), що підвищує достовірність інтерпретації. Установлено, що електромагнітні сенсори (зокрема георадари й магнітометри) ефективні для виявлення підповерхневих об'єктів, але залежать від властивостей ґрунту й умов зйомки. Електрооптичні сенсори забезпечують високодеталізовану інформацію про поверхню, однак обмежені можливістю проникнення в ґрунт і використовуються переважно для виявлення непрямих ознак. Детектори вибухових речовин забезпечують пряме підтвердження наявності ВНП, але їхня інтеграція з БПЛА є технічно складною. Виявлено, що найбільш ефективним підходом є мультисенсорна інтеграція, яка дає змогу підвищити достовірність результатів. Також встановлено обмеженість існуючих класифікацій сенсорів, які не враховують сучасні технології БПЛА та методи злиття даних.

Висновки. Застосування БПЛА із системами датчиків – перспективний напрям розвитку гуманітарного розмінування, що дає змогу підвищити безпеку й ефективність ПМД. Жоден окремий датчик чи сенсор не забезпечує універсального рішення, тому ключовим підходом є використання мультисенсорних систем. Подальші дослідження мають спрямовуватися на їхню інтеграцію, розвиток алгоритмів обробки даних і вдосконалення класифікацій з урахуванням сучасних технологій.

Ключові слова: геоінформаційні технології, гуманітарне розмінування, глобальні навігаційні супутникові системи, детекція вибухонебезпечних об'єктів, дистанційне зондування Землі, мінна небезпека, сенсорні системи.

Вступ

Мінне забруднення територій є однією з найсерйозніших довгострокових загроз безпеці населення та сталому розвитку постконфліктних регіонів. За оцінюваннями Служби ООН з питань протимінної діяльності та Женевського міжнародного центру гуманітарного розмінування (ЖМЦГР), наявність мін і вибухонебезпечних предметів (ВНП) призводить до людських втрат, обмежує використання земель, ускладнює відновлення інфраструктури й економічну діяльність. Мінна загроза має системний і багатовимірний зв'язок із Цілями сталого розвитку ООН (ЦСР), оскільки безпосередньо впливає на здатність держав забезпечувати безпеку, розвиток і добробут населення. Очищення територій прямо чи опосередковано стосується досягнення 14 (ЦСР: 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17) із поміж 17 ЦСР. Наявність замінованих територій негативно впливає на гуманітарну, соціальну, економічну й екологічну сфери, що робить протимінну діяльність (ПМД) важливим складником глобальної політики сталого розвитку.

ПМД характеризується високим рівнем небезпеки та значними ризиками для персоналу, які залежать від типу місцевості, інтенсивності бойових дій і подальшого використання території. Основна небезпека такої загрози полягає у невидимості об'єктів, непередбачуваності наслідків, невибірковості дії. 10,1 % випадків вибухових інцидентів пов'язані з професіоналами (саперами, військовими). Із 100 випадків 24,7 для учасників подій стають смертельними, а решта – травматичними (Pizzino et al., 2026). На кожні 5 тис. знешкоджених мін припадає один загиблий і двоє травмованих саперів (Горбулін, 2022). Це означає, що робота саперів, навіть із суворими протоколами безпеки, більше ризикована, ніж у середньому для цивільних осіб у вибухових інцидентах.

Ручне розмінування досі є процесом, який потребує найбільшої кількості персоналу, значних ресурсів і знешкоджує найбільше мін. Воно сприймається як повільне, повторюване, потенційно небезпечне й надто дороге, а думки щодо оптимальних практик проведення операцій із розмінування дуже різняться. Унаслідок цього жодна держава не здатна повною мірою забезпечити очищення

забруднених територій без залучення міжнародної допомоги, а процес їх соціально-економічного відновлення суттєво ускладнюється та подовжується. У зв'язку із цим зростає потреба в сучасних безпечних технологічних рішеннях із виявлення небезпечних територій, зокрема із застосуванням геопросторових даних і дистанційних методів.

Мінне забруднення має чітко виражений просторовий (територіальний) характер, а тому ідеї використання геоінформаційних засобів (ГІС) та обладнання глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) для обробки й аналізу просторової інформації почали активно розвиватися ще на початку 2000-х рр. Методи ГІС використовуються для інтеграції даних з історії бойових дій (зміни оборонних ліній поля бою в роки конфлікту) з метою їх синтезу та інтерпретації. Зростає кількість випробувань методів ГІС у поєднанні з геостатистичними методами для моделювання мінних ризиків із метою доповнення даних про діяльність із розмінування. ГІС інтегруються в гуманітарне розмінування з різними цілями (Гуцул, 2025а). Ефективне застосування ГІС у ПМД потребує використання актуальних і достовірних даних, що відображають сучасний стан території та забезпечують можливість просторового аналізу мінної небезпеки (Гуцул, 2026b). Серед джерел геопросторових даних, що використовуються у сучасних геоінформаційних дослідженнях, виділяють наземні геодезичні вимірювання, картографічні матеріали, геоінформаційні бази даних і дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). У класифікації джерел геопросторових даних (Гуцул, 2026с), останні займають особливе місце завдяки можливості оперативного отримання просторової інформації на значних територіях і регулярного моніторингу стану поверхні.

Хоча ефективне виявлення наземних мін із повітря наразі залишається практично неможливим (за винятком мін, розташованих на поверхні, а також нерозірваних боєприпасів), дані ДЗЗ можуть використовуватися як індикатор потенційної наявності або відсутності мінного поля за прямими дешифрувальними ознаками (Burrough, 1998). Просторова роздільна здатність сучасних космічних знімків суттєво залежить від типу супутника та характеристик сенсора. Найвища просторова роздільна здатність комерційних супутникових систем становить приблизно 30–34 см/піксель, що є недостатнім для безпосередньої ідентифікації більшості протипіхотних мін на поверхні. Навіть 10 см/піксель не гарантує виявлення більшості протипіхотних мін, оскільки їхній діаметр близько 6–12 см, а для надійної ідентифікації об'єкта потрібно 3–5 пікселів на об'єкт. Крім того, вертикальна роздільна здатність (вертикальна точність) ДЗЗ, здійснюваною із супутників, зазвичай перебуває в межах 1–10 м, що також не дає змогу виявляти міни, закопані у ґрунті. Разом із тим зазначені обмеження просторової та вертикальної роздільної здатності супутникових даних обумовлюють необхідність використання альтернативних засобів збирання просторової інформації. Одним із найбільш перспективних рішень у цьому контексті є застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА), спроможних забезпечити отримання знімків із сантиметровою просторовою роздільною здатністю та високою точністю відтворення мікрорельєфу поверхні (Ferrer-González et al., 2020).

У 1970–1980-х рр. розвиток електроніки, ГНСС та автоматичних систем управління дав змогу створювати БПЛА для військових цілей спостереження та збирання даних на великих територіях. З 2000-х рр. БПЛА масово використовуються як у військовій, так і в цивільній сферах завдяки зменшенню вартості, компактності й доступ-

ності високоточних датчиків. БПЛА характеризуються низькою вартістю, безпечністю експлуатації, високою адаптивністю, а тому мають значний потенціал застосування в гуманітарній діяльності, зокрема ПМД, оскільки дають змогу оперативно отримувати детальні дані про стан територій без ризику для персоналу. Використання БПЛА забезпечує швидке обстеження великих площ, отримання високодеталізованих аерофотознімків, а також інтерпретацію ознак мінного забруднення, таких як порушення ґрунтового покриття, зміна рослинності або сліди вибухів.

Згідно зі стандартами International Mine Action Standards (IMAS 08.10) (United Nations Mine Action Service, 2019a) і стратегією United Nations Mine Action Service (2019–2023) (United Nations Mine Action Service, 2019b), сучасні операції з гуманітарного розмінування передбачають використання БПЛА для збирання геопросторових даних, дистанційного обстеження територій і підвищення безпеки персоналу під час планування та проведення протимінних заходів. ЖМЦГР підкреслює, що впровадження БПЛА в ПМД наразі не замінює традиційні методи розмінування, а є додатковим інструментом. Сучасні БПЛА мають гнучку модульну конструкцію, що дає змогу адаптувати їх до виконання конкретних завдань шляхом інтеграції різних типів датчиків і бортового обладнання (Zhang, & Zhu, 2023). Завдяки цьому під специфічні задачі можлива конфігурація індивідуальних платформ БПЛА з відповідним набором датчиків для збирання необхідних геопросторових даних.

Сенсорне сприйняття є ключовою можливістю БПЛА, що дає змогу збирати, обробляти та інтерпретувати інформацію з навколишнього середовища. Ця можливість важлива для виконання БПЛА різних завдань, таких як навігація, картографування, інспекція та моніторинг. Зібрані дані використовуються для створення ортофотопланів, цифрових моделей рельєфу та інших геопросторових рішень, які інтегруються у ГІС і застосовуються для планування операцій гуманітарного розмінування, оцінювання ризиків і визначення пріоритетних ділянок для подальшого обстеження. Однак ці галузі досліджень є складними та проблемними, вимагають інтеграції кількох технологій, включаючи датчики, комп'ютерний зір і штучний інтелект (ШІ). Кінцева мета полягає в розробленні БПЛА, які можуть сприймати й розуміти своє оточення та приймати обґрунтовані рішення на основі цієї інформації. Одним із ключових компонентів сенсорного сприйняття є інтеграція різних датчиків (Telli et al., 2023).

Майбутнє сенсорних матеріалів вивчається багатообіцяючим, оскільки очікується, що постійні дослідження та технологічні досягнення підвищать їхню ефективність, довговічність та енергоефективність. Розробка наноматеріалів та передових методів виготовлення прокладає шлях для високоселективних і чутливих датчиків із розширеними функціональними можливостями.

Мета дослідження – аналіз можливостей використання датчиків БПЛА для збирання геопросторових даних у задачах протимінної діяльності та визначення перспектив їх застосування.

Методи

Дослідження має аналітично-оглядовий характер із використанням системного підходу. Гуманітарне розмінування за своєю суттю є міждисциплінарним. У широкому розумінні метод – це спосіб досягнення визначених результатів у пізнанні та практиці. Гуманітарне розмінування включає різні цілі, зокрема дослідження, картографування та маркування мінних полів, а також їхнє фактичне розмінування. Головна мета гуманітарного

розмінування полягає у плановому очищенні території для можливості повернення цивільних осіб без загрози життю і здоров'ю. Методом теоретичного аналізу опрацьовано сучасні наукові публікації, нормативні документи (зокрема стандарти IMAS) і технічні рішення у сфері гуманітарного розмінування. Виявлено сучасні тенденції та технологічні підходи до використання БПЛА і датчиків у ПМД. Практично всі сучасні методи гуманітарного розмінування ґрунтуються на фізичних принципах (механічні, електромагнітні, хімічні, магнітні, акустичні). Методом порівняльного аналізу проведено оцінювання основних груп датчиків за критеріями ефективності, точності, глибини виявлення, технічної складності інтеграції з БПЛА та придатності до мультисенсорних систем. Обґрунтовано перспективи розвитку мультисенсорних систем і створення структурної моделі датчиків БПЛА для задач ПМД.

Результати

Датчик часто визначається як пристрій, який приймає та реагує на сигнал або подразник. Подразник – це величина, властивість або стан, що визначається та перетворюється на електричний сигнал. Датчик – технічний пристрій, призначений для реєстрації фізичних, хімічних або біологічних параметрів середовища та перетворення їх на сигнал, придатний для подальшого вимірювання, оброблення або передання. Датчик фокусується на функції "давати інформацію", а сенсор (англ. *sensus* – *відчуття*) – на функції "сприймати / відчувати явище". У технічній літературі терміни "датчик" і "сенсор" вважаються тотожними й можуть використовуватися паралельно, залежно від контексту: "датчик" частіше застосовується у національних стандартах та інженерних описах, тоді як "сенсор" – у міжнародній літературі й сучасних сенсорних системах. У нормативних документах України датчик визначається через характеристику його метрологічних параметрів і технічних вимог у відповідних стандартах (напр. ДСТУ 7223:2011, ДСТУ ISO 8042:2008, ДСТУ OIML R 60-1:2019). У багатьох сучасних словниках української мови термін "давач" подається як єдиний можливий відповідник до терміну "датчик".

Перші датчики формувалися поступово разом із розвитком науки й вимірювальної техніки. Ще в античності з'явилися примітивні прототипи вимірювальних пристроїв, зокрема водяні годинники й системи, що використовували фізичні властивості середовища для фіксації часу або змін стану. У XVII ст., з розвитком експериментальної науки, з'являються перші наукові вимірювальні прилади – термометри й барометри, що можна вважати ранніми датчиками температури й тиску; значний внесок у ці дослідження зробив Галілео Галілей. У XVIII–XIX ст., із розвитком електрики й електромагнетизму, починається формування сучасного розуміння датчиків як пристроїв перетворення фізичних величин на сигнали, а дослідження Вільяма Томсона (лорда Кельвіна) сприяли підвищенню точності вимірювань. У XIX – на початку XX ст. з'являються перші електричні датчики, зокрема термопари, тензодатчики та індукційні системи, а з розвитком електроніки у XX ст. датчики стають компактними, точними та інтегрованими у складні технічні системи, що заклало основу сучасних сенсорних технологій. Новітні датчики характеризуються високою чутливістю, мініатюризацією та здатністю працювати у складі інтелектуальних систем. Сьогодні активно розвиваються оптичні, квантові, біохімічні та MEMS-датчики, які можуть одночасно вимірювати кілька параметрів середовища. Завдяки інтеграції із ШІ та бездротовими мережами такі сенсори широко застосовуються в автономних систе-

мах, зокрема в робототехніці, медицині й безпілотних платформах, забезпечуючи обробку даних у режимі реального часу.

Датчики зазнали глибокої трансформації, еволюціонуючи від простих механічних та електричних пристроїв до складних багатофункціональних систем. Ранні датчики переважно вимірювали певні фізичні величини, вимірюючи механічні, електричні або оптичні сигнали у відповідь на подразники навколишнього середовища. Однак за останнє десятиліття досягнення в обчислювальній потужності, повсюдні мережі зв'язку, підключення до інтернету, мобільні інтелектуальні пристрої та інтеграція хмарних технологій революціонізували їх можливості (Abdulhussain et al., 2025).

На сьогодні створено велику кількість різноманітних датчиків. Через постійне розроблення нових типів і модифікацію вже існуючих визначити їх точну кількість практично неможливо. За наближеними оцінками, наведеними в інженерних оглядах, кількість відомих типів датчиків перевищує 30 тис., якщо враховувати всі принципи дії та конструктивні модифікації (Syspcb, 2025). Водночас більшість із них належить до кількох базових груп, зокрема температурних, датчиків тиску, оптичних, хімічних, магнітних, датчиків руху тощо. У зв'язку із цим для полегшення орієнтації в такій різноманітності виникає потреба в систематизації і класифікації датчиків. У науковій і технічній літературі датчики класифікують за низкою критеріїв залежно від фізичної величини (речовини) або аналізу, що вимірюється, а також від принципу їхнього функціонування. Серед основних критеріїв класифікації виділяють:

- 1) фізичну величину, що вимірюється (механічні, термічні, оптичні, електричні / електромагнітні, хімічні та біохімічні);
- 2) джерело енергії (активні й пасивні);
- 3) характер фізичного контакту з об'єктом вимірювання (контактні й безконтактні);
- 4) тип вихідного сигналу (аналогові й цифрові);
- 5) тип фізичного перетворення сигналу (перетворення вхідних і вихідних даних: фотоелектричні, термоелектричні, електрохімічні, електромагнітні, термооптичні);
- 6) спосіб вимірювання фізичної величини та прив'язки сигналу сенсора до нульового або еталонного значення (абсолютні й відносні / диференціальні);
- 7) середовище вимірювання (повітряні / атмосферні, рідинні, твердофазні);
- 8) функціональне призначення (промислові, медичні, навігаційні, геодезичні, транспортні, робототехнічні тощо);
- 9) сферу спеціалізованого застосування (напр. сенсори для безпілотних літальних апаратів у гуманітарно-розмінуванні).

Класифікація датчиків для гуманітарного розмінування, запропонована (Baudoin et al., 2003), ґрунтується на аналізі існуючих технологій детекції мін, результатах експериментальних досліджень у межах бельгійського проєкту HUDEM (HUMANitarian DEMining) і концепції мультисенсорного виявлення, що передбачає інтеграцію сигналів різних типів датчиків:

- 1) механічні щупи, сейсмічні й акустичні датчики;
- 2) електромагнітні датчики;
- 3) електрооптичні датчики;
- 4) детектори вибухових речовин.

IMAS і супровідні інструкції не наводять формальної таксономії датчиків, але структурно підтримують класифікацію технологій детекції, яка включає металодетектори, радіолокацію (GPR), мультисенсорні системи та інші допоміжні сенсорні методи, що визначаються у

довідниках і протоколах тестування IMAS як ключові для гуманітарного розмінування. Незважаючи на відсутність формальної таксономії у стандартах IMAS, доцільно детально проаналізувати ці чотири групи датчиків, що відображають ключові технології детекції мін, включені

у практичні протоколи тестування, зокрема з урахуванням їх потенційного спільного використання на платформах БПЛА для підвищення ефективності та безпеки ПМД (рис. 1).

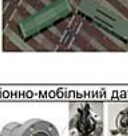
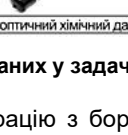
Датчики для гуманітарного розмінування				Датчики для формування геопросторової інформації
Механічні щупи, сейсмічні та акустичні датчики	Електромагнітні датчики	Електрооптичні датчики	Детектори вибухових речовин	
				
механічний щуп (на платформі БПЛА)	індуктивний металодетектор	камера видимого спектра	електронний ніс (на платформі БПЛА)	акселерометр
				
сейсмічний датчик	магнітометр	камера інфрачервоного спектра	ядерний квадрупольний резонанс	гіроскоп
				
акустичний датчик	георадарний сенсор	мультиспектральний датчик	рентгенівська система	інерційно-навігаційна система (IMU з 6-DOF)
				
	радар із синтетичною апертурою	гіперспектральний датчик	хімічний датчик	GNSS та GPS-модуль
				
		LiDAR	газовий датчик	LiDAR
				
			іонно-мобільний датчик	інтегрована навігаційна система (об'єднання GNSS/INS)
				
			мас-спектрометричний датчик	
				
			оптичний хімічний датчик	

Рис. 1. Датчики БПЛА для збирання геопросторових даних у задачах протимінної діяльності

Дані з різних датчиків БПЛА перетворюються на просторову інформацію шляхом визначення точного положення БПЛА й орієнтації датчиків, що можливо завдяки використанню навігаційних датчиків ГНСС, інструментів інерційної навігації (IMU: акселерометра, гіроскопа) і метаданих датчиків. Комбінуючи положення, орієнтацію та геометрію датчиків, кожен піксель чи точку даних можна співвідносити з конкретним місцем на земній поверхні. Інерційні вимірювальні блоки (IMU), системи візуального спостереження, системи виявлення та визначення дальності світла (LiDAR) і радіотехнології, такі як надшироко-смугові (UWB), стають важливим доповненням до ГНСС.

ГНСС наразі є основним джерелом абсолютного позиціонування для БПЛА, оскільки вони пропонують глобальне покриття, високу точність і відносно просту

інтеграцію з бортовою авіонікою. Багаточастотні приймачі, які відстежують сигнали від GPS, Galileo, ГЛОНАСС і навігаційної супутникової системи BeiDou, значно поліпшують доступність і надійність, особливо за часткових відключень супутників або локальних погіршень. Високоточні методи, такі як точне позиціонування точок (PPP), кінематика в реальному часі (RTK) і кінематика з постобробленням (PPK) значно оптимізують пряме геоприв'язування у фотограмметрії БПЛА та інших геопросторових застосуваннях, забезпечуючи позиціонування на сантиметровому рівні (Jiang et al., 2026).

Коректне планування місії польоту БПЛА – це можливість збирання більшої кількості даних із заданим рівнем детальності за менший проміжок часу. Суцільність збирання інформації на певну територію дає змогу макси-

мально точно й достовірно провести тривимірне моделювання, просторовий і геостатистичний аналіз ситуації місцевості, а отже, підвищити ймовірність детектування мін і ВНП (Hutsul et al., 2025d).

Залежність між геопросторовими даними й типами датчиків є функціональною і причинно-наслідковою: датчик визначає, що саме вимірюється у фізичному середовищі, а це прямо формує структуру (просторовий (геометричний), атрибутивний, часовий й топологічний складники), форму (векторну, растрову, тривимірну, топологічну або просторово-часову модель) і тип (дискретні об'єкти, безперервні поля, об'ємні або динамічні процеси) геопросторових даних після геоприв'язки й оброблення в ГІС. Структура геопросторових даних визначається характером просторового явища, тобто властивостями реальності, яка задає спосіб її дискретизації. Датчики опосередковано впливають на структуру через тип фізичного вимірювання, тоді як обробка сигналів визначає тип і організацію даних. Інтеграція та узгодження різнорідних даних у межах ГІС забезпечує формування єдиної просторової моделі середовища.

Механічні щупи, сейсмічні та акустичні датчики призначені для виявлення мін та інших прихованих вибухових пристроїв шляхом реєстрації механічних або вібраційних змін у ґрунті або шуму, що виникає при взаємодії із зовнішніми силами, які створює техніка чи людина. Ці датчики працюють не із зображенням, а з відгуком середовища на механічний або хвильовий вплив, тому спочатку мають вигляд сигналів, а вже потім перетворюються на просторові моделі.

Механічні щупи практично не застосовуються на платформах БПЛА через вагові обмеження, а також складність забезпечення стабільного контролю сили контакту щупа з поверхнею ґрунту. Водночас у науковій літературі розглядаються окремі концептуальні підходи, які потенційно можуть бути розширені до контактних рішень. До них належать: використання контактних датчиків, підвішених під платформою БПЛА, здатних періодично торкатися поверхні ґрунту (Sudarshan et al., 2016); застосування кабельних датчиків або щупів, що розгортаються з борту безпілотної (Bodie et al., 2019), а також концепції гібридних роботизованих систем, у яких БПЛА виконує доставку або розгортання сенсорної апаратури для подальшого контакту з ґрунтом (Zhan et al., 2026). Контактні методи дослідження ґрунту із застосуванням зондів (щупів) дають змогу визначати широкий спектр фізичних, електрофізичних і хімічних параметрів, зокрема вологість, температуру, щільність, опір проникненню, електропровідність (Hutsul et al., 2025b), кислотність (рН), окисно-відновний потенціал, а також концентрацію іонів і газів у ґрунтового середовищі. Інтеграція параметрів, отриманих контактними методами (зондами), відкриває суттєві можливості для підвищення ефективності виявлення сторонніх об'єктів у ґрунті.

Акустично-сейсмічні датчики базуються на збудженні коливань ґрунту акустичним сигналом і вимірюванні вібрацій поверхні за допомогою лазерних або сейсмічних датчиків (Xiang, & Sabatier, 2003). Пориста структура ґрунту дає змогу виявляти підповерхневі об'єкти, зокрема протипіхотні міни, за змінами параметрів акустично-сейсмічного зв'язаного руху на поверхні. Реакція мін характеризується широкосмуговим спектром, а їх наявність спричиняє послідовне зростання амплітуди швидкості коливань у відносно широкому діапазоні частот. У цьому дослідженні описано експериментальну наземну систему виявлення мін, що використовує скануючий однопromеневий лазерний доплерівський віброметр для вимірю-

вання акустично-сейсмічного руху поверхні ґрунту. Хоча такі системи зазвичай реалізуються у стаціонарному або наземному виконанні, у сучасних дослідженнях демонструється можливість застосування акустичних датчиків на платформах БПЛА для аналізу звукових сигналів у складних середовищах, що свідчить про потенціал їх інтеграції у безпілотні системи моніторингу та дистанційного зондування (Zimroz et al., 2021).

Механічні щупи, сейсмічні й акустичні датчики належать до групи контактних або напівконтактних методів детекції, що базуються на безпосередній взаємодії із поверхнею ґрунту або на аналізі його механічних коливань. У традиційній практиці гуманітарного розмінування такі датчики використовуються переважно в наземних системах через необхідність стабільного контакту з поверхнею та контрольованого збудження або вимірювання коливань. Інтеграція подібних датчиків із платформами БПЛА є складною через обмеження вантажопідйомності, складність стабілізації платформи й забезпечення контрольованої сили контакту з ґрунтом. Водночас окремі дослідження демонструють потенціал використання контактних або підвішених датчиків, а також гібридних роботизованих систем, у яких БПЛА виконують роль платформи для розгортання або доставки сенсорної апаратури. Отже, застосування механічних, сейсмічних та акустичних датчиків на БПЛА у ПМД наразі має переважно експериментальний або концептуальний характер, але може розглядатися як перспективний напрям розвитку мультисенсорних систем виявлення мін.

Електромагнітні датчики – це технічні засоби, принцип роботи яких ґрунтується на взаємодії електричних та/або магнітних полів з об'єктами або середовищем. До цієї групи належать, зокрема, металодетектори, електромагнітні індукційні сенсори, магнітометри, георадар (GPR) і мікрохвильові радіометричні системи, які використовуються для виявлення підповерхневих об'єктів за змінами електричних, магнітних або радіохвильових характеристик середовища. Тип електромагнітного датчика визначає характер вимірюваного фізичного сигналу, що зумовлює структуру первинних даних, які після геоприв'язки й обробки трансформуються у відповідні типи геопросторових моделей – від профільних розрізів до тривимірних реконструкцій середовища. Вони дають змогу формувати геопросторові дані про підповерхневі об'єкти та фізичні властивості середовища, що недоступно в оптичних системах.

Індукційні металодетектори генерують змінне електромагнітне поле, яке індуктує вихрові струми в металевих об'єктах. Вторинне електромагнітне поле, створене цими струмами, реєструється приймальною котушкою та використовується для виявлення підземних металевих об'єктів. Індукційні металодетектори є базовим і наймасовішим інструментом гуманітарного розмінування, особливо в ручних операціях і під час технічного обстеження територій. Котушкові сенсори металодетекторів можуть бути інтегровані у платформу БПЛА як підвісні сенсорні модулі. Метод є ефективним для виявлення мін із металевими елементами, однак його ефективність знижується зі зменшенням вмісту металу в конструкції мін (Kolba et al., 2010). Крім того, необхідні відносно мала висота польоту ($\approx 10\text{--}50$ см) і захист від електромагнітних перешкод двигунів БПЛА. Більшість подібних рішень перебувають на рівні лабораторних прототипів.

Магнітометри вимірюють варіації магнітного поля Землі. Металеві об'єкти (міни, артилерійські боеприпаси, уламки) створюють локальні магнітні аномалії, які реєструють датчиком під час польоту БПЛА (Yoo et al., 2021).

Магнітометри – один із найпоширеніших типів електромагнітних датчиків, установлених на БПЛА для задач гуманітарного розмінування та пошуку ВНП (Hutsul et al., 2024). Обмеженість застосування пов'язана з низькою чутливістю до неметалевих і малометалевих мін, впливом платформних і зовнішніх електромагнітних завад, а також недостатньою просторовою роздільною здатністю. Тому магнітометри зазвичай використовуються у складі мультисенсорних систем, поєднуючись із георадаром або індукційними датчиками.

Георадарні сенсори (GPR) – неінвазивний метод геофізичного виявлення, що використовує електромагнітні хвилі мікрохвильового діапазону, які проникають у ґрунт і відбиваються від підземних об'єктів або шарів ґрунту для виявлення об'єктів під землею або в конструкціях, навіть якщо вони не виступають над поверхнею. На БПЛА встановлюються легкі георадарні системи, що працюють на основі ступінчасто-частотного сигналу (SFCW) або FMCW-радарів. Такі системи (Široš, & Gleich, 2020) дають змогу виявляти пластикові міни, міни з мінімальним вмістом металу й підповерхневі аномалії структури ґрунту. Георадарні системи на основі БПЛА демонструють ефективне виявлення об'єктів на глибині до 0,3–0,5 м, що залежить від діелектричних властивостей ґрунту й умов сканування, зокрема дотримання робочої висоти польоту 0,2–0,5 м.

Радар із синтетичною апертурою (SAR/GPSAR) використовує складне оброблення радіолокаційних даних для створення дуже вузького ефективного променя. Довга синтезована апертура дає змогу генерувати двовимірні радіолокаційні зображення високої роздільної здатності. Однак із використанням лінійної апертури виникає проблема неоднозначності щодо напрямку дальності та глибини. Цю проблему розв'язують або за допомогою нелінійної траєкторії руху БПЛА, наприклад радіолокатора з круговою синтезованою апертурою (CSAR), або за допомогою перехресного інтерферометричного SAR (InSAR), або томографії з повторним проходом. Експериментальні БПЛА-системи виявляють протипіхотні міни із сантиметровою точністю. Об'єкти на поверхні, безпосередньо під поверхнею, а також глибше закопані виявляють за допомогою геометрії бокового огляду (Schartel et al., 2020). Оскільки можливості виявлення за допомогою радара не обмежуються металевими об'єктами, то він став перспективним підходом для пошуку сучасних пластикових мін із мінімальним вмістом металу (Gottwald, Docci, & Mayer, 2017). Для методів SAR-візуалізації (тобто узгодженої комбінації вимірювань) потрібне використання методів геоприв'язки та позиціонування з точністю до сантиметрового або міліметрового рівня (Fernández et al., 2018).

Електрооптичні датчики включають камери видимого й інфрачервоного спектральних діапазонів, а також мульті- та гіперспектральні системи, включно з LiDAR. Вони формують геопросторові дані як безпосереднє растрове зображення поверхні, що забезпечує високу деталізацію, але обмежене можливістю проникнення під поверхню. Це дає змогу застосовувати їх для виявлення та ідентифікації об'єктів на поверхні ґрунту й у приповерхневому шарі за рахунок аналізу спектральних, просторових і структурних характеристик сцени. Основою інтерпретації даних є використання первинних і вторинних дешифрувальних ознак, що дають змогу розрізнати аномалії рельєфу, рослинності й поверхневих індикаторів наявності підповерхневих об'єктів. RGB-сенсори є найбільш поширеним типом у дослідженнях ДЗЗ із використанням БПЛА (близько 57 %), тоді як мультиспек-

тральні системи становлять приблизно 33 %, а гіперспектральні – близько 10 % (Chang et al., 2025).

Камери видимого спектра (RGB) здійснюють реєстрацію випромінювання в діапазоні 400–700 нм. Вони не забезпечують виявлення підземних мін і значною мірою залежать від погодних умов, освітлення та стану рослинного покриву. Водночас такі камери є ефективними для виявлення поверхневих мін, слідів ґрунтових порушень, траншей або інших ознак мінування. Крім того, вони застосовуються для аерофотозйомки замінованих ділянок із метою створення ортофотопланів, цифрових моделей місцевості й подальшого просторового аналізу територій (Саприкін, 2024). Тому RGB-камери зазвичай застосовуються не як автономний засіб виявлення мін, а як складники мультисенсорних систем у поєднанні з тепловими, мультиспектральними або геофізичними сенсорами.

Камери інфрачервоного спектра (thermal) виявляють теплові аномалії, наприклад теплі корпуси мін або рух людей / тварин у діапазоні 3–14 μm . Можуть працювати в темряві, однак потребують попередньої обробки вимірів. Ефективність застосування залежить від температурного контрасту ґрунту та ВНП (Bajić, & Potočnik, 2023). Оптимальними умови застосування є зранку (після нічного охолодження) і звечора (після денного нагрівання), коли досягається максимальний контраст. Тепловізійні датчики характеризуються обмеженою глибиною виявлення: температурні аномалії є помітними переважно для об'єктів, розташованих на глибині до 0–10 см (у сприятливих умовах – до 20–30 см) (Xu et al., 2025).

Мультиспектральні (MS) і гіперспектральні датчики (HSI) забезпечують реєстрацію зображень у кількох (для MS – зазвичай 3–10) або великій кількості (для HSI – десятки й сотні) спектральних каналів, що охоплюють видимий і ближній інфрачервоний (NIR) діапазони, а також, у деяких випадках, діапазон червоного краю. У контексті гуманітарного розмінування HSI пропонує значний потенціал для виявлення наземних мін і ВНП шляхом фіксації чітких спектральних сигнатур матеріалів (Ляшенко, Зобнів, & Цвик, 2025). Можливості щодо ідентифікації матеріалів і виявлення аномалій роблять MS та HSI особливо ефективними для розрізнення наземних мін серед фонових перешкод у складних середовищах. Наприклад, у роботах останніх років (Lekhak et al., 2025) показано можливість отримання високоточних гіперспектральних даних із БПЛА з десятками й сотнями спектральних каналів у діапазоні 400–900 нм, що дає змогу формувати детальні спектральні профілі об'єктів і поверхонь. Такі дані забезпечують можливість виявлення як поверхневих, так і частково заглиблених об'єктів.

LiDAR – це новий, неінвазивний і перспективний метод активного ДЗЗ, який одночасно збирає геометричні й радіометричні (поверхнева інтенсивність) дані. Інструмент LiDAR виявляє численні екзоформи, що дає змогу інвентаризувати й картографувати величезний потенціал для реконструкції наслідків конфліктів різної давності. Здатність LiDAR генерувати детальні карти в режимі реального часу підвищує безпеку й надійність роботизованої навігації, роблячи її невід'ємним компонентом у підвищенні автономності й адаптивності роботизованих систем. Основний недолік LiDAR полягає у тому, що його випромінювання практично не проникає під землю, а тому використання обмежене лише наземним (поверхневим) забрудненням об'єктів, тоді як переважна їх більшість міститься у приземному шарі глибиною 0–20 см. Проникнення оптичних хвиль у непрозорі матеріали становить менше 1 мм, тому оптичними методами можна виміряти лише властивості поверхні ґрунту, на які впли-

ває наявність похованих наземних мін (Hutsul, Khobzei, & Tkach, 2025c). Окрім камери, інтеграція LiDAR з іншими датчиками (напр. ГНСС, радаром) в єдину систему сприйняття може ще більше поліпшити надійність і можливості сенсорного сприйняття. Адаптивні алгоритми об'єднання датчиків, які динамічно налаштовуються до умов навколишнього середовища, можуть підвищити надійність БПЛА, ефективно вирішуючи складні випадки, пов'язані з відбиваючими або прозорими поверхнями (Ren et al., 2025).

Детектори вибухових речовин охоплюють широкий клас біологічних, фізико-хімічних та ядерно-фізичних методів, призначених для виявлення слідових концентрацій вибухових матеріалів або їхніх парів. До біосенсорних систем належать натреновані тварини (зокрема собаки та щури), а також електронні носи (e-nose), які імітують роботу біологічної нюхової системи й аналізують леткі органічні сполуки. Фізико-хімічні та ядерні методи включають ядерно-квадрупольний резонанс (NQR), теплові нейтронні активаційні методи (TNA), швидкі нейтронні активаційні методи (FNA), рентгенівську та гамма-радіаційну візуалізацію, а також різні типи хімічних датчиків. Ці підходи дають змогу підтверджувати наявність вибухових речовин шляхом аналізу їхнього хімічного складу або характерних фізичних відгуків. Формування геопросторових даних на основі детекторів вибухових речовин відбувається шляхом реєстрації хімічних сигналів, їхньої просторово-часової геоприв'язки, подальшої обробки та інтерполяції, у результаті чого одержують точкові, растрові й полігональні моделі розподілу концентрацій і зон ризику.

Біосенсори – це живі або біологічно натхненні системи для виявлення молекул вибухових речовин. Зрозуміло, що використання собак, щурів та інших живих організмів у поєднанні з БПЛА неможливе з етичних і практичних міркувань. Проте електронний ніс є масивом хімічних сенсорів, що реагує на молекули вибухових речовин у повітрі та має можливості інтеграції з платформами БПЛА (Lopez et al., 2017).

Ядерні датчики можуть застосовуватися у гуманітарному розмінуванні для виявлення ВНП, однак доволі обмежено через вимоги до безпеки, масогабаритні характеристики обладнання, високу чутливість до шумів і складність інтеграції. У сучасних системах ПМД ці методи розглядаються як перспективні, але переважно експериментальні, тоді як у практичному застосуванні домінують електромагнітні й оптичні датчики. Одним із прикладів ядерних датчиків є ядерний квадрупольний резонанс (NQR) – радіоспектроскопічний метод, що дає змогу безпосередньо виявляти вибухові речовини всередині міни. Він базується на властивості деяких атомних ядер (напр. ^{14}N , що входить до складу TNT, RDX, HMX) взаємодіяти з електричним градієнтом поля у кристалічній структурі вибухової речовини (Kasianchuk et al., 2025). Інтеграція NQR із БПЛА поки переважно концептуальна, але активно досліджується через можливість безпечного дистанційного вимірювання (Samila et al., 2022).

Рентгенівські системи наразі доступні для застосування лише на наземних роботизованих системах. Їх поєднання з БПЛА вважається найменш вірогідним через обмеження, пов'язані з радіаційною безпекою, масогабаритними характеристиками обладнання та низькою придатністю до роботи в польових умовах. Спробу реалізації універсальної системи випромінювання на базі гвинтового БПЛА для виявлення та кількісного оцінювання

радіоактивних аномалій над фоном розглянуто в роботі (Corbacho et al., 2023).

Хімічні датчики призначені для виявлення слідів вибухових речовин або їхніх парів у повітрі та ґрунті. Більшість вибухових матеріалів (напр. TNT, RDX, PETN) поступово випаровуються або утворюють мікрочастинки, які можуть бути зафіксовані датчиками. БПЛА з газовими датчиками або хемосенсорами можуть моніторити наявність слідів вибухівки на великих територіях, наприклад після бойових дій або в зоні розмінування. Це дає змогу попередньо обстежувати територію БПЛА перед початком наземного розмінування. До основних типів хімічних датчиків належать: газові (MOS); іонно-мобільні (IMS); мас-спектрометричні; оптичні хімічні.

Газові датчики (MOS) змінюють електричний опір при контакті з молекулами газів або парів вибухових речовин. Невелика маса, компактність, висока чутливість і низька вартість роблять їх легкоінтегрованими для невеликих БПЛА для аналізу повітря і виявлення парів вибухових речовин (Zhang et al., 2025).

Іонно-мобільні датчики (IMS) вимірюють швидкість іонізованих молекул вибухових речовин в електричному полі. У системах розмінування IMS часто використовуються як датчик підтвердження після первинного виявлення металодетектором або георадаром. IMS активно досліджують для автономних систем і роботизованих платформ, включно з БПЛА (Peng et al., 2014).

Мас-спектрометричні датчики визначають масу та структуру молекул вибухових речовин. Існують приклади, де мас-спектрометричні технології інтегруються з БПЛА переважно для аналізу повітря, газів чи летких хімічних компонентів, що безпосередньо пов'язано із кроком у бік детекції хімічних слідів вибухових речовин. Це перспективний напрям, який ще формується, але вже має перші наукові реалізації (Diaz et al., 2015).

Оптичні хімічні датчики виявляють вибухові речовини за допомогою оптичної взаємодії молекул зі світлом (флуоресценції, поглинання, лазерної спектроскопії). Такі датчики реагують на леткі органічні сполуки або частинки вибухових речовин, які присутні на поверхні ґрунту або в повітрі. Найчастіше використовують LIF (Lazic et al., 2019), LIBS (Ding et al., 2023), гіперспектральні камери, і вони є частиною мультисенсорних систем для гуманітарного розмінування.

БПЛА як платформи ДЗЗ, на яких можна реалізовувати збирання геопросторових даних із використанням вищезазначених датчиків, потребують базового набору вбудованих датчиків кількох видів, що перетворює їх на повноцінні мобільні вимірювальні платформи. Вони можуть працювати в різних середовищах та умовах, з різним рівнем автономності, окремо або разом з іншими БПЛА того самого або іншого типу. Вимірювання є критично важливими як для руху БПЛА, так і для виконання завдання, для якого вони покликані працювати. Датчики, що використовуються для збирання даних, необхідних для роботи БПЛА, можуть дуже відрізнитися за своєю технологією та продуктивністю, при цьому необхідно враховувати різні можливості точності вимірювань (Balestrieri et al., 2021).

Для забезпечення стабілізації мультикоптера в польоті (утримання кутів орієнтації та компенсації зовнішніх збурень) мінімально необхідним апаратним компонентом є інерційний вимірювальний модуль (IMU) із шістьма ступенями свободи (6-DOF), який включає тривісний гіроскоп і тривісний акселерометр.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика датчиків та сформованих геопросторових даних

	Тип датчиків			
	Механічні щупи, сейсмічні та акустичні датчики	Електромагнітні датчики	Електрооптичні датчики	Детектори вибухових речовин
Фізична природа сигналу	механічні коливання, хвильові процеси	аномалії електромагнітного поля (магнітне, електричне, радіохвильове)	відбите, розсіяне та власне випромінювання	Хімічні / іонізаційні сигнали та мас-спектрометричні сигнали
Первинні дані	часові ряди сигналів	сигнали у часовій / частотній області	зображення (пікселі, спектральні канали)	концентрації, події
Структура даних	точкова, профільна	профільна, 2D/3D масиви	регулярна (растрова)	точкова
Тип геопросторових даних	дискретні, профільні, частково 3D	безперервні поля та дискретні аномалії	безперервні поля	дискретні, імовірнісні поля
Форма зображення	векторна (точки, лінії) + профільна (1D/2D) + 3D поверхні	растрова, векторна, 3D	растрова, 3D (похідна)	векторна (точки), растрова (інтерполяція), полігональна
Основні продукти	сейсмічні розрізи, карти аномалій	радарограми, карти інтенсивності, 3D моделі	ортофото, індекси, ЦММ/ЦМР	карти концентрацій, зони ризику
Застосування в ПМД	виявлення підповерхневих неоднорідностей, локалізація об'єктів	виявлення підповерхневих об'єктів і металевих ВНП	виявлення непрямих ознак, аналіз поверхні	пряме підтвердження наявності ВР, оцінювання небезпеки
Переваги	чутливість до підповерхневих змін; можливість глибинного аналізу	можливість виявлення підповерхневих об'єктів; відносно висока точність	висока просторово-часова роздільна здатність; простота інтерпретації	пряме виявлення вибухових речовин; висока специфічність
Обмеження	складна інтерпретація сигналів; залежність від фізичних властивостей ґрунту	чутливість до вологості та складу ґрунту; обмежена глибина проникнення	відсутність проникнення під поверхню; залежність від освітлення та погодних умов	точковий характер вимірювань; залежність від умов середовища (вітер, температура)

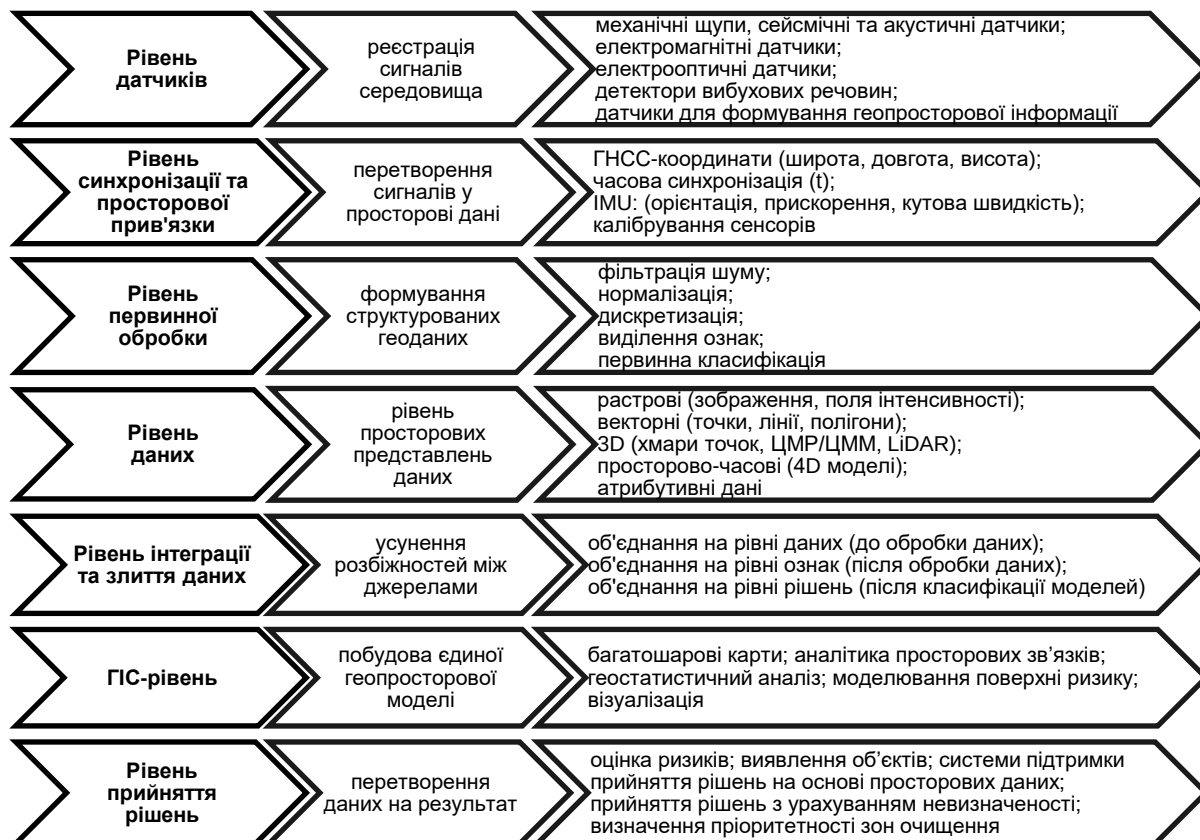


Рис. 2. Концептуальна структурно-функціональна модель мультисенсорної системи формування геопросторових даних на базі БПЛА

Класифікація датчиків для гуманітарного розмінування, запропонована Baudoin et al. (2003), є однією з базових і широко використовуваних, однак вона була сформована в умовах технологічного рівня початку 2000-х рр. і не повною мірою відображає сучасний стан розвитку сенсорних систем і підходів до ПМД. По-перше, відсутній окремий клас для ДЗЗ із БПЛА. Типові датчики ДЗЗ розкидано по різних групах (табл. 1), що ускладнює систематизацію та не відображає мультисенсорну природу сучасних систем. По-друге, недостатньо враховано мультисенсорні системи та злиття даних (data fusion) – підходи, які поєднують сенсори з різних груп і демонструють відмінні результати. При огляді класифікації видно, що більшість таких розробок, попри перспективність, перебувають поки що на концептуальному рівні. По-третє, з'явилися новітні типи сенсорів (інтелектуальні системи сприйняття середовища). По-четверте, класифікація не розрізняє різні рівні виявлення, зокрема: detectors (факт наявності об'єкта); identifiers (тип об'єкта); mappers (просторове розповсюдження).

Кожна група сенсорів має власні переваги й обмеження, що визначають характер сформованих геопросторових даних. Це обумовлює доцільність мультисенсорного підходу, за якого інтеграція різнорідних даних у межах ГІС дає змогу компенсувати недоліки окремих датчиків і підвищити достовірність виявлення вибухонебезпечних об'єктів. Це дає змогу перейти від аналізу окремих джерел даних до комплексного формування геопросторової інформації в межах ГІС. Узагальнена реалізація такого підходу представлена на рис. 2, що відображає концептуальну структурно-функціональну модель мультисенсорної системи на базі БПЛА.

Дискусія і висновки

Проведений аналіз показав, що використання датчиків, установлених на БПЛА, є перспективним напрямом підвищення ефективності та повноти збирання просторових даних високої роздільної здатності для потреб ПМД. Поєднання можливостей БПЛА з технологіями ДЗЗ надає оперативну, детальну та безпечну інформацію про потенційне забруднення ВВП без прямого залучення людей у небезпечні зони.

Жоден тип датчиків не забезпечує універсального та надійного виявлення мін за різних умов. Електромагнітні датчики (металодетектори, магнітметри, GPR) демонструють високу ефективність для підповерхневого виявлення, однак їхня робота істотно залежить від фізичних властивостей ґрунту, глибини залягання об'єктів і рівня електромагнітних перешкод. Зокрема, георадарні системи здатні виявляти неметалеві об'єкти, але їхня ефективність обмежується діелектричними характеристиками середовища та необхідністю низької висоти польоту. Електрооптичні датчики (RGB, thermal, мультиспектральні системи, LiDAR) забезпечують високодеталізовану інформацію про поверхневі ознаки мінного забруднення, однак їхні можливості щодо виявлення підповерхневих об'єктів є обмеженими. Вони переважно працюють як індикатори непрямих ознак (порушення ґрунту, зміни рослинності, температурні аномалії), що потребує подальшої верифікації іншими методами. Детектори вибухових речовин (хімічні, ядерні, біосенсори) забезпечують найбільш пряме підтвердження наявності вибухових матеріалів, однак їх інтеграція з БПЛА залишається складною через технічні, енергетичні й безпекові обмеження. Більшість таких систем перебуває на стадії експериментальних досліджень або прототипів.

Особливу увагу слід приділити обмеженням класифікації датчиків для гуманітарного розмінування,

яка не враховує сучасні тенденції, зокрема активне впровадження БПЛА як платформи-носія сенсорів, розвиток мультисенсорних систем та алгоритмів злиття даних, появу нових типів датчиків і методів обробки (ШІ, машинне навчання), необхідність розмежування рівнів виявлення (детекція, ідентифікація, картографування).

Сучасні дослідження підтверджують, що найбільш перспективним підходом є мультисенсорна інтеграція, яка дає змогу компенсувати недоліки окремих датчиків і підвищити достовірність результатів. Наприклад, поєднання георадару із магнітметрами або гіперспектральними датчиками значно підвищує імовірність виявлення мін у складних умовах (Lee et al., 2023). Сенсорне злиття даних у поєднанні з точним позиціонуванням за допомогою ГНСС та IMU дає змогу перетворювати вимірювання датчиків на просторові дані, від яких дедалі більше залежать процеси прийняття рішень (Wang et al., 2025).

Отже, застосування БПЛА як платформи для збирання просторової інформації створює передумови для підвищення ефективності етапів нетехнічного й технічного обстеження, уточнення меж небезпечних територій і оптимізації планування робіт із гуманітарного розмінування. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний з удосконаленням сенсорних технологій, зменшенням маси та енергоспоживання сенсорів, а також із розвитком методів інтегрованого аналізу зібраних геопросторових даних.

Джерела фінансування. Це дослідження не отримало жодного гранту від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

Список використаних джерел

- Горбулін, В. П. (2022). Світова глобальна проблема розмінування: український вектор. *Вісник НАН України*, 2, 3–13. <https://doi.org/10.15407/vissn2022.02.003>
- Гуцул, Т. (2025a). Геоінформаційні системи в гуманітарному розмінуванні територій: історія, розвиток, сучасність. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 3(63), 85–92. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.63.85-92>
- Гуцул, Т. (2025b). Геопросторові дані в гуманітарному розмінуванні територій: значення, класифікація та можливість застосування на різних етапах. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 1(65), 61–71. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2026.65.61-71>
- Гуцул, Т. (2026c). Дистанційне зондування – оптимальна технологія збирання геопросторових даних в гуманітарному розмінуванні. *Комуніальне господарство міст. Серія "Інформаційні технології та інженерія"*, 1(196), 216–231. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-216-231>
- Ляшенко Д., Зобнів, І., & Цвик, О. (2025). Картографування міної небезпеки за даними великомасштабних багатоспектральних знімків. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(108), 103–118. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.14>
- Саприкін, Є. (2024). Оптичне виявлення наземних мін з використанням глибокого навчання на основі обмеженого набору даних аерознімання. *Наукоємні технології*, 62(2), 107–115. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18708>
- Abdulhussain, S. H., Mahmmod, B. M., Alwhelat, A., Shehada, D., Shihab, Z. I., Mohammed, H. J., Abdulameer, T. H., Alsabah, M., Fadel, M. H., Ali, S. K., Abbood, G. H., Asker, Z. A., & Hussain, A. (2025). A comprehensive review of sensor technologies in IoT: technical aspects, challenges, and future directions. *Computers*, 14(8), 342. <https://doi.org/10.3390/computers14080342>
- Bajić, M., & Potočnik, B. (2023). UAV thermal imaging for unexploded ordnance detection by using deep learning. *Remote Sensing*, 15(4), 967. <https://doi.org/10.3390/rs15040967>
- Balestrieri, E., Daponte, P., De Vito, L., & Lamonaca, F. (2021). Sensors and Measurements for Unmanned Systems: an overview. *Sensors*, 21(4), 1518. <https://doi.org/10.3390/s21041518>
- Baudoin, Y., Acheroy, M., & Colon, E. (2003). Humanitarian demining: Sensor systems, mechanical and robotics systems. In *Proceedings of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2003)*.
- Bodie, K., Brunner, M., Pantic, M., Walser, S., Pfändler, P., Angst, U., Siegwart, R., & Nieto, J. (2019). An Omnidirectional Aerial Manipulation Platform for Contact-Based Inspection. In *Robotics: Science and Systems 2019*. <https://doi.org/10.15607/iss.2019.xv.019>
- Burrough, P. A., & McDonnell R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Internet Archive. <https://archive.org/details/principlesofgeog0000burr>

- Chang, B., Li, F., Hu, Y., Yin, H., Feng, Z., & Zhao, L. (2025). Application of UAV remote sensing for vegetation identification: a review and meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1452053. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1452053>
- Corbacho, J., Baeza, J., & Caballero, J. (2023). Use of a drone-based gamma-ray spectrometry system to assess point or extended radioactive sources. *Radioprotection*, 59(2), 80–87. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2023039>
- Diaz, J. A., Pieri, D., Wright, K., Sorensen, P., Kline-Shoder, R., Arkin, C. R., Fladeland, M., Bland, G., Buongiorno, M. F., Ramirez, C., Corrales, E., Alan, A., Alegria, O., Diaz, D., & Linick, J. (2015). Unmanned aerial mass spectrometer systems for In-Situ Volcanic plume analysis. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 26(2), 292–304. <https://doi.org/10.1007/s13361-014-1058-x>
- Ding, J., Zhang, T., & Li, H. (2023). Recent advances in laser-induced breakdown spectroscopy for explosive analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 166, 117197. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117197>
- Fernández, M. G., López, Y. Á., Arbolea, A. A., Valdés, B. G., Vaquero, Y. R., Andrés, F. L., & García, A. P. (2018). Synthetic Aperture Radar Imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*, 6, 45100–45112. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2863572>
- Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing*, 12(15), 2447. <https://doi.org/10.3390/rs12152447>
- Gottwald, R., Docci, N., & Mayer, W. (2017). *Humanitarian demining – UAV based detection of land mines*. In Proceedings of FIG Working Week 2017: Surveying the World of Tomorrow – From Digitalisation to Augmented Reality (Helsinki, Finland, May 29–June 2, 2017).
- Hutsul, T., Khobzei, M., & Tkach, V. (2025c, November 10). *Optical methods for soil parameter analysis: a step forward in humanitarian demining*. In Correlation Optics (COR 2025) (Article 138130Q). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3091678>
- Hutsul, T., Khobzei, M., Popiuk, Y., Tkach, V., Krulikovskiy, O., & Samila, A. (2025b). Soil conductivity: an important factor for detecting landmine threats and terrain rehabilitation. *Advances in Military Technology*, 20(1), 137–153. <https://doi.org/10.3849/aimt.01916>
- Hutsul, T., Khobzei, M., Tkach, V., Krulikovskiy, O., Moisiuk, O., Ivashko, V., & Samila, A. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*, 10(7), e29142. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142>
- Hutsul, T., Lysko, B., Zhezhhera, I., Tkach, V., & Tsvyk, T. (2025d). Recommendations for planning UAV flight missions for geodata collection. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 119(1), 62–70. <https://doi.org/10.2478/rgg-2025-0007>
- Jiang, C., Zhou, X., Chen, H., & Liu, T. (2026). UAV positioning using GNSS: A review of the current status. *Drones*, 10(2), 91. <https://doi.org/10.3390/drones10020091>
- Kasianchuk, A., Lastivka, H., & Samila, A. (2025). Perspectives on the development and Use of nuclear methods for detecting landmines and minefields: a review. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*, 3(1), 01010. <https://doi.org/10.31861/sisiot2025.1.01010>
- Kolba, M. P., Torriente, P. A., & Collins, L. M. (2010). Fusion of ground-penetrating radar and electromagnetic induction sensors for landmine detection and discrimination. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, 7664, 76641S. <https://doi.org/10.1117/12.851364>
- Lazic, V., Palucci, A., De Dominicis, L., Nuvoli, M., Pistilli, M., Menicucci, I., Colao, F., & Almaviva, S. (2019). Integrated Laser Sensor (ILS) for Remote Surface analysis: application for detecting explosives in fingerprints. *Sensors*, 19(19), 4269. <https://doi.org/10.3390/s19194269>
- Lee, J., Lee, H., Ko, S., Ji, D., & Hyeon, J. (2023). Modeling and implementation of a joint airborne ground penetrating radar and magnetometer system for landmine detection. *Remote Sensing*, 15(15), 3813. <https://doi.org/10.3390/rs15153813>
- Lekhak, S., Ientilucci, E. J., Baur, J., & Ghosh, S. (2025, October 3). *A UAV-Based VNIR Hyperspectral benchmark dataset for landmine and UXO detection*. [arXiv.org/abs/2510.02700v2](https://arxiv.org/abs/2510.02700v2)
- Lopez, P., Trivino, R., Calderon, D., Arcenales, A., & Guaman, A. V. (2017). Electronic nose prototype for explosive detection. In *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/chilecon.2017.8229657>
- Peng, L., Hua, L., Wang, W., Zhou, Q., & Li, H. (2014). On-site rapid detection of trace non-volatile inorganic explosives by stand-alone ion mobility spectrometry via acid-enhanced evaporation. *Scientific Reports*, 4(1), 6631. <https://doi.org/10.1038/srep06631>
- Pizzino, S., Durham, J., Wild, H. B., Tippet, V., & Waller, M. (2026). A multi-country epidemiological analysis of mortality from landmines and other explosive ordnance. *Communications Medicine*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43856-026-01430-y>
- Ren, Y., Cai, Y., Li, H., Chen, N., Zhu, F., Yin, L., Kong, F., Li, R., & Zhang, F. (2025). A survey on LiDAR-based autonomous aerial vehicles. [arXiv \(Cornell University\)](https://arxiv.org/abs/2509.10730). <https://doi.org/10.48550/arxiv.2509.10730>
- Samila, A., Hotra, O., Moisiuk, O., Khobzei, M., & Kazemirski, T. (2022). Modified Transceiver antenna for NQR detection of explosive objects in demining conditions. *Energies*, 15(19), 7348. <https://doi.org/10.3390/en15197348>
- Schartel, M., Burr, R., Bähmann, R., Mayer, W., & Waldschmidt, C. (2020). An experimental study on airborne landmine detection using a circular synthetic aperture radar. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2005.02600>
- Šipoš, D., & Gleich, D. (2020). A lightweight and Low-Power UAV-Borne ground penetrating radar design for landmine detection. *Sensors*, 20(8), 2234. <https://doi.org/10.3390/s20082234>
- Sudarshan, S. K. V., Li Huang, Chang Li, Stewart, R., & Becker, A. T. (2016). Seismic surveying with drone-mounted geophones. In *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/coase.2016.7743566>
- Syspcb. (2025, July 12). *Different types of sensors*. SYS Technology Co., Ltd. <https://www.syspcb.com/pcb-blog/knowledge/different-types-of-sensors.html>
- Telli, K., Kraa, O., Himeur, Y., Ouamane, A., Boumeheaz, M., Atalla, S., & Mansoor, W. (2023). A comprehensive review of recent research trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Systems*, 11(8), 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>
- United Nations Mine Action Service. (2019a). *International Mine Action Standards (IMAS 08.10): Non-technical survey*. Geneva, Switzerland: UNMAS. <https://www.mineactionstandards.org/standards/08-10-non-technical-survey>
- United Nations Mine Action Service. (2019b). *UN Mine Action Strategy 2019–2023*. Geneva, Switzerland: UNMAS. <https://www.unmas.org/en/unmas/resources/un-mine-action-strategy>
- Wang, S., Liang, Y., Liao, S., Xiao, S., & Wang, L. (2025). Multi-sensor information fusion methods for coal mine exploration in GNSS-denied scenarios. *Journal on Wireless Communications and Networking*, 2026(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-025-02490-9>
- Xiang, N., & Sabatier, J. M. (2003). An experimental study on antipersonnel landmine detection using acoustic-to-seismic coupling. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3), 1333–1341. <https://doi.org/10.1121/1.1543554>
- Xu, D., Zhao, Y., Zhang, K., Ling, C., & Li, P. (2025). Quantifying Thermal Spatiotemporal Signatures and Identifying Hidden Mining-Induced Fissures with Various Burial Depths via UAV Infrared Thermometry. *Remote Sensing*, 17(12), 1992. <https://doi.org/10.3390/rs17121992>
- Yoo, L., Lee, J., Lee, Y., Jung, S., & Choi, Y. (2021). Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. *Sensors*, 21(9), 3175. <https://doi.org/10.3390/s21093175>
- Zhan, Y., Jiang, Y., Cao, M., & Geng, J. (2026). Aerial Manipulation with Contact-Aware Onboard Perception and Hybrid Control. *Open MIND*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2602.08251>
- Zhang, C., Qian, L., & Zeng, W. (2025). MOS based gas sensor in detection of volatile organic compounds: A review. *Sensors and Actuators A Physical*, 393, 116818. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116818>
- Zhang, Z., & Zhu, L. (2023). A review on Unmanned aerial vehicle remote sensing: platforms, sensors, data processing methods, and applications. *Drones*, 7(6), 398. <https://doi.org/10.3390/drones7060398>
- Zimroz, P., Trybała, P., Wróblewski, A., Góralczyk, M., Szrek, J., Wójcik, A., & Zimroz, R. (2021). Application of UAV in search and rescue actions in underground Mine – A specific sound detection in noisy acoustic signal. *Energies*, 14(13), 3725. <https://doi.org/10.3390/en14133725>

References

- Abdullhussain, S. H., Mahmmod, B. M., Alwhelat, A., Shehada, D., Shihab, Z. I., Mohammed, H. J., Abdulameer, T. H., Alsabah, M., Fadel, M. H., Ali, S. K., Abbood, G. H., Asker, Z. A., & Hussain, A. (2025). A comprehensive review of sensor technologies in IoT: technical aspects, challenges, and future directions. *Computers*, 14(8), 342. <https://doi.org/10.3390/computers14080342>
- Bajić, M., & Potočník, B. (2023). UAV thermal imaging for unexploded ordnance detection by using deep learning. *Remote Sensing*, 15(4), 967. <https://doi.org/10.3390/rs15040967>
- Balestrieri, E., Daponte, P., De Vito, L., & Lamonaca, F. (2021). Sensors and Measurements for Unmanned Systems: an overview. *Sensors*, 21(4), 1518. <https://doi.org/10.3390/s21041518>
- Baudoin, Y., Acheroy, M., & Colon, E. (2003). Humanitarian demining: Sensor systems, mechanical and robotics systems. In *Proceedings of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2003)*.
- Bodie, K., Brunner, M., Pantic, M., Walser, S., Pfändler, P., Angst, U., Siegwart, R., & Nieto, J. (2019). An Omnidirectional Aerial Manipulation Platform for Contact-Based Inspection. In *Robotics: Science and Systems 2019*. <https://doi.org/10.15607/rss.2019.xv.019>
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Internet Archive. <https://archive.org/details/principlesofgeog0000burr>
- Chang, B., Li, F., Hu, Y., Yin, H., Feng, Z., & Zhao, L. (2025). Application of UAV remote sensing for vegetation identification: a review and meta-analysis. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1452053. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1452053>
- Corbacho, J., Baeza, J., & Caballero, J. (2023). Use of a drone-based gamma-ray spectrometry system to assess point or extended radioactive sources. *Radioprotection*, 59(2), 80–87. <https://doi.org/10.1051/radiopro/2023039>
- Diaz, J. A., Pieri, D., Wright, K., Sorensen, P., Kline-Shoder, R., Arkin, C. R., Fladeland, M., Bland, G., Buongiorno, M. F., Ramirez, C.,

- Corrales, E., Alan, A., Alegria, O., Diaz, D., & Linick, J. (2015). Unmanned aerial mass spectrometer systems for In-Situ Volcanic plume analysis. *Journal of the American Society for Mass Spectrometry*, 26(2), 292–304. <https://doi.org/10.1007/s13361-014-1058-x>
- Ding, J., Zhang, T., & Li, H. (2023). Recent advances in laser-induced breakdown spectroscopy for explosive analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 166, 117197. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117197>
- Fernández, M. G., López, Y. Á., Arbolea, A. A., Valdés, B. G., Vaquero, Y. R., Andrés, F. L., & García, A. P. (2018). Synthetic Aperture Radar Imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*, 6, 45100–45112. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2863572>
- Ferrer-González, E., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2020). UAV photogrammetry accuracy assessment for corridor mapping based on the number and distribution of ground control points. *Remote Sensing*, 12(15), 2447. <https://doi.org/10.3390/rs12152447>
- Gottwald, R., Docci, N., & Mayer, W. (2017). *Humanitarian demining – UAV based detection of land mines*. In Proceedings of FIG Working Week 2017: Surveying the World of Tomorrow – From Digitalisation to Augmented Reality (Helsinki, Finland, May 29–June 2, 2017).
- Horbulin, V. P. (2022). World global demining problem: Ukrainian vector. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2, 3–13 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/visn2022.02.003>
- Hutsul, T. (2026c). Remote sensing – the optimal technology for collecting geospatial data in humanitarian mine action. *Municipal economy of cities. Series: Information Technology and Engineering*, 1(196), 216–231 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33042/3083-6727-2026-1-196-216-231>
- Hutsul, T. (2025a). Geographic Information Systems in humanitarian demining: history, development and modernity. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-special sciences*, 3(63), 85–92 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2025.63.85-92>
- Hutsul, T. (2026b). Geospatial data in humanitarian territory clearance: significance, classification and possible application at different stages. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military-Special Sciences*, 1(65), 61–71 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/1728-2217.2026.65.61-71>
- Hutsul, T., Khobzei, M., & Tkach, V. (2025c, November 10). *Optical methods for soil parameter analysis: a step forward in humanitarian demining*. In Correlation Optics (COR 2025) (Article 138130Q). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.3091678>
- Hutsul, T., Khobzei, M., Popiuk, Y., Tkach, V., Krulikovskiy, O., & Samila, A. (2025b). Soil conductivity: an important factor for detecting landmine threats and terrain rehabilitation. *Advances in Military Technology*, 20(1), 137–153. <https://doi.org/10.3849/aimt.01916>
- Hutsul, T., Khobzei, M., Tkach, V., Krulikovskiy, O., Moisiuk, O., Ivashko, V., & Samila, A. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*, 10(7), e29142. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29142>
- Hutsul, T., Lysko, B., Zhezhera, I., Tkach, V., & Tsyvyk, T. (2025d). Recommendations for planning UAV flight missions for geodata collection. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 119(1), 62–70. <https://doi.org/10.2478/rgg-2025-0007>
- Jiang, C., Zhou, X., Chen, H., & Liu, T. (2026). UAV positioning using GNSS: A review of the current status. *Drones*, 10(2), 91. <https://doi.org/10.3390/drones10020091>
- Kasianchuk, A., Lastivka, H., & Samila, A. (2025). Perspectives on the development and Use of nuclear methods for detecting landmines and minefields: a review. *Security of Infocommunication Systems and Internet of Things*, 3(1), 01010. <https://doi.org/10.31861/sisiot2025.1.01010>
- Kolba, M. P., Torriane, P. A., & Collins, L. M. (2010). Fusion of ground-penetrating radar and electromagnetic induction sensors for landmine detection and discrimination. *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering/Proceedings of SPIE*, 7664, 76641S. <https://doi.org/10.1117/12.851364>
- Lazic, V., Palucci, A., De Dominicis, L., Nuvoli, M., Pistilli, M., Menicucci, I., Colao, F., & Almaviva, S. (2019). Integrated Laser Sensor (ILS) for Remote Surface analysis: application for detecting explosives in fingerprints. *Sensors*, 19(19), 4269. <https://doi.org/10.3390/s19194269>
- Lee, J., Lee, H., Ko, S., Ji, D., & Hyeon, J. (2023). Modeling and implementation of a joint airborne ground penetrating radar and magnetometer system for landmine detection. *Remote Sensing*, 15(15), 3813. <https://doi.org/10.3390/rs15153813>
- Lekhak, S., Ientilucci, E. J., Baur, J., & Ghosh, S. (2025, October 3). A UAV-Based VNIR Hyperspectral benchmark dataset for landmine and UXO detection. *arXiv.org*. <https://arxiv.org/abs/2510.02700v2>
- Liashenko, D., Zobniv, I., & Tsyvyk, O. (2025). Mapping mine risk using large-scale multispectral imagery. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 103–108 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.14>
- Lopez, P., Trivino, R., Calderon, D., Arcenales, A., & Guaman, A. V. (2017). Electronic nose prototype for explosive detection. In *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/chilecon.2017.8229657>
- Peng, L., Hua, L., Wang, W., Zhou, Q., & Li, H. (2014). On-site rapid detection of trace non-volatile inorganic explosives by stand-alone ion mobility spectrometry via acid-enhanced evaporation. *Scientific Reports*, 4(1), 6631. <https://doi.org/10.1038/srep06631>
- Pizzino, S., Durham, J., Wild, H. B., Tippett, V., & Waller, M. (2026). A multi-country epidemiological analysis of mortality from landmines and other explosive ordnance. *Communications Medicine*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43856-026-01430-y>
- Ren, Y., Cai, Y., Li, H., Chen, N., Zhu, F., Yin, L., Kong, F., Li, R., & Zhang, F. (2025). A survey on LiDAR-based autonomous aerial vehicles. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2509.10730>
- Samila, A., Hotra, O., Moisiuk, O., Khobzei, M., & Kazemirskiy, T. (2022). Modified Transceiver antenna for NQR detection of explosive objects in demining conditions. *Energies*, 15(19), 7348. <https://doi.org/10.3390/en15197348>
- Saprykin, I. (2024). Optical deep learning landmine detection based on limited dataset of aerial imagery. *Science-Based Technologies*, 62(2), 107–115 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.62.18708>
- Schartel, M., Burr, R., Bähnmann, R., Mayer, W., & Waldschmidt, C. (2020). An experimental study on airborne landmine detection using a circular synthetic aperture radar. *arXiv (Cornell University)*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2005.02600>
- Sipos, D., & Gleich, D. (2020). A lightweight and Low-Power UAV-Borne ground penetrating radar design for landmine detection. *Sensors*, 20(8), 2234. <https://doi.org/10.3390/s20082234>
- Sudarshan, S. K. V., Li Huang, Chang Li, Stewart, R., & Becker, A. T. (2016). Seismic surveying with drone-mounted geophones. In *2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/coase.2016.7743566>
- Syspcb. (2025, July 12). *Different types of sensors*. SYS Technology Co., Ltd. <https://www.syspcb.com/pcb-blog/knowledge/different-types-of-sensors.html>
- Telli, K., Kraa, O., Himeur, Y., Ouamane, A., Boumeheaz, M., Atalla, S., & Mansoor, W. (2023). A comprehensive review of recent research trends on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Systems*, 11(8), 400. <https://doi.org/10.3390/systems11080400>
- United Nations Mine Action Service. (2019a). *International Mine Action Standards (IMAS 08.10): Non-technical survey*. Geneva, Switzerland: UNMAS. <https://www.mineactionstandards.org/standards/08-10-non-technical-survey>
- United Nations Mine Action Service. (2019b). *UN Mine Action Strategy 2019–2023*. Geneva, Switzerland: UNMAS. <https://www.unmas.org/en/unmas/resources/un-mine-action-strategy>
- Wang, S., Liang, Y., Liao, S., Xiao, S., & Wang, L. (2025). Multi-sensor information fusion methods for coal mine exploration in GNSS-denied scenarios. *Journal on Wireless Communications and Networking*, 2026(1). <https://doi.org/10.1186/s13638-025-02490-9>
- Xiang, N., & Sabatier, J. M. (2003). An experimental study on antipersonnel landmine detection using acoustic-to-seismic coupling. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3), 1333–1341. <https://doi.org/10.1121/1.1543554>
- Xu, D., Zhao, Y., Zhang, K., Ling, C., & Li, P. (2025). Quantifying Thermal Spatiotemporal Signatures and Identifying Hidden Mining-Induced Fissures with Various Burial Depths via UAV Infrared Thermometry. *Remote Sensing*, 17(12), 1992. <https://doi.org/10.3390/rs17121992>
- Yoo, L., Lee, J., Lee, Y., Jung, S., & Choi, Y. (2021). Application of a drone magnetometer system to military mine detection in the demilitarized zone. *Sensors*, 21(9), 3175. <https://doi.org/10.3390/s21093175>
- Zhan, Y., Jiang, Y., Cao, M., & Geng, J. (2026). Aerial Manipulation with Contact-Aware Onboard Perception and Hybrid Control. *Open MIND*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2602.08251>
- Zhang, C., Qian, L., & Zeng, W. (2025). MOS based gas sensor in detection of volatile organic compounds: A review. *Sensors and Actuators a Physical*, 393, 116818. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2025.116818>
- Zhang, Z., & Zhu, L. (2023). A review on Unmanned aerial vehicle remote sensing: platforms, sensors, data processing methods, and applications. *Drones*, 7(6), 398. <https://doi.org/10.3390/drones7060398>
- Zimroz, P., Trybala, P., Wróblewski, A., Góralczyk, M., Szrek, J., Wójcik, A., & Zimroz, R. (2021). Application of UAV in search and rescue actions in underground Mine – A specific sound detection in noisy acoustic signal. *Energies*, 14(13), 3725. <https://doi.org/10.3390/en14133725>

Отримано редакцією журналу / Received: 31.01.26
 Прорецензовано / Revised: 09.02.26
 Схвалено до друку / Accepted: 13.02.26
 Опубліковано / Published: 30.06.26

Taras HUTSUL, PhD (Engin.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-7192-3289
e-mail: t.gutsul@chnu.edu.ua
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

THE USE OF UAV SENSORS FOR GEO-SPATIAL DATA COLLECTION IN MINE ACTION TASKS

Background. Mine contamination of territories poses a threat to public safety and sustainable development. Traditional demining methods remain dangerous, resource-intensive, and slow, which necessitates the implementation of innovative technologies. One of the promising directions is the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) as platforms for collecting geospatial data using various types of sensors. The aim of the study is to analyse the possibilities of using UAV sensors in mine action activities and to assess their potential for increasing the effectiveness of mine and explosive ordnance detection.

Methods. The study is based on the theoretical analysis of contemporary scientific publications, regulatory documents, and technical solutions in the field of mine action. Methods of systematisation and generalisation were applied to classify sensors according to their operating principle, functional purpose, and possibilities of use on UAV platforms. A comparative analysis of their advantages, limitations, and application areas was conducted. The classification of sensors for humanitarian demining was analysed, substantiated, and supplemented with consideration of contemporary technological solutions.

Results. Four main groups of sensors were analysed: mechanical, electromagnetic, electro-optical, and explosive detectors. Sensors generate primary measurements of parameters which, during the georeferencing process (using coordinate-time tags, navigation, and orientation data), are transformed into geospatial data of the corresponding type. The integration of these data into Geographic Information Systems (GIS) ensures the creation of comprehensive environmental models (raster, vector, and three-dimensional), which increases the reliability of interpretation. It was established that electromagnetic sensors (in particular, ground-penetrating radars and magnetometers) are effective for detecting subsurface objects but depend on soil properties and survey conditions. Electro-optical sensors provide highly detailed surface information; however, they are limited in their ability to penetrate soil and are used mainly for detecting indirect indicators. Explosive detectors provide direct confirmation of the presence of explosive ordnance, although their integration with UAVs remains technically complex. It was found that the most effective approach is multi-sensor integration, which makes it possible to improve the reliability of results. The limitations of existing sensor classifications were also identified, as they do not take into account modern UAV technologies and data fusion methods.

Conclusions. The use of UAVs equipped with sensor systems is a promising direction in the development of humanitarian demining, enabling increased safety and efficiency of demining operations. No single sensor provides a universal solution; therefore, the key approach is the use of multi-sensor systems. Further research should focus on their integration, the development of data processing algorithms, and the improvement of classifications considering contemporary technologies.

Keywords: geoinformation technologies, humanitarian demining, Global Navigation Satellite Systems (GNSS), detection of explosive ordnance, remote sensing of the Earth; mine hazard; sensor systems.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.