

Г. ФЕДОРЕНКО, Г. ФЕСЕНКО, В. ХАРЧЕНКО

АНАЛІЗ МЕТОДІВ І РОЗРОБЛЕННЯ КОНЦЕПЦІЇ ГАРАНТОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПРЕДМЕТІВ

Предметом дослідження в статті є методи виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. **Мета роботи** – розроблення основних положень концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. У статті розв’язуються такі **завдання**: аналіз наявних підходів щодо застосування традиційних одиничних та комбінованих, а також нетрадиційних (біологічних) методів виявлення вибухонебезпечних предметів, розроблення класифікаційної таблиці методів виявлення вибухонебезпечних предметів за фізичними принципами, аналіз переваг та недоліків розглянутих методів виявлення вибухонебезпечних предметів, створення порівняльної таблиці методів виявлення вибухонебезпечних предметів, формулювання основних положень концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. Застосовуються такі **методи**: порівняння, абстрагування, аналіз і синтез, наукова індукція. Здобуто такі **результати**: проаналізовано особливості наявних традиційних і нетрадиційних (біологічних) методів виявлення вибухонебезпечних предметів. Запропоновано класифікацію методів виявлення вибухонебезпечних предметів з урахуванням параметрів, що впливають на ймовірність виявлення та продуктивність. У табличному вигляді запропоновано результати порівняльного аналізу методів виявлення вибухонебезпечних предметів за такими показниками: тип взаємодії з вибухонебезпечними предметами, тип платформи, потенційна продуктивність, підтримка інформаційних технологій, параметри якості, економічні показники. Сформульовано основні положення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. **Висновки**. Низька продуктивність наявних методів не дає змоги швидко й ефективно розчищати забруднені вибухонебезпечними предметами території, що призводить до значної кількості вражень і загибелі людей унаслідок підриву вибухонебезпечних предметів. Самостійне використання окремих методів виявлення не може суттєво збільшити ймовірність виявлення вибухонебезпечних предметів. Для підвищення продуктивності та безпеки виконання робіт із пошуку та знешкодження вибухонебезпечних предметів доцільно використовувати безпілотні інтелектуальні платформи доправлення інформаційно-вимірювальних засобів.

Ключові слова: методи виявлення та розпізнавання; вибухонебезпечні предмети; безпілотні апарати; продуктивність; ймовірність виявлення.

Вступ

Мотивація

У різних галузях діяльності людини виникає необхідність пошуку об’єктів у товщі середовища, що їх вкриває. Це археологічні пошуки, обстеження підземних комунікацій, контроль за пересуванням заборонених предметів, пошук вибухонебезпечних предметів (ВНП), гуманітарне розмінування, операції з пошуку людей під завалами та багато іншого. Щодо рівня небезпеки, техногенних загроз та негативних наслідків для екології значну небезпеку створюють забруднення територій ВНП.

Події, що спричиняють забруднення територій ВНП, трапляються внаслідок порушення правил зберігання ВНП, терористичних актів, збройних конфліктів та війн.

Найбільш руйнівними й масштабними за наслідками є збройні конфлікти та війни, які останні десять років трапляються все частіше. Так, у період

з 2012 до 2022 рр. збройними конфліктами охоплено 62 країни [1].

Найбільш масштабна війна за останні десятиліття сталася в Україні внаслідок агресії з боку російської федерації.

Збільшення кількості та масштабів конфліктів, інтенсивності використання боєприпасів, а також повільне очищення забруднених територій призводить до зростання територій, забруднених ВНП, і збільшення вражень і загибелі людей унаслідок підриву ВНП.

Вибухи ВНП спричиняють важкі поранення та загибель значної кількості осіб, до того ж необхідно зазначити, що найбільше потерпає цивільне населення, зокрема діти.

Показники, які характеризують процеси пошуку та розпізнавання ВНП, розглянемо за чотирма основними напрямками:

– площа забруднення ВНП;

– кількість нещасних випадків (вражень від вибухів);

- терміни очищення територій;
- економічна оцінка.

Мета статті полягає в розробленні основних положень концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. Для реалізації цієї мети необхідно розв'язати такі **завдання**: проаналізувати наявні підходи щодо застосування традиційних одиничних і комбінованих, а також нетрадиційних (біологічних) методів виявлення вибухонебезпечних предметів, розробити класифікаційну таблицю методів виявлення вибухонебезпечних предметів за фізичними принципами, проаналізувати переваги та недоліки розглянутих методів виявлення вибухонебезпечних предметів, розробити порівняльну таблицю методів виявлення вибухонебезпечних предметів, сформулювати основні положення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів та обґрунтувати напрями подальших досліджень.

Аналіз проблеми та наявних методів виявлення вибухонебезпечних предметів

Площа забруднення ВВП

За оцінками міжнародних організацій, таких як ООН та ОБСЄ, забруднені площі у світі сягають мільйони квадратних кілометрів, крім того, на думку експертної групи Асоціації саперів України, потенційно-небезпечні території, які можуть містити ВВП і підлягають обстеженню для визначення рівня забруднення, становлять щонайменше 132 023 км² [2]. Україна є однією з найбільш замінованих країн світу.

Кількість нещасних випадків (уражень від вибухів)

Території, що забруднені ВВП, є вибухонебезпечними об'єктами (ВНО). Нещасні випадки внаслідок вибуху ВВП призводять до важких поранень і загибелі тисяч людей.

На рис. 1 наведена інформація про жертви від вибухів ВВП за період з 2013 до 2020 рр., а з огляду на війну в Україні 2022 р., ці трагічні показники, імовірно, зростатимуть [3].

До того ж необхідно зазначити, що від ВВП найбільше потерпає цивільне населення. Згідно зі статистикою, жертвами вибухів ВВП стають 10 % військових і 90 % цивільних осіб, зокрема значна

кількість дітей. Останні роки кількість загиблих дітей зростає (рис. 2) [1].

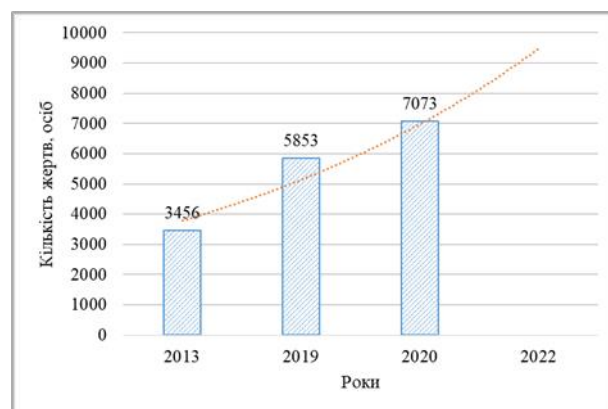


Рис. 1. Статистичні показники щодо жертв від вибухів ВВП

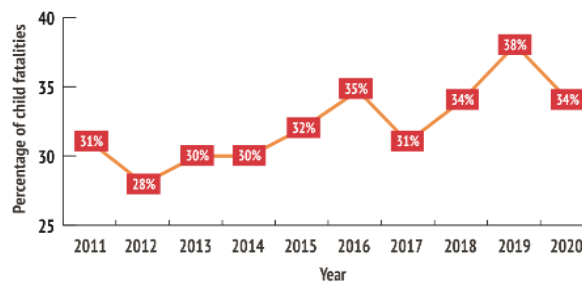


Рис. 2. Відсоток загиблих дітей протягом 2010–2020 рр.

Терміни очищення територій

Розчищення територій від забруднення ВВП потребує великих фінансових витрат і триває десятиріччями. Відповідно до заяви представників Великої Британії, 2020 р. було повністю завершено розмінування території Фолклендських (Мальвінських) островів, що були забруднені ВВП внаслідок війни між Великою Британією та Аргентиною 1982 р. Процес тривав 38 років і фактична середня швидкість становить трохи більше ніж 320 км² на рік. Королівство Камбоджа, де роботи з очищення території тривають понад 30 років, оголосило, що зможе звільнитися від мін лише до 2025 р.

Згідно з інформацією, наведеною в праці [1], упродовж 2020–2021 рр. середні темпи знешкодження залишків касетних боєприпасів становлять 63,39 км² та 61,07 км² 2020 та 2021 рр. відповідно (без урахування робіт в Україні). Показники щодо очищення території України від ВВП, згідно з дослідженням [4], подані в табл. 1.

Таблиця 1. Щорічні темпи очищення території України від ВНП

Період	Кількість залучень піротехнічних підрозділів	Кількість знешкоджених ВНП, од.	Площа очищеної території, кв. км
2014	7 090	151 100	30,30
2015	8 081	50 152	106,67
2016	10 327	80 011	81,53
2017	13 167	112 728	688,36
2018	10 917	168 812	867,20
2019	11 891	67 415	69,49
2020	14 166	73 375	49,39
2021	12 909	89 614	45,52

Економічна оцінка

Війни завжди призводять не тільки до людських втрат, а й завдають значних економічних збитків, як в період воєнних дій, так і після їхнього завершення. Українська економіка, за прогнозами, скоротиться на 45 %, а загальні збитки країни вже оцінюються в мільярди доларів. Тільки в сільському господарстві збитки становлять 4,3 млрд доларів США [5]. Україні потрібно залучати значні фінансові ресурси для розчищення територій. Орієнтовна вартість обстеження та розмінування сільськогосподарських угідь України становить близько 436 млн доларів США. За оцінками Асоціації саперів України, ринкова вартість послуг із гуманітарного розмінування становить 3–4 долари США/м².

Особливості проведення аналізу методів виявлення ВНП

Ураховуючи важливість розчищення територій від ВНП, численні дослідження проводилися щодо: аналізу та класифікації наявних методів пошуку [6–8], сучасних більш ефективних методів, зокрема з одночасним використанням декількох методів, що ґрунтуються на використанні комбінованих методів, коли пошук ведеться зокрема із застосуванням безпілотних апаратів [9–11]. Досліджуються та випробовуються також біологічні методи пошуку, що ґрунтуються на особливих властивостях тварин [12], комах [13] та мікроорганізмів [14].

Необхідно зазначити, що, попри великий обсяг досліджень, класифікації методів розроблені без урахування чіткого розрізнення демаскувальних ознак ВНП, фізичних принципів виявлення й розпізнавання, а також платформ, що використовуються для доправлення устаткування до місця пошуку.

Аналіз показує, що наявні методи виявлення й розпізнавання, залежно від характеристик об'єктів пошуку та навколишніх умов, мають обмеження в імовірності виявлення й не забезпечують необхідного рівня продуктивності пошуку.

Тому актуальними є дослідження, спрямовані на розроблення методології, моделей та інформаційних технологій створення та використання багатопільових безпілотних інтелектуальних систем (ББІС) пошуку та знешкодження ВНП.

Для проведення аналізу методів виявлення ВНП визначимо такі елементи системи: ВНП, перешкоди (покривне та навколишнє середовище); інформаційно-вимірвальні засоби (сенсори), які використовують методи виявлення; платформи, що здійснюють доправлення інформаційно-вимірвальних засобів (ББІС), та елементи інформаційних технологій (ІТ).

Вибухонебезпечні предмети

З огляду на те, що методи виявлення визначаються залежно від об'єктів пошуку та їхніх характеристик, почнемо з розгляду саме об'єктів пошуку (ВНП) та їхніх демаскувальних ознак. На сьогодні розроблено, виготовляється та застосовується понад 700 видів ВНП [15]. Доправлення може здійснюватися різними способами: вручну, літальними апаратами й реактивними снарядами. Демаскувальні ознаки ВНП обумовлені низкою факторів, основні з яких мають місце практично завжди:

- наявність вибухової речовини (ВР);
- наявність локально розташованої маси металу чи іншого матеріалу;
- характерна форма;
- неоднорідності покривного середовища (порушення поверхні ґрунту, кольору рослинності, снігового покриву тощо).

Додатковими демаскувальними факторами є:

- дотові лінії управління;
- годинникові механізми або електронні таймери;
- сейсмічні, магнітні або оптичні датчики цілі;
- антени з радіоприймачем.

Отже, ВВП може виявлятися переважно завдяки трьом факторам: наявності хімічної речовини; характерної конструкції корпусу; порушення ґрунту. Демаскувальні ознаки та перешкоди визначають методи виявлення, розпізнавання та набір інформаційно-вимірвальних засобів.

Для пошуку нових методів виявлення необхідно проаналізувати наявні методи з урахуванням фізичних властивостей демаскувальних ознак та інформаційно-вимірвальних засобів (сенсорів). Тому наведемо класифікацію відомих методів за фізичними принципами, що використовуються для виявлення та розпізнавання ВВП.

Методи виявлення

На відміну від інших авторів [9, 10], нами запропоновано підхід до класифікації, який відрізняється тим, що методи виявлення розглядаються за фізичними принципами взаємодії з демаскувальними ознаками та окремо від інформаційно-вимірвальних засобів і платформ, на яких ці засоби розташовані. Класифікація з урахуванням цих підходів наведена в табл. 2. Розглядати основні методи необхідно разом із параметрами, що впливають на ймовірність виявлення та продуктивність.

Таблиця 2. Класифікація методів виявлення за фізичними принципами

№	Метод	Характеристика
1	Механічний	Контактний
		Механізований
2	Електромагнітний	Радіохвильовий
		Оптичний
		Рентгенівський
		Гамма-випромінювання
3	Хімічний	Газоаналітичний
		Біофізичний
4	Магнітний	Магнітометричний
5	Акустичний	Сейсмоакустичний

До механічних методів виявлення та знешкодження ВВП належать ручні, коли пошук і розмінування виконуються безпосередньо людиною, і механізовані, що виконуються спеціальними

броньованими машинами. Сучасні машини розмінування є більш безпечними та ефективними в розмінуванні ВВП із вмістом вибухівки до 15 кг (наприклад, міни, саморобні вибухові пристрої та касетні боєприпаси). Принцип дії цього методу ґрунтується на механічному пошуку та знешкодженні ВВП. Робочим елементом машин для розмінування є приводи з цівками, фрезами, культиваторами та спеціальними захватами [16]. Для підвищення якості знешкодження застосовуються комбіновані системи, наприклад, культиватора та цівків. Такі платформи багатofункціональні, на них можна встановлювати різні інструменти, системи пошуку, навігації, дистанційного керування тощо. Основні технічні характеристики розглянемо на прикладі платформи *MineWolf MW370* компанії *Pearson Engineering*: вага 23 т, ширина очищення 2,75 м, глибина очищення до 350 мм, швидкість очищення до 2,3 км/год, продуктивність розмінування до 30 000 м²/день, витрати палива 40–50 л/г і відстань дистанційного керування до 1000 м [17].

Отже, механічний метод виявлення та розмінування є простим, але забезпечує високу ймовірність виявлення та знешкодження ВВП, а потужний броньований захист і системи дистанційного керування зменшують ризик травмування технічного персоналу.

Недоліки:

- незначна продуктивність та обмеженість використання залежно від рельєфу (неможливість працювати на мокрому та кам'янистому ґрунті, на уклінах понад 35°);
- високі вартість обладнання та витрати на виконання робіт;
- певні пошкодження екології.

Електромагнітні методи – це загальна назва групи методів, що працюють у різних частотних діапазонах і широко застосовуються для виявлення, побудови зображень та визначення властивостей об'єктів, що розташовані, зокрема, в оптично непрозорих середовищах, таких як ґрунт, бетон, цегляна кладка, асфальт, камінь, дерево та лід. Виявлення ВВП за допомогою електромагнітних методів ґрунтується на відмінності електромагнітних властивостей об'єкта та перешкод.

Умовно електромагнітне випромінювання, залежно від використовуваних частот, поділяється на: радіохвильове, оптичне, іонізуюче (рентгенівське та гамма-) випромінювання.

Системи, створені на базі цих методів, відрізняються робочою частотою, смугою електромагнітного спектра, типом сигналів, що передаються, інтерпретацією відбитих сигналів, типом передавача та приймача, а також алгоритмами оброблення.

Радіохвильовий метод – це найбільш поширений метод виявлення. На базі цього методу побудовані металодетектори (*Metal Detector*, MD), георадари (*Ground Penetrating Radar*, GPR), мікрохвильові радары (MWR), радары міліметрового діапазону (MMWR), радары електроімпедансної томографії (EIT).

Метод електромагнітної індукції (EMI) використовується в металодетекторах. Переваги цього методу – здатність виявляти металеві предмети розміром меншим за 1 см на глибині 50 см [18], незалежність від погодних умов і вологості ґрунту, низька вартість.

Недоліки методу:

- нездатність виявляти ВНП із незначним вмістом металу (наприклад, у пластиковому корпусі);
- неможливість розрізнити ВНП та металеві уламки, що спричиняє високий відсоток помилкових тривог;
- мала дистанція пошуку.

Георадари, радіолокаторы підповерхневого зондування або підповерхневі радіолокаторы – це загальна назва радіолокаційних пристроїв, що реалізують технології використання електромагнітних хвиль для побудови зображень і визначення властивостей об'єктів, що розташовані в оптично непрозорих середовищах, таких як, наприклад, ґрунт, бетон, цегла, асфальт, камінь, дерево та лід. Зазвичай, радіолокатор такого типу з дальністю дії 1 м працює в діапазоні частот від 300 МГц до 3300 МГц [19].

Для підвищення ймовірності виявлення та мінімізації хибних спрацьовувань застосовується поєднання методів: георадара та високочутливого металодетектора. Ці технології успішно використовуються для створення ручних мобільних приладів.

Розглянуті два методи реалізовані в міношукачі AN/PSS-14, спеціально розробленому для армії США. Додатково було застосовано алгоритми оброблення інформації, що забезпечило високі технічні характеристики за умови малої ваги: ймовірність виявлення до 98,7 %, глибина виявлення ВНП до 300 мм, швидкість пошуку 3,2 м/хв, відстань сканування до 10 см, дистанційне керування не передбачено [20].

Мікрохвильові радары основані на використанні коротких радіоімпульсів та вимірюванні часу

повернення відбитків. Відображення виникають на межах матеріалів із різною діелектричною проникністю. Підвищення частоти передачі забезпечує підвищення роздільної здатності, але водночас зростають і втрати в перешкодах.

Оптичний. Випромінювання в оптичному діапазоні (довжина хвилі 380–780 нм, частота $7,89 \times 10^{14}$ – $3,84 \times 10^{14}$ Гц) умовно поділене на ультрафіолетове, видиме та інфрачервоне. Методи, що застосовують фізичні властивості цього випромінювання, успішно використовуються для виявлення та розпізнавання ВНП.

Ультрафіолетове випромінювання охоплює діапазон довжин хвиль 100–400 нм. У цьому діапазоні прямих демаскувальних ознак ВНП не виявлено, але в процесі застосування певного зовнішнього впливу, можуть з'являтися додаткові демаскувальні ознаки. Наприклад, у разі розпилення над забрудненою територією спеціального штаму бактерій, які проростають за декілька годин і флуоресціюють під ультрафіолетовим випромінюванням за наявності в ґрунті вибухових речовин [14].

Видиме випромінювання, що використовується для виявлення ВНП, передбачає захоплення світла у видимому діапазоні хвиль за допомогою оптичної системи для формування зображень. Використання сучасних широкоформатних багатоспектральних фотокамер дає змогу обстежувати значні території за короткий термін. Швидкість обстеження визначається швидкістю платформи, на якій розташовані оптичні сенсори. У разі використання літальних апаратів швидкість обстеження може перевищувати 100 км/год.

ВМС США продемонстрували прототип єдиної системи багатоцільового виявлення мін із повітря (SMAMD), розроблений компанією *BAE Systems*. У системі SMAMD використовується набір бортових оптичних датчиків, розміщених на борту безпілотного літального апарата (БПЛА) *MQ-8C Fire Scout* [21].

Обмеженням цього методу є те, що виявляти можна тільки ВНП, які розташовані на поверхні ґрунту. Також на якість виявлення впливають погодні умови та наявність маскувальних факторів (камуфляж, рослинність тощо).

Використання **інфрачервоного випромінювання** для виявлення ВНП основане на наявності різниці теплових характеристик між похованими об'єктами

та навколишнім ґрунтом, що призводить до різниці температур між похованим об'єктом і ґрунтом. Цей температурний контраст вимірюється за допомогою термографічної камери, яка виявляє випромінювання в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра.

Перевагами методу є те, що він пасивний, отже, не впливає на системи керування ВНП, які можуть спричинити вибух; також цей метод дозволяє підвищувати швидкість / продуктивність обстеження за допомогою застосування БПЛА як платформи.

Недоліки: на якість виявлення впливають параметри навколишнього середовища (сонячне світло, дощ та ін.) та перешкоди (покривний шар ґрунту, рослинність тощо). Це значно звужує можливості застосування.

Рентгенівське випромінювання. Фотони характеристичного (тобто що випускається під час переходів в електронних оболонках атомів) рентгенівського випромінювання мають енергію від 10 еВ до 250 кеВ, що відповідає випромінюванню з частотою від 3×10^{16} до 3×10^{19} Гц і довжиною хвилі 0,005–100 нм. Цей метод ґрунтується на тому, що спостережувані частоти залежать від взаємодії між електричним квадрупольним моментом ядра та градієнтом електричного поля, що створюється в ядерному центрі зовнішніми зарядами. Усі звичайні вибухові речовини містять квадрупольне ядро, яке генерує три набори резонансних частот, забезпечуючи однозначний метод виявлення та ідентифікації вибухової речовини [22]. Він є похідним від ядерного магнітного резонансу та використовується без зовнішнього магнітного поля. *Недоліком* методу є виявлення тільки однієї групи, яка має бути відома заздалегідь.

Гамма-випромінювання. Ядерно-фізичні методи розрізняють за типом і енергією, що використовує джерело нейтронів, а також видом і енергією вторинного гамма-випромінювання, яке виникає під час взаємодії нейтрона з об'єктом пошуку – азотом (вуглецем чи киснем), що міститься у вибуховій речовині.

Недоліком цих приладів, що впливає із фізичного принципу їхньої роботи, можна вважати те, що вони не мають вибірковості щодо вибухових або наркотичних речовин.

Хімічний метод. Широке застосування набув хімічний аналіз повітря на наявність випарів у місцях розташування ВНП. Він ґрунтується на виявленні та кількісній оцінці специфічних хімічних вибухових речовин та їхніх компонентів, які містяться у ВНП

і дифундують у навколишнє середовище. Цей метод дає змогу виявляти сліди вибухових речовин у ґрунті або в повітрі в місцях встановлення ВНП. Дифузія речовин на поверхню відбувається в малих кількостях і залежить від конструкції ВНП, що вкривають середовище та погодні умови.

Ураховуючи малі концентрації речовин, неоднорідність поширення, різноманітні маскувальні фактори, необхідно застосовувати дуже чутливі датчики. Вважаємо, доцільною є думка, що цей метод містить газоаналітичні та біофізичні методи.

Газоаналітичні прилади є досить численним класом і забезпечують високу чутливість. Газоаналітичні методи здебільшого стосуються випарів тротилу, гексогену та ПЕТ, тому їх можна розглядати як підземні джерела пари. Ця пара може транспортуватися за допомогою таких явищ, як молекулярна дифузія та процеси турбулентності. Ідея цього методу полягає у створенні газових датчиків, здатних виявляти малі концентрації хімічних речовин ВНП. Існують певні обмеження в цій галузі досліджень, що пояснюється неможливістю встановити мінімальний рівень виявлення через мінливу природу парів.

Біофізичні методи. Необхідно наголосити на успішному використанні тварин для пошуку ВНП за хімічними ознаками. Для виявлення ВНП ще за часів Другої світової війни застосовувалися собаки (*Mine detection dog*, MDD). Окрім собак, у різних країнах ведуться дослідження з використання інших тварин для пошуку ВНП, які більш пристосовані для певних територій і дозволяють зменшити витрати на вирощування та підготовку [12].

За програмою *HeroRATs* ведуться роботи з використання африканських гігантських мішкоподібних щурів (*Mine detection rat*, MDR), які допомагають знаходити наземні міни [23]. Навчені щури можуть обстежити територію розміром із тенісний корт (23,77x10,97 м) за 30 хв. Також вивчаються особливості використання для пошуку ВНП інших тварин та комах. Необхідно зазначити, що тварини мають і кращі газоаналітичні здібності, ніж електронні газоаналізатори. Це дає змогу виявляти вибухові речовини в нижчих концентраціях та з більшою ймовірністю.

За інформацією *Marshall Legacy Institute* (MLI) [24], MDD-команди зазвичай здійснюють пошук не тільки у 30 разів швидше, ніж команди, які використовують ручний спосіб пошуку, а й безпечніше. Жоден із фахівців з MDD не загинув під час операцій з розмінування.

Штучне виявлення випарів конкурує з тваринами або використовується разом із ними. Однак тварини більш чутливі та можуть виявляти багато різних запахів одночасно, що досить важко відтворити штучно.

Окремо необхідно наголосити на перспективах застосування тварин у створенні інтелектуальних автоматизованих систем виявлення і знешкодження ВВП. Концепція основана на розміщенні на тваринах мобільної інтелектуальної системи, яка забезпечує навігацію, дистанційне наведення та спостереження. Такі системи підвищують імовірності виявлення ВВП.

Недоліками газоаналітичних методів є:

- необхідність переладнання / перенавчання в разі появи нових хімічних компонентів у ВВП;
- велика залежність якості вимірювань від навколишнього середовища та погодних умов;
- робота в небезпечній зоні (безпосередньо біля ВВП).

Магнітометричний метод. Використання магнітометрів як металопшукачів основане на явищі локального спотворення природного магнітного поля Землі феромагнітними матеріалами, наприклад залізом. Порівняно з розглянутими вище принципами, магнітометри мають набагато більшу дальність виявлення залізних предметів. Залізні предмети створюють аномалії, які фіксуються цими приладами.

Цей принцип розвивається з метою розроблення якісного відеоаналізу, схованого під поверхнею об'єкта, силові магнітні лінії від якого знімають магнітометром.

Основні *переваги* цього методу:

- можливість виявлення у природних покривних середовищах;
- більша глибина й висока швидкість пошуку.

Недоліки методу:

- не детектує діелектричні матеріали;
- низька вибірковість та завадостійкість.

Акустичний метод. Акустичні хвилі можуть бути ефективним інструментом для виявлення та ідентифікації наземних мін. Ультразвукові методи та методи перетворення акустичних даних на сейсмічні (A/S) є поширеними методами акустичного виявлення. *Недоліками* цього методу є низька роздільна здатність та залежність від щільності ґрунту. Тому цей метод має малу ефективність для пошуку ВВП, особливо за наявності декількох перешкод із різними властивостями, наприклад, повітря-ґрунт.

За результатами аналізу методів виявлення та розпізнавання, визначені основні характеристики

та виконане порівняння. Результати порівняння методів виявлення за основними характеристиками наведені в табл. 3.

Концепція гарантованого виявлення й розпізнавання вибухонебезпечних предметів

Аналіз методів дає змогу зробити висновок про суперечність між (а) – необхідністю підвищення продуктивності обстеження територій із високою ймовірністю наявності різних типів вибухонебезпечних предметів та забезпечення необхідної достовірності їхньої ідентифікації для знешкодження, а також (б) – наявністю методів і технологічних рішень мобільних роботизованих комплексів, а саме флотів БПЛА, з одного боку, та відсутністю цілісної концепції, методів, засобів і технологій створення і використання багатоцільових надійних і безпечних інтелектуальних систем БПЛА для пошуку та розпізнавання ВВП, з іншого боку.

Для подолання цієї суперечності важливо, насамперед, створити концепцію, на основі якої розробити методологію, моделі та інформаційні технології гарантованого виявлення і розпізнавання ВВП з використанням мобільних розподілених багатOVERсійних інтелектуальних систем. Принципи побудови та застосування, математичні моделі та методи забезпечення надійності та безпечності таких систем запропоновано та досліджено в роботах [25, 26].

Концепція ґрунтується на двох положеннях, що поєднують прагнення забезпечити високу продуктивність і достовірність пошуку, виявлення та розпізнавання ВВП для їхнього подальшого знешкодження.

По-перше, високопродуктивне виявлення ВВП на визначеній території забезпечується шляхом:

- застосування багатофункційного флоту БПЛА, оснащеного різними типами інформаційно-вимірювальних засобів;
- планування оптимальних маршрутів руху БПЛА з урахуванням багатопараметричного покриття під час виконання поставлених завдань.

По-друге, висока достовірність виявлення і розпізнавання ВВП досягається шляхом:

- дворівневого інтелектуального оброблення інформації в розподіленій архітектурі літальних граничних обчислень (*Flying Edge Computing*) з урахуванням кореляції інформації, отриманої від БПЛА з різними інформаційно-вимірювальними засобами;

– донавання відповідних неймережних структур упродовж виконання завдань на різних територіях.

Запропонована концепція гарантованого пошуку та розпізнавання ВВП дає змогу сформулювати завдання, що необхідно розв'язати для її реалізації:

– розробити методологію (концепцію, принципи та структуру взаємозв'язків моделей, методів, програмно-апаратних засобів та інформаційних технологій) створення та використання надійних і безпечних ББІС пошуку та знешкодження ВВП;

– розробити системні моделі та комплекс показників ефективності надійних і безпечних ББІС;

– розробити та дослідити моделі та ієрархічні структури бортових комплексів ББІС для пошуку, ідентифікації та знешкодження ВВП із різними

варіантами розподілу функцій та конфігурування апаратних і програмних компонентів;

– удосконалити методи пошуку та виявлення ВВП із застосуванням ББІС;

– розробити та вдосконалити методи планування використання ББІС пошуку та знешкодження ВВП на територіях із фіксованою конфігурацією та типами ВВП;

– розробити та дослідити моделі та методи підвищення надійності ББІС та їхніх компонентів;

– розробити структуру та засоби ІТ для створення, планування використання та забезпечення надійного функціонування ББІС пошуку та знешкодження ВВП;

– розробити та дослідити модель і метод аналізу та оцінювання ризику виникнення небезпечного стану "підрив на вибухонебезпечному предметі".

Таблиця 3. Порівняння методів виявлення ВВП

Характеристика	Контактний	Механізований	Радіохвильовий	Оптичний	Рентгенівське випромінювання	Гамма-випромінювання	Газоаналітичний	Біофізичний	Магнітометричний	Сейсмоакустичний
Тип взаємодії з ВВП (А – активний, П – пасивний)	А	А	А	П	А	А	П	П	П	А
Тип платформи (Ст – стаціонарний, Моб – мобільний)	Ст	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Моб	Ст
Потенційна продуктивність	Low	Medium	High	High	Medium	Medium	Medium	Medium	High	Low
<i>Підтримка інформаційних технологій</i>										
Оброблення даних та їхнє зберігання	–	–	+	+	+	+	–	–	+	+
Доступ до мережі та покриття	–	–	+	+	+	+	–	–	+	–
Передача даних у режимі реального часу	–	–	+	+	+	+	–	–	+	–
<i>Параметри якості</i>										
Безпека під час виконання робіт	Low	Medium	High	Low	High	High	High	High	Low	Medium
Імовірність виявлення	High	High	Medium	Low	High	High	High	High	Medium	Medium
Роздільна здатність (вибірковість)	High	Low	Medium	Medium	High	High	High	Low	Low	Low
Надійність	High	High	High	High	High	High	Low	Low	Medium	Medium
<i>Економічні показники</i>										
Вартість	Low	Medium	Medium	Medium	High	High	Medium	Low	Medium	Medium

Висновки

За результатами виконаного аналізу методів виявлення ВВП можна зробити висновки, що:

– зростання кількості та інтенсивності озброєних конфліктів і війн у світі, висока інтенсивність

застосування боеприпасів різних типів та інтенсивність використання призводить до збільшення площі територій, забруднених ВВП;

– низька продуктивність наявних методів не дозволяє швидко й ефективно розчищати забруднені ВВП території, що призводить до значної

кількості уражень і загибелі людей унаслідок підриву ВВП;

– самостійне використання окремих методів не може суттєво підвищити ймовірність виявлення ВВП;

– для підвищення продуктивності та безпеки виконання робіт із пошуку та знешкодження ВВП доцільно використовувати безпілотні інтелектуальні платформи доправлення інформаційно-вимірювальних засобів.

Подальші дослідження доцільно проводити таким чином: проаналізувати стан і тенденції розвитку методів, технологій і математичного апарата для створення та застосування систем виявлення й розпізнавання ВВП на базі флотів БПЛА та інших роботизованих засобів (ББІС); удосконалити методи пошуку та виявлення ВВП із застосуванням БПЛА; дослідити методи підвищення ефективності пошуку ВВП за допомогою використання програмно-апаратних засобів та інформаційних технологій.

Список літератури

1. Landmine Monitor 2022. URL: <http://www.the-monitor.org/en-gb/reports/2022/landmine-monitor-2022.aspx> (дата звернення: 18.11.2022).
2. Ukraine: Mine Action – 5W Situation Report (as of 01 June 2022). URL: <https://reliefweb.int/report/ukraine/ukraine-mine-action-5w-situation-report-01-june-2022> (дата звернення: 18.11.2022).
3. Kenny P. Landmines killed 7,073 in 2020, says UN institute. URL: <https://www.aa.com.tr/en/world/landmines-killed-7-073-in-2020-says-un-institute/2417253> (дата звернення: 18.11.2022).
4. Аналіз виконання робіт щодо очищення території України від вибухонебезпечних предметів у 2021 році. URL: <https://dsns.gov.ua/uk/protiminna-diyalnist/gumanitarne-rozminuvannya> (дата звернення: 18.11.2022).
5. Огляд збитків від війни в сільському господарстві України: непряма оцінка пошкоджень. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2022/06/Damages_report_issue1_ua-1.pdf (дата звернення: 18.11.2022).
6. Robledo L., Carrasco M., Mery D. A survey of land mine detection technology. *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30. Issue 9. P. 2399–2410. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802549435>
7. Kasban H., Zahran O., Elaraby S. M., El-Kordy M., Abd El-Samie F. E. A comparative study of landmine detection techniques. *Sensing and Imaging*. 2010. Vol. 11. Issue 3. P. 89–112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11220-010-0054-x>
8. Гайдарли Г. С. Розмінування території і об'єктів інженерними підрозділами збройних сил України у міжнародних операціях з підтримання миру і безпеки (1992–2018): дис. канд. іст. наук: 20.02.22. Київ, 2020. 274 с.
9. Молочко С. М., Башинський В. Г., Каламурза О. Г., Журахов В. А. Аналіз сучасного стану, характеристик та перспектив розвитку датчиків виявлення вибухонебезпечних предметів, встановлених на БпАК. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*. 2021. № 2 (8). С. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.8.2021.09>
10. Fernandez M. G., Lopez Y. A., Arbolea A. A., Valdes B. G., Vaqueiro Y. R., Andres F. L. H., Garcia A. P. Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 45100–45112. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863572>
11. Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 2015. Vol. 81. Issue 4. P. 281–329. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>
12. Field trials of the smart system and technical survey dogs in Cambodia: Final report 2021. URL: https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/SMART_Cambodia_v13_1__01.pdf (дата звернення: 18.11.2022).
13. Filipi J., Stojnić V., Muštra M., Gillanders R. N., Jovanović V., Gajić S., Turnbull G. A., Babić Z., Kezić N., Risojević V. Honeybee-based biohybrid system for landmine detection. *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150041>
14. Shemer B., Palevsky N., Yagur-Kroll S., Belkin S. Genetically engineered microorganisms for the detection of explosives' residues. *Frontiers in Microbiology*. 2015. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01175>
15. Challenges for Mine Action due to russian aggression against Ukraine. URL: https://www.mineaction.org/sites/default/files/2.1.1_challenges_for_mine_action_in_ukraine.pdf (дата звернення: 18.11.2022).
16. A Study of Mechanical Application in Demining. URL: https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/Mechanical_study_complete.pdf (дата звернення: 18.11.2022).
17. The MW370 is a powerful mine and route clearance platform used for the effective clearance of landmines across large areas. URL: <https://www.pearson-eng.com/product/mw370/> (дата звернення: 18.11.2022).
18. van Verre W., Podd F. J., Daniels D. J., Peyton A. J. A Review of Passive and Active Ultra-Wideband Baluns for Use in Ground Penetrating Radar. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Issue 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13101899>
19. Song X., Liu T., Xiang D., Su Y. GPR Antipersonnel Mine Detection Based on Tensor Robust Principal Analysis. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. Issue 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11080984>

20. Schweitzer K. M., Davis B. M., Pettijohn B. A., Clark R. D., Davison A. D., Staszewski J. J. Optimization of Army-Navy/Portable Special Search (AN/PSS)-14 Operator Training. URL: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA457012.pdf> (дата звернення: 18.11.2022).
21. U.S. Navy Demos MCM Equipment Prototype On MQ-8C. URL: <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/07/u-s-navy-demos-mcm-equipment-prototype-on-mq-8c> (дата звернення: 18.11.2022).
22. Вишва С. А., Онищук І. І., Черняєв О. П. Ядерна геофізика: підручник. Київ. Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2012. 608 с.
23. Efficiency and Effectiveness Study using MDR capability. URL: <https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/АРОПО-GICHD-Mine-Detection-Rats-30Jun2016.pdf> (дата звернення: 18.11.2022).
24. Mine detection dog programs. URL: <https://www.marshall-legacy.org/mine-detection-dog-programs> (дата звернення: 18.11.2022).
25. Kharchenko V., Kliushnikov I., Rucinski A., Fesenko H., Illiashenko O. UAV Fleet as a Dependable Service for Smart Cities: Model-Based Assessment and Application. *Smart Cities*. 2022. Vol. 5. Issue 3. P. 1151–1178. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities5030058>
26. Sun Y., Fesenko H., Kharchenko V., Zhong L., Kliushnikov I., Illiashenko O., Morozova O., Sachenko A. UAV and IoT-Based Systems for the Monitoring of Industrial Facilities Using Digital Twins: Methodology, Reliability Models, and Application. *Sensors*. Vol. 22. Issue 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22176444>

References

1. "Landmine Monitor 2022", available at: <http://www.the-monitor.org/en-gb/reports/2022/landmine-monitor-2022.aspx> (last accessed 18.11.2022).
2. "Ukraine: Mine Action – 5W Situation Report (as of 01 June 2022)", available at: <https://reliefweb.int/report/ukraine/ukraine-mine-action-5w-situation-report-01-june-2022> (last accessed 18.11.2022).
3. Kenny, P., "Landmines killed 7,073 in 2020, says UN institute", available at: <https://www.aa.com.tr/en/world/landmines-killed-7-073-in-2020-says-un-institute/2417253> (last accessed 18.11.2022).
4. "An analysis of work on cleaning the territory of Ukraine from explosive objects in 2021" ["Analiz vykonannya robot shchodo ochyshchennia terytorii Ukrainy vid vybukhonebezpechnykh predmetiv u 2021 rotsi"], available at: <https://dns.gov.ua/uk/protiminna-diyalnist/gumanitarne-rozminuvannya> (last accessed 18.11.2022).
5. "Review of war damage in the agriculture of Ukraine: an indirect damage assessment" ["Ohliad zbytkiv vid viiny v silskomu hospodarstvi Ukrainy: nepriama otsinka poshkodzhen"], available at: https://kse.ua/wp-content/uploads/2022/06/Damages_report_issue1_ua-1.pdf (last accessed 18.11.2022).
6. Robledo, L., Carrasco, M., Mery, D. (2009), "A survey of land mine detection technology", *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 30, Issue 9, P. 2399–2410. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802549435>
7. Kasban, H., Zahran, O., Elaraby, S. M., El-Kordy, M., Abd El-Samie, F. E. (2010), "A comparative study of landmine detection techniques", *Sensing and Imaging*, Vol. 11, Issue 3, P. 89–112. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11220-010-0054-x>
8. Haidarly, H. S. (2020), *Demining of territory and facilities by engineering units of the Armed Forces of Ukraine in international operations to maintain peace and security (1992–2018)* [Rozminuvannya terytorii i ob'ektiv inzhenernymy pidrozdilamy zbroinykh syl Ukrainy u mizhnarodnykh operatsiakh z pidtrymannia myru i bezpeky (1992–2018)]: PhD Dissertation: 20.02.22, Kyiv, 2020, 274 p.
9. Molochko, S. M., Bashynskiy, V. H., Kalamurza, O. H., Zhurakhov, V. A. (2021), "Analysis of the current state, characteristics and prospects for the development of sensors for detecting explosive objects installed on UAC" ["Analiz suchasnoho stanu, kharakterystyk ta perspektyv rozvytku datchykyv vyjavlennia vybukhonebezpechnykh predmetiv, vstanovlenykh na BpAK"], *Scientific works of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification* [Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho naukovo-doslidnoho instytutu vyprobuvan i sertyfikatsii ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky], No. 2 (8), P. 80–90. DOI: <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.8.2021.09>
10. Fernandez, M. G., Lopez, Y. A., Arboleya, A. A., Valdes, B. G., Vaqueiro, Y. R., Andres, F. L. H., Garcia, A. P. (2018), "Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle", *IEEE Access*, Vol. 6, P. 45100–45112. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863572>
11. Pajares, G. (2015), "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 81, Issue 4, P. 281–329. DOI: <https://doi.org/10.14358/PERS.81.4.281>
12. "Field trials of the smart system and technical survey dogs in Cambodia: Final report 2021", available at: https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/SMART_Cambodia_v13_1_01.pdf (last accessed 18.11.2022).
13. Filipi, J., Stojnić, V., Muštra, M., Gillanders, R. N., Jovanović, V., Gajić, S., Turnbull, G. A., Babić, Z., Kezić, N., Risojević, V. (2022), "Honeybee-based biohybrid system for landmine detection", *Science of The Total Environment*, Vol. 803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150041>
14. Shemer, B., Palevsky, N., Yagur-Kroll, S., Belkin, S. (2015), "Genetically engineered microorganisms for the detection of explosives' residues", *Frontiers in Microbiology*, Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01175>
15. "Challenges for Mine Action due to russian aggression against Ukraine", available at: https://www.mineaction.org/sites/default/files/2.1.1_challenges_for_mine_action_in_ukraine.pdf (last accessed 18.11.2022).

16. "A Study of Mechanical Application in Demining", available at: https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/Mechanical_study_complete.pdf (last accessed 18.11.2022).
17. "The MW370 is a powerful mine and route clearance platform used for the effective clearance of landmines across large areas", available at: <https://www.pearson-eng.com/product/mw370/> (last accessed 18.11.2022).
18. van Verre, W., Podd, F. J., Daniels, D. J., Peyton, A. J. (2021), "A Review of Passive and Active Ultra-Wideband Baluns for Use in Ground Penetrating Radar", *Remote Sensing*, Vol. 13, Issue 10. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13101899>
19. Song, X., Liu, T., Xiang, D., Su, Y. (2019), "GPR Antipersonnel Mine Detection Based on Tensor Robust Principal Analysis", *Remote Sensing*, Vol. 11, Issue 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11080984>
20. Schweitzer, K. M., Davis, B. M., Pettijohn, B. A., Clark, R. D., Davison, A. D., Staszewski, J. J., "Optimization of Army-Navy/Portable Special Search (AN/PSS)-14 Operator Training", available at: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA457012.pdf> (last accessed 18.11.2022).
21. "U.S. Navy Demos MCM Equipment Prototype On MQ-8C", available at: <https://www.navalnews.com/naval-news/2022/07/u-s-navy-demos-mcm-equipment-prototype-on-mq-8c> (last accessed 18.11.2022).
22. Vyzhva, S. A., Onyshchuk, I. I., Cherniaiev, O. P (2012), *Nuclear geophysics [Yaderna heofizyka]: textbook*, Vydavnycho-polihrfichnyi tsentr "Kyivskiy universytet", Kyiv, 608 p.
23. "Efficiency and Effectiveness Study using MDR capability", available at: <https://www.gichd.org/fileadmin/GICHD-resources/rec-documents/APOPO-GICHD-Mine-Detection-Rats-30Jun2016.pdf> (last accessed 18.11.2022).
24. "Mine detection dog programs", available at: <https://www.marshall-legacy.org/mine-detection-dog-programs> (last accessed 18.11.2022).
25. Kharchenko, V., Kliushnikov, I., Rucinski, A., Fesenko, H., Illiashenko, O. (2022), "UAV Fleet as a Dependable Service for Smart Cities: Model-Based Assessment and Application", *Smart Cities*, Vol. 5, Issue 3, P. 1151–1178. DOI: <https://doi.org/10.3390/smartcities5030058>
26. Sun, Y., Fesenko, H., Kharchenko, V., Zhong, L., Kliushnikov, I., Illiashenko, O., Morozova, O., Sachenko, A. (2022), "UAV and IoT-Based Systems for the Monitoring of Industrial Facilities Using Digital Twins: Methodology, Reliability Models, and Application", *Sensors*, Vol. 22, Issue 17. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22176444>

Received 01.12.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Федоренко Геннадій Леонідович – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", докторант кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: g.fedorenko@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0162-7422>

Федоренко Геннадий Леонидович – кандидат технических наук, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", докторант кафедры компьютерных систем, сетей и кибербезопасности, Харьков, Украина.

Fedorenko Gennadiy – PhD, Doctoral candidate of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department of National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

Фесенко Герман Вікторович – доктор технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", професор кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: h.fesenko@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4084-2101>

Фесенко Герман Викторович – доктор технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", профессор кафедры компьютерных систем, сетей и кибербезопасности, Харьков, Украина.

Fesenko Herman – Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department of National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

Харченко Вячеслав Сергійович – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки, Харків, Україна; e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5352-077X>

Харченко Вячеслав Сергеевич – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", заведующий кафедрой компьютерных систем, сетей и кибербезопасности, Харьков, Украина.

Kharchenko Vyacheslav – Doctor of Sciences (Engineering), Head of Computer Systems, Networks and Cybersecurity Department of National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

ANALYSIS OF METHODS AND DEVELOPMENT OF THE CONCEPT OF GUARANTEED DETECTION AND RECOGNITION OF EXPLOSIVE OBJECTS

The **subject** of the article are the methods of detection and recognition of explosive objects. The **aim** of the work is to develop the main provisions of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects. The following **tasks** were solved

in the article: an analysis of existing approaches to the use of traditional single and combined, as well as non-traditional (biological) methods of detecting explosive objects, development of a classification table of methods of detection of explosive objects according to physical principles, analysis of advantages and disadvantages of the considered methods of detection of explosive objects, development of comparative table methods of detecting explosive objects, formulation of the introductory provisions of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects. The following **methods** are used – methods of comparison, methods of abstraction, methods of analysis and synthesis, methods of scientific induction. The following results were obtained – an analysis of the features of the existing traditional and non-traditional (biological) methods of detecting explosive objects was carried out. A classification of methods for detecting explosive objects is proposed, taking into account the parameters that affect the probability of detection and productivity. The results of a comparative analysis of explosive object detection methods are presented in tabular form according to the following indicators: type of interaction with explosive objects, platform type, potential productivity, information technology support, quality parameters, and economic indicators. The main provisions of guaranteed detection and recognition of explosive objects are formulated. **Conclusions:** the low productivity of the existing methods does not allow for quick and effective clearing of the territory contaminated by explosive objects, which leads to a large number of injuries and deaths of people due to the detonation of explosive objects. The use of individual detection methods alone cannot significantly increase the probability of detecting explosive objects. To increase the productivity and safety of the search and disposal of explosive objects, it is advisable to use unmanned intelligent platforms to deliver information and measurement tools.

Keywords: methods of detection and recognition; explosive objects; unmanned aerial vehicles; performance; probability of detection.

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ ГАРАНТИРОВАННОГО ВЫЯВЛЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ПРЕДМЕТОВ

Предметом исследования в статье являются методы выявления и распознавания взрывоопасных предметов. **Цель** работы – разработка основных положений концепции гарантированного обнаружения и распознавания взрывоопасных предметов. В статье решаются следующие **задачи:** анализ существующих подходов по применению традиционных единичных и комбинированных, а также нетрадиционных (биологических) методов обнаружения взрывоопасных предметов, разработка классификационной таблицы методов обнаружения взрывоопасных предметов по физическим принципам, анализ преимуществ и недостатков рассмотренных методов обнаружения взрывоопасных предметов, разработка сравнительной таблицы методов обнаружения взрывоопасных предметов, формулирование основных положений концепции гарантированного обнаружения и распознавания взрывоопасных предметов. Используются следующие **методы:** сравнение, абстрагирование, анализ и синтез, научная индукция. Получены следующие **результаты:** проведен анализ особенностей существующих традиционных и нетрадиционных (биологических) методов обнаружения взрывоопасных предметов. Предложена классификация методов обнаружения взрывоопасных предметов с учетом параметров, влияющих на вероятность обнаружения и производительность. В табличном виде представлены результаты сравнительного анализа методов обнаружения взрывоопасных предметов по следующим показателям: тип взаимодействия с взрывоопасными предметами, тип платформы, потенциальная производительность, поддержка информационных технологий, параметры качества, экономические показатели. Сформулированы основные положения концепции гарантированного обнаружения и распознавания взрывоопасных предметов. **Выводы.** Низкая производительность существующих методов не позволяет быстро и эффективно расчищать загрязненные взрывоопасными предметами территории, что приводит к большому количеству поражений и гибели людей в результате взрыва взрывоопасных предметов. Самостоятельное использование отдельных методов обнаружения не может существенно повысить вероятность обнаружения взрывоопасных предметов. Для повышения производительности и безопасности выполнения работ по поиску и обезвреживанию взрывоопасных предметов целесообразно использовать беспилотные интеллектуальные платформы доставки информационно-измерительных средств.

Ключевые слова: методы обнаружения и распознавания; взрывоопасные предметы; беспилотные аппараты; производительность; вероятность обнаружения.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Федоренко Г. Л., Фесенко Г. В., Харченко В. С. Аналіз методів і розроблення концепції гарантованого виявлення та розпізнавання вибухонебезпечних предметів. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2022. № 4 (22). С. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.020>

Fedorenko, G., Fesenko, H., Kharchenko, V. (2022), "Analysis of methods and development of the concept of guaranteed detection and recognition of explosive objects", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (22), P. 20–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.22.020>