



УДК: 629.7.052

МРНТИ 73.37.81

https://doi.org/10.53364/24138614_2025_37_2_6

А. Е. Комекбаев^{1*}, К. А. Алипбаев², А. Е. Аден³, Е. Е. Оразалы⁴

¹Казахский Национальный Университет имени Аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

^{2, 3, 4}Алматинский университет энергетики и связи им Г. Даукеева, г. Алматы, Казахстан

¹E-mail: komekbayev_arman1@live.kaznu.kz

ОБЗОР МИРОВОГО ОПЫТА СОЗДАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ПОИСКА И ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ МИН

Аннотация. Современные вооруженные конфликты и их последствия привели к значительному увеличению числа заминированных территорий по всему миру, создавая угрозу для мирного населения и препятствуя восстановлению пострадавших регионов. В данной статье рассматривается мировой опыт создания и применения роботизированных комплексов для поиска и обезвреживания мин. Анализируются современные технологии, включая искусственный интеллект, мультисенсорные системы, беспилотные летательные аппараты и наземные платформы, обеспечивающие повышение эффективности разминирования.

Особое внимание уделяется перспективам использования алгоритмов глубокого обучения для детекции мин и неразорвавшихся боеприпасов, а также интеграции автономных систем для работы в сложных условиях. Обсуждаются ключевые вызовы, такие как высокая стоимость оборудования, необходимость снижения ложных срабатываний и адаптация технологий к различным боевым и гуманитарным сценариям. Рассматриваются перспективные решения, включая развитие роеобразных роботизированных систем и комбинирование различных сенсорных технологий.

Внедрение данных технологий позволит значительно повысить безопасность и эффективность гуманитарного разминирования, снизить риски для саперов и ускорить восстановление.

Ключевые слова: разминирование, роботизированные комплексы, БПЛА, глубокое обучение, мультисенсорные системы, искусственный интеллект.

Введение.

Разминирование территорий остается актуальной задачей в современном мире. Взрывоопасные устройства представляют серьезную угрозу как для военных, так и для гражданского населения. В 2024 году число гражданских жертв от применения взрывчатых веществ достигло 61 353 человек (Рисунок 1), что является самым высоким показателем за последнее десятилетие [1]. В целом, за последние два года количество конфликтов с применением взрывчатых устройств увеличилось на 25%, при этом 73% всех жертв пришлось на Ближний Восток и Северную Африку.



Рисунок 1 - Гражданские жертвы в результате применения взрывчатого оружия [1]

По данным ООН, число вынужденно перемещенных лиц в мире достигло 120 миллионов человек, что подчеркивает серьезность глобального кризиса [2]. Основными причинами миграции стали продолжающиеся конфликты в Сирии, Судане, Украине и Мьянме, что привело к значительному увеличению нагрузки на соседние страны и международные гуманитарные организации. В Европе и Северной Америке фиксируется рост числа беженцев, что вызывает дополнительные вызовы в социальной и политической сферах.

По данным ACLED, в 2024 году было зафиксировано более 165 273 случаев политического насилия, что на 15% больше, чем в предыдущем периоде [3]. Войны и вооруженные конфликты привели к разрушению критически важной инфраструктуры, что, в свою очередь, усугубило гуманитарную ситуацию в нескольких регионах, включая Палестину, Йемен и Эфиопию. В этих регионах доступ к медицинской помощи, воде и продовольствию остается крайне ограниченным.

Кроме того, SIPRI отмечает рост числа вооруженных конфликтов высокой интенсивности, достигшего 20 случаев в 2024 году [4]. Эксперты SIPRI также указывают на увеличение военных бюджетов ведущих стран мира, включая США, Китай и Россию, что может свидетельствовать о дальнейшем нарастании военной напряженности. На фоне этих тенденций разработка роботизированных систем для поиска и обезвреживания мин приобретает особое значение как инструмент повышения безопасности и снижения числа жертв среди мирного населения.

В данной статье проводится анализ мирового опыта создания таких систем, выявляются их ключевые технологические решения и перспективы развития.

Материалы и методы исследования.

В ходе исследования были использованы современные научные методы, включая системный анализ для классификации роботизированных комплексов разминирования и выявления ключевых тенденций их развития, сравнительно-аналитический метод для изучения мирового опыта применения данных технологий, а также статистический анализ для обработки данных о распространении минных угроз и эффективности различных технических решений. Дополнительно применялись методы библиографического анализа,

направленные на изучение и синтез информации из научных публикаций, отчетов международных организаций.

Результаты и их обсуждение.

Современные технологии обнаружения мин и автоматизации разминирования стремительно развиваются благодаря применению роботизированных платформ, беспилотников и искусственного интеллекта. Ключевые вызовы связаны с высокой стоимостью, зависимостью оптических методов от условий окружающей среды и необходимостью снижения ложных срабатываний. Одним из перспективных решений является использование моделей глубокого обучения, таких как YOLOv8, способных в реальном времени обнаруживать мины типа PFM-1 ("Butterfly") и PMA-2 ("Starfish") (Рисунок 2) с высокой точностью [5], минимизируя пропущенные цели до 1.6%. Однако системы сталкиваются с проблемой ложных срабатываний (около 30%), что требует дальнейшей оптимизации и комбинирования различных сенсорных технологий — LiDAR, радиолокации, инфракрасной съемки и гиперспектральной аналитики. Разработка автономных роеобразных роботов, интеграция ИИ с мультисенсорными системами и расширение датасетов для улучшения генерализации моделей являются ключевыми направлениями будущих исследований, способных сделать разминирование более эффективным и безопасным.



Рисунок 2 - мины типа PFM-1 ("Butterfly") и PMA-2 ("Starfish") [5]

Разработанная Кайа Куру и его командой система Maggy [6] представляет собой малогабаритный дрон (Рисунок 3) с магнитометром, обеспечивающий автоматическое обнаружение мин, СВУ и неразорвавшихся боеприпасов на сложных территориях. В ходе полевых испытаний в Латвии и Великобритании Maggy продемонстрировал точность 96%, успешно обнаруживая объекты на глубине до 1 м. Дрон использует двухосевой магнитометр, работающий с частотой 10 Гц, и алгоритмы кластеризации магнитных аномалий для выделения потенциально опасных зон. Его компактность (размах менее 50 см) и вес позволяют транспортировку в рюкзаке, а автономный режим снижает риски для саперов. Однако время работы ограничено 4,5 минутами, а обнаружение неметаллических мин невозможно. Авторы предлагают интеграцию георадара и инфракрасных датчиков для повышения эффективности.

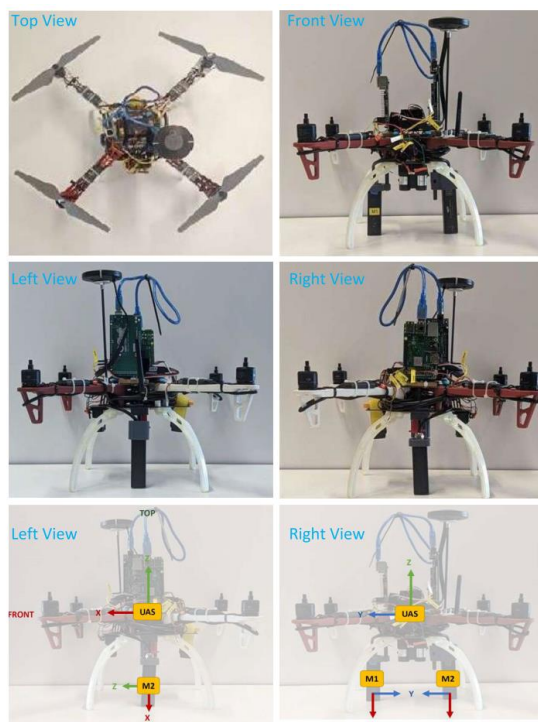


Рисунок 3 - малогабаритный дрон Maggy [6]

В работе Ying Shen предложена аэромагнитная система, использующая беспилотник с градиентным магнитометром и волновым энтропийным алгоритмом, что позволило увеличить отношение сигнал-шум до 8,46 дБ и достичь точности 94,5% при низком уровне ложных срабатываний (2%) [7]. Исследование Monday F. Ohemu продемонстрировало эффективность глубокого обучения в обнаружении следов взрывчатых веществ, где модель на основе CNN достигла 98,2% точности в классификации химических соединений, таких как TNT, RDX и PETN, по данным сенсорных сетей [8]. Автоматизированные методы, представленные Ambrose A. Azeta используют многослойные системы датчиков, которые могут анализировать следовые количества углерода, кислорода, водорода и азота, обнаруживая потенциальные угрозы с точностью 98% в реальном времени [9]. Эти разработки показывают значительный прогресс в области автоматизации разминирования и мониторинга взрывчатых веществ, однако остаются вызовы, связанные с ограничениями мощности беспилотников, необходимостью адаптации ИИ-моделей к новым условиям и снижением ложных срабатываний.

В работе Manley P.V. представлена концепция фитофорензики, где анализ гиперспектральных изображений сельскохозяйственных культур, таких как кукуруза, позволяет обнаруживать взрывчатые вещества по признакам стресса в растениях, достигнув точности до 95% при классификации участков, загрязненных RDX [10]. Исследование Afrasiabi A. предлагает гибридный метод интерпретации данных георадара (GPR) с использованием фильтра Калмана и вейвлет-преобразования, что улучшает обнаружение подземных объектов на 20% по сравнению с традиционными методами [11]. В работе Ling Z. представлен двухрежимный метод детекции неразорвавшихся боеприпасов (UXO) на основе YOLOv5, сочетающий анализ видимого и инфракрасного спектров (Рисунок 4), что позволило повысить точность идентификации UXO до 97,1% и скорость обработки до 60.3 FPS [12]. В свою очередь, Edwards T. протестировали модель CNN + YOLOv8 для обнаружения мин в инфракрасных изображениях, достигнув точности 92,31%, но при этом отметили сложность сбора данных из-за климатических условий и качества снимков [13].

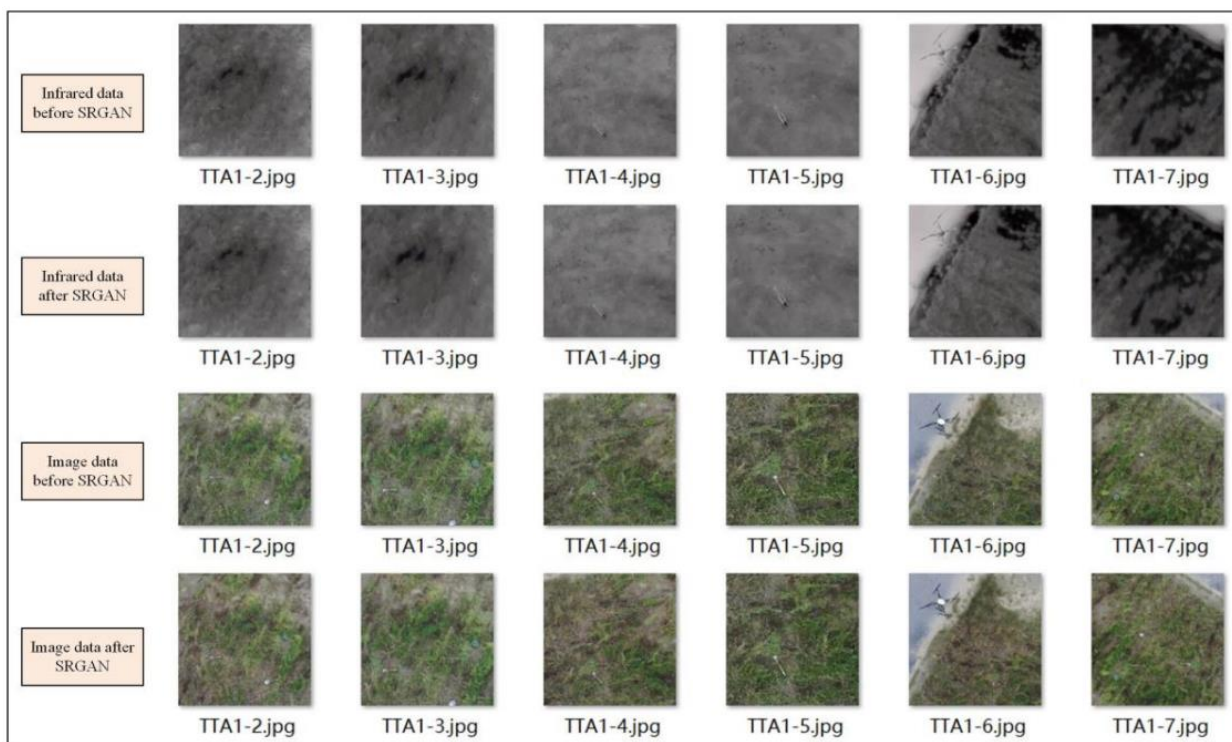


Рисунок 4 - Результаты реконструкции контурных изображений SRGAN для видимых и инфракрасных данных о цели UXO [12].

В исследовании Agrawal-Chung N. проведено сравнение моделей детекции мин на основе глубокого обучения, используя новый набор данных с изображениями мин POM-2 и POM-3 (Рисунок 5), полученными с дронов. Среди протестированных моделей YOLOF продемонстрировала наилучший результат с $mAP = 0,89$, опережая DETR, VFNet и Sparse-RCNN (mAP около 0,82) [14]. Работа Lekhak S. показала возможность замены ручных металлоискателей на воздушные детекторы, такие как EM61Lite, который обеспечивает повышенную чувствительность, но требует сложной обработки данных для уменьшения ложных срабатываний [15]. Исследование Pallavi N. R. представило автономного робота с металлоискателем и датчиками газов для детекции взрывчатых веществ, обеспечивающего мгновенную передачу данных в командный центр, что снижает риски саперов [16]. В работе Krishna J. P. предложена система с 6-DOF манипулятором для безопасного обезвреживания мин, использующая алгоритмы слияния данных, что позволило уменьшить количество ложных тревог [17]. В исследовании Mukherjee S. представлена роботизированная система с картографированием мин с точностью до миллиметра, что делает ее полезной для детального планирования разминирования [18].

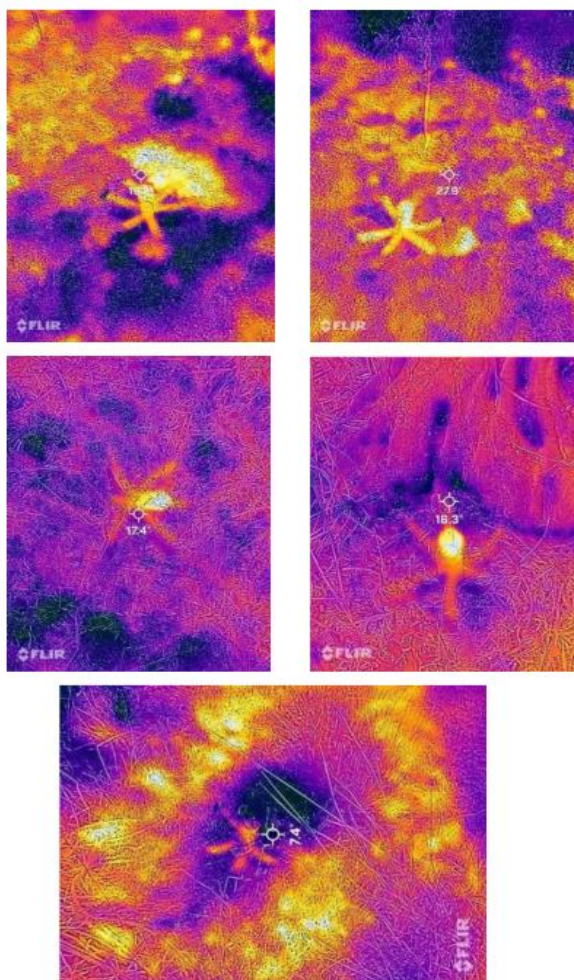


Рисунок 5 – Тепловые изображения РОМ-3 [14]

Кроме того, Роров М. предложили геоинформационную платформу (Рисунок 6), объединяющую данные с БПЛА, магнитометров и инфракрасных сенсоров, позволяющую строить вероятностные карты минных полей и автоматизировать процесс разминирования [19].

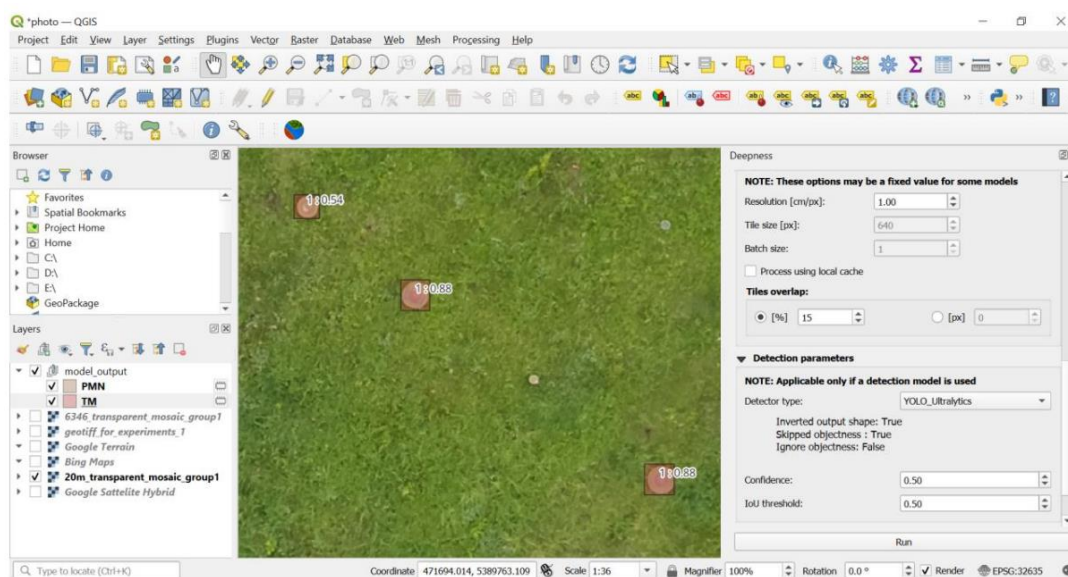


Рисунок 6 - Обнаружение мин на ортоизображении с помощью YOLOv8 в QGIS [19]

В исследовании R. Anand предложена модель регрессии на основе суммы синусоидальных функций для обработки гиперспектральных данных, что позволило улучшить извлечение характеристик мин и повысить точность обнаружения на 17% по сравнению с традиционными методами [20]. В работе Siyuan Li представлен алгоритм обнаружения замаскированных рассыпных мин в растительности, основанный на поляризационном спектральном слиянии, который достиг 95% точности при уровне ложных срабатываний 6,5% [21]. Исследование Muhammad Umair Akram Butt продемонстрировало эффективность инфракрасной термографии с использованием БПЛА, обеспечив 88% точность при съемке в вечернее время, что делает этот метод перспективным для обнаружения мин в скрытых местах [22]. В работе Hamidreza Karami рассмотрены электромагнитные методы обратного времени (EMTR), включая TR-MUSIC, который показал разрешение до 1/10 длины волны, позволяя детектировать близко расположенные цели с высокой точностью [23]. Kunichik O. предложили использовать 3D-печать для создания обучающих наборов данных для систем компьютерного зрения, что позволило достичь 91% точности на реальных минах, обучая модели на безопасных репликах [24]. В исследовании T. Kalaichelvi представлены алгоритмы обработки сигналов GPR для классификации мин, где методы SVM и k-NN обеспечили более 92% точности, улучшая разделение сигналов от фона [25]. Работа T. Nutsul анализирует интеграцию БПЛА, ГИС и машинного обучения для гуманитарного разминирования на примере Украины, подчеркивая важность сочетания мультисенсорных данных и геопространственной аналитики для точного картографирования минных полей [26]. В исследовании Sam Stadler разработаны реалистичные модели GPR, которые позволяют создавать синтетические базы данных для тренировки алгоритмов машинного обучения, улучшая детекцию неметаллических и импровизированных взрывных устройств (IED) [27].

Классификация роботизированных комплексов.

Роботизированные комплексы для разминирования и обнаружения мин играют ключевую роль в повышении безопасности операций по очистке территорий. Современные системы могут быть классифицированы по различным критериям: по назначению, типу передвижения, сенсорному оборудованию и уровню автономности.

В зависимости от выполняемых задач роботизированные комплексы для разминирования делятся на следующие категории (Таблица -1):

Таблица 1 – Классификация и категоризация роботизированных комплексов для разминирования

Классификация	Категория	Описание	Технологии/Примеры
По назначению	Разведывательные комплексы	Роботы для поиска мин и UXO с минимальным риском для оператора.	• Гиперспектральные камеры (анализ стресса растений [10]) • Инфракрасные сенсоры (UAV с термографией, точность 88% [22]) • Георадары (GPR) с алгоритмами (фильтр Калмана, вейвлет-преобразование, +20% точности [11])

	Манипуляторы для разминирования	Роботы для удаления, обезвреживания и детонации мин.	• Манипуляторы 6-DOF [17] • Газоанализаторы для обнаружения ВВ [16] • Алгоритмы слияния данных (снижение ложных тревог)
	Автономные платформы	Системы для очистки больших территорий при высокой угрозе.	• Фрезерные комплексы • Гусеничные/колесные машины с бронезащитой (комбинированные системы фрез и рыхлителей [28])
По типу передвижения	Наземные платформы	Используются в военных и гуманитарных целях.	• Гусеничные (UGV с GPR и LiDAR [28]) • Колесные (высокая скорость) • Шагающие роботы
	Воздушные комплексы (БПЛА)	Беспилотники для обнаружения мин.	• Дроны с ИК-камерами [22] • Аэромагнитные системы (Maggy, точность 96% [6]) • Дроны с GPR [26]
	Подводные роботы	Для поиска морских мин.	• AUV (сонары, магнитометры) • ROV (точное обезвреживание)
По сенсорному оборудованию	Металлодетекторы	Обнаружение металлических мин.	• EM61Lite [15]
	Гиперспектральные камеры	Выявление мин через спектральный анализ растительности.	• Анализ стресса растений [10]
	Георадары (GPR)	Поиск неметаллических мин.	• Комбинация с машинным обучением [25]

	Инфракрасные сенсоры	Обнаружение по тепловому контрасту.	• UAV с термографией [22]
	Аэромагнитные датчики	Поиск мин через магнитные аномалии.	• Система Maggy [6]
По уровню автономности	Дистанционно управляемые	Требуют постоянного контроля оператора.	Talon Mark II: Разработан компанией Foster-Miller Inc. (США).
	Полуавтономные	Выполняют задачи с минимальным вмешательством человека.	ANDROS II mini: Разработан компанией Remotec
	Полностью автономные	Используют ИИ для анализа среды и принятия решений.	• Алгоритмы YOLOv8 (точность 97,1% [12])

Перспективы развития.

Современные технологии разминирования развиваются в направлении интеграции передовых сенсорных систем, машинного обучения и автономных роботизированных платформ. Улучшение мультисенсорных комплексов, включающих гиперспектральные камеры, георадары и аэромагнитные датчики, позволяет повысить точность обнаружения мин, особенно в сложных условиях. Важным направлением является автоматизация обработки данных с использованием глубокого обучения, что уже позволило снизить уровень пропущенных целей до 1,6%, но остается проблема ложных срабатываний, которые могут достигать 30%. В перспективе разработка самообучающихся ИИ-моделей, способных адаптироваться к различным средам без необходимости длительной повторной тренировки, позволит значительно повысить эффективность обнаружения мин.

Автономные системы, использующие беспилотные летательные аппараты и наземные платформы, обеспечивают картографирование минных полей с минимальным участием человека. Развитие роеобразных роботизированных комплексов (swarm robotics) позволит объединять несколько автономных единиц, работающих синхронно, что ускорит процесс разминирования и снизит риски. Особое внимание уделяется увеличению времени автономной работы и повышению мобильности роботов, включая использование шагающих платформ для работы в сложных рельефах. В области подводного разминирования перспективны автономные аппараты (AUV) с усовершенствованными сонарными системами, способными обнаруживать морские мины с высокой точностью.

Нейтрализация мин также становится более технологически совершенной. Развитие умных манипуляторов с 6 DOF и алгоритмов машинного зрения позволит роботизированным системам безопасно обезвреживать мины без вмешательства человека. Перспективными являются лазерные и энергоэффективные методы детонации, способные уничтожать взрывные устройства на расстоянии, исключая механическое воздействие.

Однако остаются вызовы, связанные с повышением автономности, снижением ложных тревог и сертификацией новых технологий. Внедрение этих решений позволит сделать разминирование более быстрым, безопасным и экономически эффективным, что критично для гуманитарных операций и военных применений.

Заключение.

Анализ мирового опыта разработки роботизированных комплексов для разминирования демонстрирует значительный технологический прогресс в этой области. Интеграция передовых сенсорных систем, методов машинного обучения и автономных платформ позволяет существенно повысить эффективность обнаружения мин и минимизировать риски для специалистов по разминированию.

Наиболее перспективные направления включают развитие мультисенсорных систем, объединяющих георадары, гиперспектральные камеры, инфракрасные сенсоры и аэромагнитные детекторы. Использование алгоритмов глубокого обучения, таких как YOLO и CNN, уже позволило снизить уровень пропущенных мин до 1,6%, однако высокая доля ложных срабатываний остается серьезной проблемой. Дальнейшие исследования в области оптимизации алгоритмов детекции и снижения ошибок являются приоритетными задачами.

Дополнительное внимание следует уделить разработке автономных роеобразных систем, которые могут значительно ускорить процесс разминирования за счет синхронной работы множества единиц техники. Использование беспилотных летательных аппаратов и подводных дронов с усовершенствованными системами навигации открывает новые возможности для обнаружения и уничтожения мин в сложных ландшафтах.

Ниже представлена сравнительная таблица существующих роботизированных комплексов для обнаружения мин (Таблица 2):

Таблица 2 – Сравнительная таблица существующих роботизированных комплексов для обнаружения мин

Название системы	Тип	Ключевые технологии / сенсоры	Точность обнаружения	Преимущества	Недостатки	Применение / условия
Maggy	Воздушный комплекс (БПЛА)	Аэромагнитный датчик, двухосевой магнитометр, алгоритмы кластеризации и магнитных аномалий	~96%	Высокая мобильность, компактность, безопасное использование	Ограниченное время работы (~4,5 мин), не обнаруживает неметаллические мины	Труднодоступные и опасные зоны, быстрая разведка
Aeromagnetic system (Ying Shen et al.)	Воздушный комплекс (БПЛА)	Градиентный магнитометр, волновой энтропийный алгоритм	94,5% (ложные срабатывания ~2%)	Высокая точность, низкий процент ложных тревог	Возможны ограничения при экстремально	Низколетный режим для обнаружения

					сложных условиях	УХО в зонах низкой высоты
Deep Learning-based detection (Ling Z. et al.)	Воздушный комплекс (БПЛА)	Инфракрасные и видимые сенсоры, модели YOLOv5/YOLOv8 и CNN	До 97,1% (вариабельно: 92,3% в ряде испытаний)	Быстрая обработка данных, высокая точность, возможность работы в реальном времени	Зависимость от качества входных данных, адаптация к разным условиям	Комплексное обнаружение УХО в изменяющихся условиях
Airborne Metal Detection (EM61Lite)	Воздушный комплекс	Воздушный металлоискатель (альтернатива ручным детекторам)	Не указана, но повышенная чувствительность	Повышенная чувствительность к металлическим объектам	Требуется сложной обработки данных для снижения ложных срабатываний	Применяется там, где традиционные металлоискатели менее эффективны
UGV с GPR и LiDAR	Наземный комплекс	ГПР, LiDAR, мультисенсорный пакет (интеграция данных из ГПР, LiDAR и других сенсоров)	При оптимальной интеграции – до ~97–98%	Длительное время работы, высокая устойчивость в сложном рельефе	Ограниченная мобильность в городских условиях, высокая стоимость	Открытие пространства, сложный рельеф, большие территории

Данная таблица демонстрирует, что выбор системы зависит от конкретных условий применения. Воздушные платформы (БПЛА) обеспечивают высокую мобильность и быструю разведку в труднодоступных зонах, тогда как наземные комплексы, оснащённые мультисенсорными системами, подходят для работы на больших территориях и в экстремальных условиях. Каждый подход имеет свои преимущества и ограничения, что позволяет подобрать оптимальное решение в зависимости от поставленных задач.

Тем не менее, остается ряд вызовов, связанных с энергоэффективностью роботизированных платформ, адаптацией ИИ-моделей [29] к различным условиям

окружающей среды, а также необходимостью международного сотрудничества в области стандартизации и сертификации технологий. Дальнейшее развитие роботизированных систем разминирования потребует комплексного подхода, включающего разработку новых материалов, повышение автономности систем и интеграцию с глобальными платформами гуманитарного разминирования [30].

Внедрение этих технологий позволит не только повысить безопасность разминирования, но и существенно ускорить очистку территорий, что критично для постконфликтных регионов и гуманитарных операций по всему миру.

В дальнейших исследованиях будут представлены количественные характеристики и сравнительный анализ эффективности роботизированных комплексов

Благодарность.

Данное исследование финансируется в рамках программно-целевого финансирования научной и (или) научно-технической деятельности, Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН проекта: BR27195331).

Список литературы

1. The Guardian. (2025, 14 января). Гражданские жертвы от взрывного оружия на самом высоком уровне более чем за десятилетие [Civilian casualties of explosive weapons at highest level in more than a decade]. <https://www.theguardian.com/world/2025/jan/14/civilian-casualties-of-explosive-weapons-at-highest-level-in-more-than-a-decade>
2. United Nations Statistics Division. (2024). ООН сообщает о рекордных 120 млн перемещённых лиц по всему миру [UN reports record 120 million displaced people worldwide]. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/Goal-16>
3. Armed Conflict Location & Event Data Project (ACLED). (2024, июль). Индекс глобальных конфликтов 2024 [Global Conflict Index 2024]. <https://acleddata.com/conflict-index/index-july-2024>
4. Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). (2024). Ежегодник SIPRI 2024: Вооружения, разоружение и международная безопасность [SIPRI Yearbook 2024: Armaments, disarmament and international security]. <https://www.sipri.org/yearbook/2024/02>
5. Виволи, Е., Бертини, М., и Капинери, Л. (2024). Обнаружение наземных мин в реальном времени с помощью оптической съёмки и глубокого обучения. *Remote Sensing*, 16(4), 677. DOI: 10.3390/rs16040677.
6. Куру, К., Суджит, А., Анселл, Д., и Пиндер, Д. М. (2024). Интеллектуальное, автоматизированное и безопасное обнаружение мин, СВУ и НББ с помощью системы Maggy. *IEEE Access*, Advance online publication. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3493013.
7. Шэнь, Ю., Чэн, З., Гао, Д., Чжан, П., и Ян, Х. (2025). Высокоточная аэромагнитная система для обнаружения неразорвавшихся боеприпасов. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 22, 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2025.3528102.
8. Охему, М. Ф., Азета, А. А., Адейанджу, И. А., и Обаси, К. К. (2025). Эффективный метод машинного обучения для обнаружения следов взрывчатых. *International Journal of Data Informatics and Intelligent Computing*, 4(1), 15–29. DOI: 10.59461/ijdiic.v4i1.16.
9. Охему, М. Ф., Азета, А. А., Адейанджу, И. А., и Обаси, К. К. (2024, ноябрь). Автоматизированная система территориального обнаружения следов. В *Proceedings of the 2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)* (сс. 1–5). IEEE. DOI: 10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629685.
10. Мэнли, П. В., Виа, С. М., и Бёркен, Д. Г. (2025). Фитофорензика БПЛА: гиперспектральный анализ для дистанционного выявления взрывчатки с использованием кукурузы (*Zea mays*). *Remote Sensing*, 17(3), 385. DOI: 10.3390/rs17030385.

11. Афрасиаби, А., Фарамарзи, А., Чапман, Д., Кешаварзи, А., и Стрингфеллоу, М. (2025). Оптимизация интерпретации данных ГПР: гибридный ИИ-фильтр Калмана и вейвлет-преобразование для поиска подземных объектов. *Journal of Applied Geophysics*, 232, 105567. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2024.105567.
12. Лин, З., Чжао, Х., Чжао, К., Лю, З., и Чен, В. (2025). Двухрежимное обнаружение неразорвавшихся боеприпасов на БПЛА малой высоты с использованием YOLOv5. *IEEE Access*, 13, 42634–42649. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3537058.
13. Эдвардс, Т., Нибуш, М., и Уити, Д. (2024, декабрь). Обнаружение наземных и заглоблённых мин с помощью глубинного обучения. В *Proceedings of the 30th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP 2024)* (с. 1–6). IEEE. DOI: 10.1109/M2VIP62491.2024.10746152.
14. Агарвал-Чанг, Н., и Моин, З. (2024). Сравнение моделей обнаружения наземных мин по новому набору «Drone Flyby» (arXiv:2410.19807). *arXiv*. DOI: 10.48550/arXiv.2410.19807
15. Лехак, С., Йентилуччи, Е. Д., и Бринкли, А. В. (2024). Оценка возможности замены ручных металлодетекторов воздушной системой для поиска мин и НВБ. *Remote Sensing*, 16(24), 4732. DOI: 10.3390/rs16244732.
16. Паллави, Н. Р., Атхисая, Т. Р., и Срути, М. (2024, август). Роботизированная военная разведка с металлодетектором для обнаружения. В *Proceedings of the 2024 Second International Conference on Advances in Information Technology (ICAIT)* (т. 1, с. 1–5). IEEE. DOI: 10.1109/ICAIT61638.2024.10690688.
17. Кришна, Д. П., и Тилагар, К. В. (2024, июль). Обнаружение мин и безопасное подрывное воздействие с помощью 6-СОУ манипулятора на базе ИИ. В *Proceedings of the 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT 2024)* (с. 1–7). IEEE. DOI: 10.1109/ICCCNT61001.2024.10725245.
18. Мукерджи, С., Маллик, С., и Датта, А. (2024, май). Экспериментальное исследование робота для обнаружения. В *Proceedings of the 1st International Conference on Communications and Computer Science (InCCCS 2024)* (с. 1–5). IEEE. DOI: 10.1109/InCCCS60947.2024.10593535.
19. Попов, М., Кузнецова, Т., и Иванов, П. (2024). Концепция геоинформационной платформы для обнаружения и картографирования мин и других взрывоопасных объектов с БПЛА. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2024(4), 207–216. DOI: 10.32620/reks.2024.4.17.
20. Ананд, Р., Эндрю, Д., и Макки, И. (2024). Оптимизация обнаружения мин в разнообразных условиях: гиперспектральные данные и регрессионные. *International Journal of Intelligent Networks*, 5, 351–363. DOI: 10.1016/j.ijin.2024.08.004.
21. Ли, С., У, Х., Чжан, Ю., и Чжоу, Л. (2024). Алгоритм обнаружения замаскированных рассеянных мин в растительности на основе поляризационно-спектрального. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Advance online publication. DOI: 10.1109/LGRS.2024.3379415.
22. Батт, М. У. А., Навид, З., и Джавад, У. (2024). Обнаружение мин с БПЛА с использованием инфракрасной термографии (arXiv:2410.23998). *arXiv*. DOI: 10.48550/arXiv.2410.23998.
23. Карам, Х., Тахериан, М., и Гхаффари, Х. (2024). Обнаружение мин методами электромагнитного временного разворота: TR, итеративный TR, DORT и TR-MUSIC. *Radio Science*, 59(10), 1–13. DOI: 10.1029/2024RS007971.
24. Куничик, О., и Терещенко, В. (2024). Эффективность 3D-печати для обучения систем компьютерного зрения обнаружению мин. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 131(1). DOI: 10.15587/1729-4061.2024.311602.

25. Калайчелви, Т., и Рави, С. (2025). Обработка сигналов георадара для обнаружения мин: сравнение методов выделения признаков и классификации. *International Journal of Computing*, 17(1), 1–15. DOI: 10.12785/ijcds/1571020535.
26. Гуцул, Т., Петрова, О., Шевченко, Д., и Яковенко, В. (2024). Обзор применения БПЛА, дистанционного зондирования и ГИС в гуманитарном разминировании: украинский опыт. *Heliyon*, Advance online publication. DOI: 10.1016/j.heliyon. 2024.e29142.
27. Штадлер, С., Мюллер, К., Шмид, У., и Фукс, М. (2024). Реалистичное моделирование ГПП для обнаружения мин и СВУ с учётом антенн и параметров грунта. *Near Surface Geophysics*, 22(2), 188–205. DOI: 10.1002/nsg.12282.
28. Чосич, Д., и Чатович, А. (2024). Проблема мин и взрывоопасных остатков войны и методы разминирования. *Defense and Security Studies*, 5(2), 84–107. DOI: 10.37868/dss.v5.id273.
29. Куру, К., Суджит, А., Анселл, Д., и Пиндер, Д. М. (2025). Обнаружение и очистка взрывоопасных устройств (мины/НВБ/СВУ) малогабаритным дроном. Часть I. *Coordinates*, 21(2), 9–20. ISSN 0973-2136.
30. Но, Д., и О, Е. (2025). Химическое обнаружение на мобильных платформах с ИИ-обработкой данных. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 14(1), 6. DOI: 10.3390/jsan14010006.

References

1. The Guardian. (2025, January 14). *Civilian casualties of explosive weapons at highest level in more than a decade*. <https://www.theguardian.com/world/2025/jan/14/civilian-casualties-of-explosive-weapons-at-highest-level-in-more-than-a-decade>
2. United Nations Statistics Division. (2024). *UN reports record 120 million displaced people worldwide*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/Goal-16>
3. Armed Conflict Location & Event Data Project (ACLED). (2024, July). *Global Conflict Index 2024*. <https://acleddata.com/conflict-index/index-july-2024>
4. Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI). (2024). *SIPRI Yearbook 2024: Armaments, disarmament and international security*. <https://www.sipri.org/yearbook/2024/02>
5. Vivoli, E., Bertini, M., & Capineri, L. (2024). Deep learning-based real-time detection of surface landmines using optical imaging. *Remote Sensing*, 16(4), 677. DOI: 10.3390/rs16040677.
6. Kuru, K., Sujit, A., Ansell, D., & Pinder, J. M. (2024). Intelligent, automated, rapid, and safe landmine, improvised explosive device, and unexploded ordnance detection using Maggy. *IEEE Access*, Advance online publication DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3493013.
7. Shen, Y., Chen, Z., Gao, J., Zhang, P., & Yang, X. (2025). Sensitive aeromagnetic system for unexploded ordnance detection with high detection accuracy and range. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 22, 1–5. DOI: 10.1109/LGRS.2025.3528102.
8. Ohemu, M. F., Azeta, A. A., Adeyanju, I. A., & Obasi, C. C. (2025). An effective machine learning approach for explosive trace detection. *International Journal of Data Informatics and Intelligent Computing*, 4(1), 15–29. DOI: 10.59461/ijdiic.v4i1.16.
9. Ohemu, M. F., Azeta, A. A., Adeyanju, I. A., & Obasi, C. C. (2024, November). Automated area-based explosive trace detection system. In *Proceedings of the 2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)* (pp. 1-5). IEEE. DOI: 10.1109/SEB4SDG60871.2024.10629685.
10. Manley, P. V., Via, S. M., & Burken, J. G. (2025). UAV-based phytoforensics: Hyperspectral image analysis to remotely detect explosives using maize (*Zea mays*). *Remote Sensing*, 17(3), 385. DOI: 10.3390/rs17030385.
11. Afrasiabi, A., Faramarzi, A., Chapman, D., Keshavarzi, A., & Stringfellow, M. (2025). Optimising ground penetrating radar data interpretation: A hybrid approach with AI-assisted

Kalman filter and wavelet transform for detecting and locating buried utilities. *Journal of Applied Geophysics*, 232, 105567. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2024.105567.

12. Ling, Z., Zhao, H., Zhao, X., Liu, Z., & Chen, W. (2025). A dual-mode detection method for unexploded ordnance based on YOLOv5 for low-altitude unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*, 13, 42634–42649. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3537058.

13. Edwards, T., Nibouche, M., & Withey, D. (2024, December). Deep learning-based detection of surface and buried landmines. In *Proceedings of the 30th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP 2024)* (pp. 1–6). IEEE. DOI:10.1109/M2VIP62491.2024.10746152.

14. Agrawal-Chung, N., & Moin, Z. (2024). Comparing surface landmine object detection models on a new drone flyby dataset (arXiv:2410.19807). *arXiv*. DOI:10.48550/arXiv.2410.19807.

15. Lekhak, S., Ientilucci, E. J., & Brinkley, A. W. (2024). Viability of substituting handheld metal detectors with an airborne metal detection system for landmine and unexploded ordnance detection. *Remote Sensing*, 16(24), 4732. DOI: 10.3390/rs16244732

16. Pallavi, N. R., Athisaya, T. R., & Sruthi, M. (2024, August). Robotic military surveillance using metal detector for land-mine bomb detection. In *Proceedings of the 2024 Second International Conference on Advances in Information Technology (ICAIT)* (Vol. 1, pp. 1–5). IEEE. DOI:10.1109/ICAIT61638.2024.10690688.

17. Krishna, J. P., & Thilagar, K. V. (2024, July). Landmine detection and safe booming using a 6-DOF articulated system with artificial intelligence. In *Proceedings of the 15th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT 2024)* (pp. 1–7). IEEE. DOI:10.1109/ICCCNT61001.2024.10725245.

18. Mukherjee, S., Mallick, S., & Dutta, A. (2024, May). An experimental study of a landmine detection robot. In *Proceedings of the 1st International Conference on Communications and Computer Science (InCCCS 2024)* (pp. 1–5). IEEE. DOI:10.1109/InCCCS60947.2024.10593535.

19. Popov, M., Kuznetsova, T., & Ivanov, P. (2024). Concept of a geoinformation platform for landmines and other explosive objects detection and mapping with UAV. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2024(4), 207–216. DOI: 10.32620/reks.2024.4.17.

20. Anand, R., Andrew, J., & Makki, I. (2024). Optimizing land-mine detection across diverse mining environments: A hyperspectral data approach with regression models. *International Journal of Intelligent Networks*, 5, 351–363. DOI: 10.1016/j.ijin.2024.08.004

21. Li, S., Wu, H., Zhang, Y., & Zhou, L. (2024). Research on the detection algorithm of camouflage scattered landmines in vegetation environment based on polarization spectral fusion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. Advance online publication. DOI: 10.1109/LGRS.2024.3379415.

22. Butt, M. U. A., Naveed, Z., & Javed, U. (2024). UAV-based detection of landmines using infrared thermography (arXiv:2410.23998). *arXiv*. DOI: 10.48550/arXiv.2410.23998.

23. Karami, H., Taherian, M., & Ghaffari, H. (2024). Landmine detection using electromagnetic time-reversal-based methods: Classical TR, iterative TR, DORT and TR-MUSIC. *Radio Science*, 59(10), 1–13. DOI:10.1029/2024RS007971.

24. Kunichik, O., & Tereshchenko, V. (2024). Determining the effectiveness of using three-dimensional printing to train computer vision systems for landmine detection. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 131(1). DOI:10.15587/1729-4061.2024.311602.

25. Kalaichelvi, T., & Ravi, S. (2025). GPR signal processing for landmine detection: A comparative study of feature extraction and classification algorithms. *International Journal of Computing*, 17(1), 1–15. DOI:10.12785/ijcds/1571020535.

26. Hutsul, T., Petrova, O., Shevchenko, D., & Yakovenko, V. (2024). Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information

systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*. Advance online publication. DOI: 10.1016/j.heliyon. 2024.e29142.

27. Stadler, S., Müller, K., Schmid, U., & Fuchs, M. (2024). Realistic simulation of GPR for landmine and IED detection including antenna models, soil dispersion and heterogeneity. *Near Surface Geophysics*, 22(2), 188–205. DOI:10.1002/nsg.12282

28. Ćosić, D., & Čatović, A. (2024). Research on the problem of landmines and explosive remnants of war worldwide and methods of demining. *Defense and Security Studies*, 5(2), 84–107. DOI: 10.37868/dss. v5.id273

29. Kuru, K., Sujit, A., Ansell, D., & Pinder, J. M. (2025). Detecting and clearing explosive devices (landmines/UXO/IED) using small-scale customised drone—Part I. *Coordinates*, 21(2), 9–20. ISSN 0973-2136.

30. Noh, D., & Oh, E. (2025). Chemical detection using mobile platforms and AI-based data processing technologies. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 14(1), 6. DOI:10.3390/jsan14010006.

МИНАЛАРДЫ ІЗДЕУ ЖӘНЕ ЗАРАРСЫЗДАНДЫРУ ҮШІН РОБОТТАНДЫРЫЛҒАН КЕШЕНДЕРДІ ҚҰРУ БОЙЫНША ӘЛЕМДІК ТӘЖІРИБЕНІ ШОЛУ

***Аңдатпа.** Қазіргі заманғы қарулы қақтығыстар мен олардың салдары әлем бойынша миналанған аумақтардың едәуір артуына алып келді. Бұл бейбіт тұрғындардың өміріне қауіп төндіріп, зардап шеккен өңірлерді қалпына келтіруді қиындатады. Осы мақалада миналарды іздеу және залалсыздандыру үшін роботтандырылған кешендерді әзірлеу және қолдану бойынша әлемдік тәжірибе қарастырылады.*

Қазіргі заманғы технологиялар, соның ішінде жасанды интеллект, көпсенсорлы жүйелер, ұшқышсыз ұшу аппараттары және жер үсті платформалары талданып, олардың минаяздандыру тиімділігін арттырудағы рөлі зерттеледі.

Әсіресе, миналар мен жарылмай қалған оқ-дәрілерді анықтауға арналған терең оқыту алгоритмдерін пайдалану перспективалары және күрделі жағдайларда жұмыс істеуге арналған автономды жүйелерді интеграциялау мәселелері қарастырылады. Сондай-ақ, жабдықтардың қымбат болуы, жалған іске қосу санын азайту қажеттілігі және технологияларды түрлі әскери және гуманитарлық сценарийлерге бейімдеу сияқты негізгі қиындықтар талқыланады.

Миналарды залалсыздандыруға арналған рой тәрізді роботтандырылған жүйелерді дамыту және әртүрлі сенсорлық технологияларды біріктіру болашағы қарастырылады. Бұл технологияларды енгізу гуманитарлық минаяздандырудың қауіпсіздігі мен тиімділігін айтарлықтай арттыруға, саперлер үшін қауіп-қатерді азайтуға және қалпына келтіру жұмыстарын жеделдетуге мүмкіндік береді.

***Түйін сөздер:** минаяздандыру, роботтандырылған кешендер, ҰҰА, терең оқыту, көпсенсорлы жүйелер, жасанды интеллект.*

REVIEW OF GLOBAL EXPERIENCE IN DEVELOPING ROBOTIC COMPLEXES FOR MINE DETECTION AND NEUTRALIZATION

***Abstract.** Modern armed conflicts and their consequences have significantly increased the number of mined areas worldwide, posing a threat to civilians and hindering the restoration of affected regions. This article reviews the global experience in the development and application of robotic complexes for mine detection and neutralization.*

It analyzes modern technologies, including artificial intelligence, multisensor systems, unmanned aerial vehicles (UAVs), and ground platforms, which enhance the efficiency of demining operations.

Special attention is given to the potential of deep learning algorithms for mine and unexploded ordnance (UXO) detection, as well as the integration of autonomous systems for operation in complex environments. Key challenges such as the high cost of equipment, the need to reduce false alarms, and the adaptation of technologies to various military and humanitarian scenarios are discussed.

Promising solutions, including the development of swarm robotic systems and the combination of different sensor technologies, are examined. The implementation of these technologies can significantly improve the safety and efficiency of humanitarian demining, reduce risks for sappers, and accelerate recovery efforts.

Keywords: demining, robotic complexes, UAVs, deep learning, multisensor systems, artificial intelligence.

Авторлар туралы мәлімет

Комекбаев Арман Ерманатович	Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті механика-математика факультетінің «Механика» кафедрасы бойынша «8D07111 – Ғарыштық техника және технологиялар» мамандығының 2 курс докторанты, Алматы қаласы, Қазақстан, E-mail: komekbayev_arman1@live.kaznu.kz
Алипбаев Куаныш Арингожаевич	PhD, қауымдастырылған профессор, Ғылым жөніндегі проректор, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қаласы, Қазақстан, E-mail: k.alipbayev@aes.kz
Аден Алишер Ерболович	Ғылыми қызметкер, Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қаласы, Қазақстан, E-mail: a.aden@aes.kz
Оразалы Еркін Ермекович	Ғ. Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қаласы, Қазақстан, E-mail: y.orazaly@aes.kz

Сведения об авторах

Комекбаев Арман Ерманатович	Докторант 2 курса по специальности «8D07111 - Космическая техника и технологии» кафедры «механики» механико-математического факультета КазНУ им. аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан, E-mail: komekbayev_arman1@live.kaznu.kz
Алипбаев Куаныш Арингожаевич	PhD, ассоциированный профессор, Проректор по науке НАО «Алматинский Университет Энергетики и Связи им. Г. Даукеева», г. Алматы. Казахстан, E-mail: k.alipbayev@aes.kz
Аден Алишер Ерболович	Научный сотрудник НАО «Алматинский Университет Энергетики и Связи им. Г. Даукеева», г. Алматы. Казахстан, E-mail: a.aden@aes.kz
Оразалы Еркін Ермекович	Научный сотрудник НАО «Алматинский Университет Энергетики и Связи им. Г. Даукеева», г. Алматы. Казахстан, E-mail: y.orazaly@aes.kz

Information about the authors

Komekbayev Arman Yermanatovich	2nd year PhD student in the specialty "8D07111 - Space Engineering and Technology", Department of Mechanics, Faculty of Mechanics and Mathematics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan Email: komekbayev_arman1@live.kaznu.kz
Alipbayev Kuanish Aringozhaevich	PhD, Associate Professor, Vice-Rector for Science, G. Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (AUPET), Almaty, Kazakhstan, Email: k.alipbayev@aes.kz
Aden Alisher Yerbolovich	Researcher, G. Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (AUPET), Almaty, Kazakhstan Email: a.aden@aes.kz
Orazaly Yerkin Yermekovich	Researcher, G. Daukeyev Almaty University of Power Engineering and Telecommunications (AUPET), Almaty, Kazakhstan Email: y.orazaly@aes.kz