

Акционерное общество «Национальная компания «Казахстан инжиниринг»
ТОВАРИЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«RESEARCH&DEVELOPMENT ЦЕНТР «КАЗАХСТАН ИНЖИНИРИНГ»
(ТОО «R&D ЦЕНТР «КИ»)



СБОРНИК
материалов Межведомственной научно-практической
конференции «Создание инновационного комплексного продукта
в дроневой индустрии с использованием передовых технологий
искусственного интеллекта»

(в рамках программно-целевого финансирования на 2024-2026 гг.)
ИРН BR 249015/0224

УДК 629.735.33-519:004.89
ББК 39.53 + 32.813
С 23

Рекомендовано к изданию Научно-техническим советом ТОО «R&D центр
«Казахстан инжиниринг». Протокол №52 от 05 октября 2026 года.

Рецензенты:

1. Н.А.Бельгибеков – вице-президент АО «ЦВСИ», доктор философии (PhD), капитан второго ранга (З).
2. Б.Ж.Куатов – доктор философии (PhD), полковник.

Сборник материалов Межведомственной научно-практической конференции «Создание инновационного комплексного продукта в дроновой индустрии с использованием передовых технологий искусственного интеллекта». – Астана: ТОО «R&D центр «Казахстан инжиниринг», 2026. – 318 с.

ISBN 978-601-08-6550-1

В Сборник вошли доклады участников Межведомственной научно-практической конференции «Создание инновационного комплексного продукта в дроновой индустрии с использованием передовых технологий искусственного интеллекта», посвященной обсуждению разрабатываемого в рамках проекта программно-целевого финансирования на 2024-2026 гг. ИРН BR 249015/0224.

Материалы сборника конференции объединяют научно-технические труды широкого круга специалистов, посвященные развитию и совершенствованию исследований в области создания автономных беспилотных авиационных систем и интеллектуального управления войсками.



УДК 629.735.33-519:004.89
ББК 39.53 + 32.813

© ТОО «R&D центр «Казахстан инжиниринг», 2026

ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО К УЧАСТНИКАМ КОНФЕРЕНЦИИ

Байсеитов Г.Н.

заместитель генерального
директора ТОО «WSE»
по научной работе,
к.т.н, полковник запаса



Құрметті конференцияға қатысушылар! Сіздерді ведомствоаралық ғылыми-практикалық конференциясында көргенімізге қуаныштымыз!

Уважаемые участники конференции! Мы рады приветствовать Вас на межведомственной научно-практической конференции.

Я хочу выразить искреннюю признательность всем присутствующим за активное участие. Масштаб сегодняшней встречи наглядно подтверждает, что у наших государственных органов и силовых ведомств есть единое, консолидированное понимание важности скорейшего внедрения ИИ в беспилотные авиационные системы для обеспечения национальной безопасности Республики Казахстан.

Динамика современных вооруженных конфликтов радикально изменилась. В условиях маневренного, высокоскоростного боя с резкой сменой оперативной обстановки и активным применением средств радиоэлектронной борьбы, гарантией превосходства становится не просто дрон, а умный, автономный роботизированный комплекс. Интеграция искусственного интеллекта, нейросетей и машинного зрения на борту БПЛА позволяет решать задачи разведки, целеуказания и навигации в движении, минимизируя человеческий фактор и риски для личного состава.

При этом, сегодня перед нами стоит серьезный технологический вызов. Существующие беспилотные системы, управляемые оператором по радиоканалам, критически зависимы от устойчивости связи и дальности ее действия. Внедрение же передовых технологий ИИ обеспечивает дронам полную автономность, однако требует колоссальных вычислительных мощностей на борту, создания сложных программных алгоритмов и высокой стоимости разработки.

Уверен, что наша совместная работа призвана способствовать обсуждению различных вопросов науки, методики и практики, и выработать рекомендации по *разработке научно-технического задела в дронной индустрии нашей страны.*

Уважаемые коллеги!

Полагаю, что высокий профессионализм участников нашей конференции, безусловно, будет способствовать выработке эффективных решений этих сложных задач. Уверен, что сегодняшняя встреча послужит дальнейшему укреплению взаимовыгодного сотрудничества между силовыми структурами и предприятиями оборонно-промышленного комплекса в области научно-технической деятельности, а также ускорит развитие перспективных образцов вооружения и военной техники.

Выражаем надежду, что выводы конференции помогут сформировать четкий облик ключевых направлений развития беспилотной авиации и технологий искусственного интеллекта в Казахстане.

Надеюсь, что выработанные в ходе дискуссий предложения станут надежным ориентиром для нашей дальнейшей совместной деятельности на благо национальной безопасности страны.

Құрметті қатысушылар!

Барлықтарыңызға шығармашылық табыс, қызықты да жемісті еңбектер тілеймін! Назарларыңызға рахмет!

ЦИФРОВАЯ ЭМПАТИЯ В ЧЕЛОВЕКОЦЕНТРИЧНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМАХ: РОЛЬ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ВО ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ОПЕРАТОРА И АВТОНОМНОГО АГЕНТА

доцент, подполковник Ахметов К.Р.
Академия Комитета национальной
безопасности Республики Казахстан,
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Статья посвящена рассмотрению цифровой эмпатии как перспективного компонента человекоцентричного взаимодействия оператора с интеллектуальными беспилотными системами. На основе анализа современной научной литературы рассматривается трансформация взаимодействия «человек–дрон» в более сложную модель «человек–искусственный интеллект–автономный агент». Показано, что развитие генеративного и мультимодального искусственного интеллекта позволяет беспилотным системам не только воспринимать физическую среду, но и адаптировать способы коммуникации с человеком. Рассматриваются взаимосвязи цифровой эмпатии с распознаванием эмоциональных и коммуникативных состояний оператора, когнитивной нагрузкой, доверием к автономной системе, объяснимостью решений и адаптивным человеко-машинным взаимодействием. Обосновывается перспективность использования принципов цифровой эмпатии при разработке человекоцентричных интеллектуальных продуктов дроновой индустрии.

Ключевые слова: цифровая эмпатия, искусственный интеллект, беспилотные летательные аппараты, человеко-машинное взаимодействие, human-centered AI, автономный агент, human–autonomy teaming, генеративный искусственный интеллект, оператор, эмоциональный интеллект.

Введение. Развитие беспилотных летательных аппаратов сопровождается постепенным переходом от дистанционного управления к автономному выполнению все более сложных задач. Современные беспилотные системы способны самостоятельно осуществлять навигацию, обнаруживать объекты, планировать маршруты и адаптироваться к изменениям окружающей среды. Следующим этапом становится интеграция генеративного искусственного интеллекта и больших мультимодальных моделей, позволяющих формировать более сложные механизмы восприятия, рассуждения и взаимодействия с человеком.

В результате изменяется сама роль оператора. Если традиционно оператор непосредственно управлял движением беспилотного аппарата, то в автономных системах он все чаще выступает в качестве постановщика задач, контролера и партнера интеллектуального агента. В исследованиях human–autonomy teaming

подчеркивается, что эффективность такой системы определяется не только технической автономностью, но и качеством взаимодействия между человеком и автономным компонентом [1].

Особое значение в данном контексте приобретает проблема понимания состояния человека. Интеллектуальная система должна учитывать не только формальное содержание команды оператора, но и контекст взаимодействия, уровень его когнитивной нагрузки, особенности коммуникации и, потенциально, эмоциональные сигналы.

Именно здесь возникает перспективная связь между развитием человекоцентричного искусственного интеллекта и концепцией цифровой эмпатии.

Основная часть. Понятие цифровой эмпатии первоначально развивалось применительно к коммуникации между людьми в цифровой среде. В ранней работе Terry и Cain цифровая эмпатия была описана как проявление традиционных эмпатических характеристик - заботы, внимания и понимания другого человека - посредством компьютерно-опосредованной коммуникации [2].

Цифровая среда существенно изменяет условия эмпатического взаимодействия. В текстовой, голосовой или дистанционной коммуникации часть невербальных сигналов может отсутствовать или приобретать иное значение. Поэтому понимание состояния другого человека требует интерпретации доступных цифровых сигналов и контекста коммуникации.

Современные исследования подтверждают, что цифровая эмпатия постепенно превращается в самостоятельное направление изучения. В частности, проведенная в 2025 году дополнительная валидация Digital Communication Empathy Scale показала возможность надежного измерения эмпатии именно в контексте цифровой коммуникации [3].

При этом важно различать цифровую эмпатию человека и эмпатическое поведение искусственного интеллекта. В первом случае речь идет о способности человека понимать и учитывать эмоциональное состояние другого посредством цифровых каналов. Во втором - о способности технической системы распознавать релевантные сигналы и формировать ответ, который воспринимается человеком как учитывающий его состояние.

Следовательно, применительно к беспилотным системам цифровую эмпатию целесообразно рассматривать не как утверждение о наличии у машины человеческих эмоций, а как принцип адаптивного цифрового взаимодействия, при котором интеллектуальная система учитывает состояние и коммуникативные особенности человека.

Традиционная модель управления БПЛА предполагает преимущественно инструментальное взаимодействие: человек формирует команду, а техническая система ее выполняет.

Развитие автономных систем постепенно меняет эту модель. В 2025 году было опубликовано исследование, посвященное человекоцентричному взаимодействию с роями БПЛА. Авторы отмечают, что при увеличении

количества автономных аппаратов традиционная модель управления становится недостаточной, поскольку оператор сталкивается с большим объемом информации и повышенной когнитивной нагрузкой [4].

В результате возникает новая архитектура (рисунок 1):

оператор → интеллектуальный интерфейс → AI-агент → беспилотная
система → окружающая среда

Рисунок 1– Структурная схема взаимодействия элементов в новой
архитектуре управления беспилотной системой

В такой архитектуре искусственный интеллект выступает своеобразным посредником между человеком и физической системой.

Например, оператор может сформулировать задачу естественным языком, после чего AI-система интерпретирует намерение, анализирует текущую ситуацию, формирует план и передает необходимые команды специализированным модулям управления.

Таким образом, коммуникация перестает быть исключительно командной. Она становится контекстной и адаптивной.

Систематический обзор *empathic systems*, опубликованный в *Sensors*, показывает, что исследования эмпатического взаимодействия человека и технологий включают распознавание эмоциональных состояний, контекстное понимание, различные модальности взаимодействия и адаптацию поведения системы [5].

Эти положения могут быть перенесены на интеллектуальные беспилотные системы.

Представим ситуацию, в которой оператор управляет несколькими автономными аппаратами одновременно. В условиях высокой информационной нагрузки система может обнаружить признаки затруднения взаимодействия: увеличение количества повторных команд, изменение голосовых характеристик, длительные задержки реакции или неоднократное изменение поставленной задачи.

Интеллектуальный интерфейс потенциально может использовать подобные сигналы для адаптации взаимодействия:

- уменьшить количество второстепенной информации;
- выделить критические сообщения;
- изменить способ представления данных;
- предложить оператору готовые варианты действий;
- запросить подтверждение наиболее значимого решения;
- предоставить краткое объяснение собственного решения.

В данном случае цифровая эмпатия проявляется не в «переживании» системой эмоционального состояния человека, а в адаптации поведения системы с учетом состояния человека.

Такой подход соответствует современному пониманию human-centered AI, в рамках которого эффективность интеллектуальной системы рассматривается совместно с особенностями человеческого пользователя.

Одним из ключевых факторов взаимодействия человека с автономными системами является доверие. В обзоре 2026 года, посвященном взаимодействию человека и автономных AI-агентов, подчеркивается значимость доверия для эффективности human-autonomous teaming и рассматривается связь архитектуры AI-агента с формированием доверия человека [1].

Особенно интересна здесь связь цифровой эмпатии с объяснимостью искусственного интеллекта. Если автономная система просто сообщает оператору: «Маршрут изменен», человек получает результат, но не обязательно понимает причины решения. Если же система сообщает: «Маршрут изменен: обнаружено препятствие на исходной траектории. Предлагаемый маршрут увеличивает время полета на 38 секунд», коммуникация становится более прозрачной.

Следовательно, человекоцентричный AI должен не только принимать решения, но и уметь коммуницировать их понятным для человека способом. Исследования explainable interfaces для human-autonomy teaming подчеркивают, что объяснимость является важным условием формирования взаимопонимания и доверия между человеком и автономной системой [6].

Интересно, что свежие исследования непосредственно в области автономных дронов также демонстрируют значение мультимодальной обратной связи. В исследовании 2026 года было показано, что различные формы визуальной, тактильной и аудиальной обратной связи способны по-разному влиять на доверие человека к AI и его когнитивную нагрузку при работе с автономным дроном [7].

Это позволяет рассматривать цифровую эмпатию как потенциальный принцип адаптации интерфейса под состояние оператора.

Развитие генеративного ИИ расширяет возможности такого подхода. Большие языковые модели способны анализировать естественно-языковые запросы, контекст диалога и формировать адаптированные ответы.

Исследования human-AI interaction уже демонстрируют возможность возникновения различных форм опосредованной эмпатии в коммуникации человека с AI-системами [8-10].

Однако перенос этих результатов на беспилотные системы требует осторожности. В случае чат-бота ошибка в интерпретации эмоционального состояния пользователя может привести к неудачной коммуникации. В случае автономного БПЛА ошибка способна иметь физические последствия.

Поэтому перспективной представляется многоуровневая архитектура, в которой генеративный ИИ не осуществляет непосредственно критически важное управление, а выполняет функции:

- интерпретации естественно-языковых запросов;
- анализа контекста взаимодействия;
- адаптации информационной подачи;

- формирования объяснений;
- поддержки принятия решений оператором.

Низкоуровневые функции - стабилизация, навигация, предотвращение столкновений и другие критические операции — при этом должны оставаться под контролем специализированных алгоритмов и механизмов безопасности.

На основании рассмотренной литературы можно предложить концептуальную модель взаимодействия (рисунок 2):

Сенсорные данные → мультимодальный AI → оценка состояния среды →
оценка состояния оператора → интеллектуальное планирование → адаптивный
интерфейс → оператор

Рисунок 2 – Концептуальная модель взаимодействия

В такой модели формируются два взаимосвязанных информационных контура.

Первый – контур окружающей среды, включающий визуальные, навигационные и сенсорные данные.

Второй – контур человека, включающий параметры взаимодействия, особенности команд, динамику поведения и другие доступные цифровые признаки состояния оператора.

Искусственный интеллект объединяет оба контура и определяет оптимальный способ взаимодействия. Это позволяет перейти от модели «человек управляет дроном» к модели «человек и интеллектуальный агент совместно решают задачу». В данном случае цифровая эмпатия может рассматриваться как один из принципов проектирования такого взаимодействия.

Заключение. Развитие искусственного интеллекта постепенно меняет характер взаимодействия человека с беспилотными системами. Автономный дрон перестает быть исключительно исполнительным техническим устройством и приобретает характеристики интеллектуального агента, способного интерпретировать задачи, анализировать окружающую среду и взаимодействовать с оператором.

В этих условиях технической автономности становится недостаточно. Для эффективного взаимодействия необходимо учитывать человеческий фактор – когнитивную нагрузку, доверие, особенности коммуникации и способность человека понимать решения автономной системы.

Концепция цифровой эмпатии может рассматриваться как перспективный компонент человекоцентричного ИИ. В применении к дроновой индустрии она предполагает способность интеллектуальной системы учитывать доступные цифровые признаки состояния оператора и адаптировать коммуникацию, интерфейс и информационную поддержку к особенностям ситуации.

При этом цифровая эмпатия не должна интерпретироваться как наличие у машины человеческого эмоционального опыта. Речь идет о функционально-

адаптивном принципе взаимодействия, при котором AI-система демонстрирует чувствительность к человеческому контексту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Zamecnik A., Febriantoro W., Cukurova M., Joksimović S., Grossmann G., Siemens G. et al. Linking AI agent architectures to trust antecedents in human-autonomous teams: a scoping review // *Artificial Intelligence Review* –2026. – Vol. 59. Article 178. – DOI: 10.1007/s10462-026-11572-z.

2 Terry C., Cain J. The Emerging Issue of Digital Empathy // *American Journal of Pharmaceutical Education* – 2016. – Vol. 80, No. 5. Article 76. – DOI: 10.5688/ajpe80576.

3 Collins A. M., Warburton W. A., Sweller N., Bussey K. Further validation of the Digital Communication Empathy Scale (DCES) // *Computers in Human Behavior Reports* –2025. – Vol. 19. Article 100721. – DOI: 10.1016/j.chbr.2025.100721.

4 Towards human-centered interaction with UAV swarms: Framework, system design, and user study // *Design and Artificial Intelligence* – 2025. – Vol. 1, No. 3. Article 100029. – DOI: 10.1016/j.daai.2025.100029.

5 Daher K., Saad D., Mugellini E., Aboukhaled O. et al. Empathic and Empathetic Systematic Review to Standardize the Development of Reliable and Sustainable Empathic Systems // *Sensors* – 2022. – Vol. 22, No. 8. Article 3046. – DOI: 10.3390/s22083046.

6 Kong X., Xing Y., Tsourdos A., Wang Z., Guo W., Perrusquia A., Wikander A. Explainable Interface for Human-Autonomy Teaming: A Survey. – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2405.02583.

7 Enhancing human-AI trust through multimodal feedback: A study of visual, haptic, and auditory augmentation in drone shared autonomy // *Computers in Human Behavior Reports* – 2026. – DOI: 10.1016/j.chbr.2026.100959.

8 Jiang Q., Zhang Y., Pian W. Chatbot as an emergency exist: Mediated empathy for resilience via human-AI interaction during the COVID-19 pandemic // *Information Processing & Management* – 2022. – Vol. 59, No. 6. Article 103074. – DOI: 10.1016/j.ipm.2022.103074.

9 Kushniruk A. W., Rohani S., Borycki E. M. Building Relationships: A Scoping Review of Empathy in Human-Robot Interaction // *Studies in Health Technology and Informatics* –2026. – Vol. 336. P. 710–714. –DOI: 10.3233/SHTI260263.

10 Jirak D., Maes P., van Rooy D. Trust Me, I'm AI: A User-Centric Review of Human-Machine Interaction and Teaming With Explainable AI // *IEEE Access* – 2026. – Vol. 14. P. 59580–59606. – DOI: 10.1109/ACCESS.2026.3682940.

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КОМПЛЕКСНЫЕ БЕСПИЛОТНЫЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОХРАНЯЕМЫХ ОБЪЕКТОВ И ЛИЦ

старший офицер охраны,
майор Әбдуәлім Ә.Т.
Служба государственной охраны
Республики Казахстан,
г. Астана, Республики Казахстан

Аннотация. В статье рассматривается концепция создания комплексного отечественного продукта, объединяющего беспилотные авиационные системы и технологии искусственного интеллекта, для решения задач государственной охраны. Проанализированы направления применения компьютерного зрения, предиктивной аналитики, роевых и антидроновых технологий при обеспечении безопасности охраняемых объектов и лиц. Обобщён международный опыт и предложены практические шаги по поэтапному внедрению отечественных разработок в деятельность Службы государственной охраны Республики Казахстан.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы; искусственный интеллект; государственная охрана; охраняемые объекты и лица; компьютерное зрение; предиктивная аналитика; антидроновые технологии; комплексная безопасность; роевой интеллект.

Введение. Обеспечение безопасности охраняемых объектов и охраняемых лиц является ключевой функцией государства и одним из главных условий устойчивого развития общества. Стремительное развитие беспилотных авиационных систем (БАС) и технологий искусственного интеллекта (ИИ) формирует принципиально новую среду угроз и одновременно открывает новые возможности для повышения эффективности охранных мероприятий. Если еще в 2010 г. беспилотные летательные аппараты рассматривались преимущественно как узкоспециализированное средство воздушной разведки, то сегодня они превращаются в доступный, дешёвый и массовый инструмент, способный использоваться как в интересах охраны, так и во вред ей.

Служба государственной охраны Республики Казахстан, осуществляющая в пределах установленной законом компетенции охранные мероприятия по обеспечению безопасности охраняемых лиц и объектов [1], объективно заинтересована в применении беспилотных и интеллектуальных технологий для решения собственных функциональных задач. Общий вектор их развития в стране задают профильные государственные документы – Концепция развития гражданской беспилотной авиации Республики Казахстан на 2025-2031 гг. [2] и Концепция развития искусственного интеллекта в Республике Казахстан на

2024-2029 гг. [3]. Предмет настоящей статьи - прикладной аспект: использование беспилотных и интеллектуальных технологий непосредственно в интересах государственной охраны, то есть переход от разрозненного использования отдельных технических средств к созданию единого комплексного продукта - системы, объединяющей обнаружение, анализ, прогнозирование и, при необходимости, нейтрализацию воздушных угроз в отношении охраняемых объектов и лиц.

Цель настоящей статьи - обобщить существующие подходы к применению искусственного интеллекта в беспилотных системах безопасности и сформулировать концептуальные предложения по созданию комплексного продукта в интересах государственной охраны, доступные для понимания как специалистам, так и участникам конференции без глубокой технической подготовки.

Основная часть. Современные вызовы в сфере обеспечения безопасности охраняемых объектов и лиц. Классическая модель охраны строится на сочетании физической охраны, инженерно-технических средств и оперативно-режимных мероприятий. Появление доступных гражданских дронов существенно меняет эту модель, поскольку добавляет новое, вертикальное измерение угрозы, слабо покрываемое традиционными периметральными системами. Малый беспилотник способен незаметно преодолевать инженерные заграждения, вести скрытое наблюдение, доставлять запрещённые предметы или представлять непосредственную опасность для охраняемых лиц во время протокольных и массовых мероприятий.

Особую значимость эта угроза приобретает применительно к защите первых лиц государства и мест их постоянного и временного пребывания, включая резиденцию Главы государства Республики Казахстан. Мировая практика последних лет содержит ряд резонансных случаев целенаправленного применения дронов против президентов и высшего военного руководства, которые наглядно подтверждают реальность подобной угрозы. 4 августа 2018 г. в Каракасе (Венесуэла) во время военного парада с участием президента страны Н. Мадуро были применены беспилотники, начинённые взрывчаткой; инцидент официально квалифицирован властями страны как покушение на главу государства [4]. 3 января 2020 г. в результате удара американского разведывательно-ударного беспилотника MQ-9 «Reaper» по автоколонне в международном аэропорту г. Багдад был уничтожен командующий силами специального назначения «Аль-Кудс» Корпуса стражей исламской революции Ирана генерал К. Сулеймани (один из наиболее известных в мире случаев адресного применения ударного БПЛА против высокопоставленного военачальника) [5].

Схожая тенденция приобрела системный характер и в вооружённом конфликте между Россией и Украиной, где удары беспилотников по военным служащим различного уровня, включая высшее командование, стали регулярной практикой. Кроме того, по данным Организации Объединённых Наций: с начала конфликта в результате ударов FPV-дронов погибли не менее

395 мирных жителей [6]. Эти случаи убедительно показывают, что применение ударных беспилотников против охраняемых лиц перестало быть гипотетическим сценарием и превратилось в устойчивую практику современных конфликтов, что напрямую повышает значимость соответствующей готовности со стороны Службы государственной охраны.

Не менее показателен и опыт защиты охраняемых объектов инфраструктурного характера. Атака на нефтеперерабатывающие объекты компании Saudi Aramco в Абкайке и Хурайсе 14 сентября 2019 г. продемонстрировала, что наличие современных зенитных ракетных комплексов не гарантирует полную защиту от воздушных ударов (временная остановка добычи значительной части нефти в стране) [7].

Приведённые случаи наглядно подтверждают общий вывод отраслевых исследований: малый эффективный радиус отражения (ЭПР) современных дронов (порядка 0,01-0,1 м²), и их высокая манёвренность объективно снижают эффективность традиционных радиолокационных и зенитных средств обнаружения, особенно в условиях сложного рельефа и неблагоприятных погодных условий [8]. Для Республики Казахстан, обладающей значительной территорией, разнообразием ландшафтов – от степных и пустынных районов до горной местности – и характерными климатическими условиями (высокие летние температуры, пыльные бури), эта проблема приобретает дополнительную специфику: универсальные зарубежные решения не всегда учитывают региональные особенности эксплуатации техники [9].

Одновременно расширяется и позитивный контур применения БАС: они используются для патрулирования периметра, воздушной разведки маршрутов, мониторинга мест массового пребывания людей и оперативного реагирования на нештатные ситуации. Таким образом, вызов состоит не в том, чтобы противостоять беспилотной авиации как таковой, а в том, чтобы обеспечить опережающее и качественное собственное применение этой технологии, дополненное надёжной системой противодействия недобросовестному или враждебному её использованию.

К числу системных вызовов также относятся: дефицит отечественных технологических решений и связанная с этим зависимость от импортных систем; необходимость подготовки квалифицированных кадров, владеющих одновременно навыками эксплуатации БАС и основами работы с интеллектуальными алгоритмами; а также отсутствие единых стандартов интеграции разнородных технических средств охраны в общий информационный контур.

Беспилотные авиационные комплексы в системе государственной охраны.

Применение беспилотных авиационных комплексов в деятельности по обеспечению государственной охраны целесообразно рассматривать по нескольким функциональным направлениям. Первое – это воздушное патрулирование и мониторинг периметра охраняемых объектов, позволяющее в режиме реального времени контролировать прилегающую территорию, выявлять несанкционированное приближение людей и техники, фиксировать

изменения обстановки. Второе направление – обеспечение безопасности маршрутов движения и мест проведения протокольных мероприятий, где БАС может выполнять функцию воздушной разведки и заблаговременного выявления потенциальных угроз.

Третье направление – применение БАС в качестве элемента системы раннего предупреждения, работающего в связке со стационарными постами наблюдения и инженерно-техническими средствами охраны. Четвёртое – использование беспилотных комплексов для оценки последствий нештатных ситуаций и координации действий сил охраны без риска для личного состава.

Важно подчеркнуть, что эффективность применения БАС определяется не столько лётно-техническими характеристиками отдельного аппарата, сколько качеством интеграции всех компонентов в единый комплекс: датчиков, каналов связи, программного обеспечения обработки данных и, что особенно важно, алгоритмов искусственного интеллекта, обеспечивающих автоматизированный анализ поступающей информации. Именно переход от отдельного технического средства к комплексному продукту составляет содержание современного этапа развития дронной индустрии, что прямо отражено в названии настоящей конференции.

Технологии искусственного интеллекта как основа комплексного продукта.

Ценность беспилотного комплекса для задач охраны определяется не столько самим фактом наличия летательного аппарата, сколько интеллектуальной «начинкой» – алгоритмами, позволяющими автоматически анализировать получаемые данные, отличать значимые события от фоновых шума и формировать для оператора понятные, применимые в оперативной обстановке рекомендации. Рассмотрим ключевые технологические направления.

Компьютерное зрение и распознавание образов.

Компьютерное зрение считается одной из наиболее зрелых и широко апробированных технологий искусственного интеллекта [10]. Применительно к задачам охраны оно позволяет решать несколько практических задач: детекцию и идентификацию объектов в сложной обстановке, в том числе для систем охраны и обеспечения безопасности; высокоскоростное распознавание значительного числа объектов в поле зрения камер; выявление оставленных без присмотра предметов и потенциально опасных предметов; а также ситуационный (событийный) анализ, направленный на обнаружение признаков нештатной обстановки [10].

Практическая эффективность подобных систем подтверждается и отечественным опытом. Интеллектуальная система видеомониторинга «Сергек» помимо фиксации нарушений правил дорожного движения, применяется для контроля мест массового скопления людей и оперативного реагирования на инциденты. В Алматы в рамках Единой системы видеомониторинга (*ЕСВМ*) к единой платформе подключено свыше 45 тысяч камер государственных и частных объектов; видеоаналитика системы распознаёт задымление, открытое пламя, оставленные без присмотра предметы, а также осуществляет идентификацию по одежде, полу и лицам [12]. Подключение уличных и

стационарных камер к нейросетевым алгоритмам распознавания существенно повышает раскрываемость правонарушений и позволяет заблаговременно выявлять потенциально опасные ситуации [10]. Перенесённый на беспилотную платформу, этот функционал приобретает дополнительное преимущество - мобильность и возможность оперативного изменения точки наблюдения, что особенно важно при сопровождении подвижных охраняемых лиц и обеспечении безопасности временных мероприятий.

Предиктивная аналитика и прогнозирование обстановки.

Второе направление связано с переходом от простого фиксирования событий к прогнозированию развития обстановки. Системы предиктивной аналитики на основе накопленных данных о характерных маршрутах, местах скопления людей, ранее зафиксированных нештатных ситуациях позволяют заблаговременно выявлять отклонения от типовой картины и привлекать внимание оператора к потенциально проблемным зонам ещё до наступления инцидента. Для государственной охраны подобный инструмент особенно ценен при планировании маршрутов передвижения охраняемых лиц и заблаговременной оценке рисков в местах проведения протокольных мероприятий.

Групповое применение беспилотных систем и роевой интеллект.

Отдельного внимания заслуживает технология группового (роевого) применения беспилотных аппаратов, при которой несколько дронов управляются на основе децентрализованных алгоритмов взаимодействия, позволяющих группе действовать как единая распределённая система без постоянного участия оператора в управлении каждым отдельным аппаратом [13]. Использование нескольких дронов вместо одного повышает эффективность мониторинга, особенно в условиях ограниченного времени на принятие решения, и обеспечивает избыточность (отказоустойчивость) системы при выходе из строя отдельных элементов [13].

Применительно к задачам охраны роевые технологии могут использоваться для одновременного контроля протяжённого периметра, покрытия обширной территории при проведении массовых мероприятий, а также для организации многоуровневого наблюдения, при котором одни аппараты выполняют функцию обзорного патрулирования, а другие – детальной проверки выявленных отклонений.

Интеллектуальные антидроновые комплексы.

Обратной стороной развития беспилотной авиации является необходимость защиты охраняемых объектов от несанкционированного и враждебного применения дронов. Современные антидроновые (контр-БПЛА) комплексы строятся на принципе мультисенсорной интеграции, объединяющей радиолокационные станции, радиочастотные пеленгаторы, оптико-электронные и инфракрасные датчики, а также средства радиочастотного подавления, работа которых синхронизируется программным обеспечением с элементами искусственного интеллекта [9]. Ни один отдельно взятый сенсор не способен обеспечить достаточную достоверность обнаружения дрона во всех условиях

обстановки, поэтому слияние данных разнородных источников с помощью алгоритмов машинного обучения признаётся ключевым фактором повышения точности идентификации целей и снижения числа ложных срабатываний [9].

В отечественной научно-технической практике имеется задел в этом направлении. В 2025 году авторский коллектив РГУ «Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи» Министерства обороны Республики Казахстан и НАО «Казахский национальный технический университет имени К.И. Сатпаева» (Д.В. Исмаилов, Д.А. Ксенофонтов, Н.Б. Зикирьев, А.А. Кабдуллин) представил разработку антидроновой системы «ADEX-2024» для обнаружения, радиочастотного подавления и поражения БПЛА [9]. Методом имитационного моделирования Монте-Карло (1000 итераций) верифицирована вероятностная модель работы комплекса с ИИ-координацией подсистем обнаружения (радар Х-диапазона), подавления и поражения целей, учитывающая климатические и географические условия Центральной Азии - рабочие температуры до +50 °С, запылённость воздуха, особенности горного рельефа. По заявленным авторами результатам моделирования, комплекс обеспечивает дальность обнаружения до 10 км против 3,5–6,4 км у зарубежных аналогов при существенно меньшей стоимости [9]. Исследование выполнено при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан [9]. Подобные разработки подтверждают, что создание отечественного продукта в данной сфере не только технически осуществимо, но и способно по ряду параметров быть конкурентоспособным по отношению к зарубежным аналогам, одновременно снижая технологическую зависимость от импортных поставок [9].

Концепция комплексного продукта для Службы государственной охраны.

Под комплексным продуктом в контексте настоящей статьи понимается не отдельное техническое средство, а целостная организационно-техническая система, объединяющая четыре взаимосвязанных компонента. Первый компонент – сенсорный контур: беспилотные летательные аппараты различного класса совместно со стационарными и мобильными средствами обнаружения, обеспечивающие непрерывный сбор данных об обстановке. Второй компонент – интеллектуальное ядро обработки данных, включающее алгоритмы компьютерного зрения, предиктивной аналитики и распределённой координации, преобразующие первичные данные в готовые для принятия решения сведения. Третий компонент – контур противодействия, то есть антидроновая подсистема, способная в автоматизированном режиме выявлять и нейтрализовать несанкционированные полёты в границах охраняемой территории. Четвёртый компонент – единая программная платформа управления, объединяющая перечисленные подсистемы в общий информационный контур и предоставляющая оператору наглядный, понятный интерфейс поддержки принятия решений.

Принципиальное значение имеет то, что подобный продукт должен создаваться как отечественная разработка либо как локализованное решение с максимально возможной долей местного производства и обслуживания. Это

согласуется с задачами Концепции развития гражданской беспилотной авиации Республики Казахстан на 2025-2031 гг., предусматривающей стимулирование научных и технологических исследований, подготовку профессиональных кадров и повышение уровня локализации производства компонентов беспилотных авиационных систем [2]. Для Службы государственной охраны такой подход обеспечивает не только экономическую целесообразность, но и, что не менее важно, независимость от внешних поставщиков в вопросах, напрямую связанных с национальной безопасностью.

Внедрение комплексного продукта целесообразно осуществлять поэтапно: на первом этапе – апробация отдельных модулей (видеоаналитика, базовое обнаружение беспилотников) на ограниченном числе объектов; на втором – интеграция модулей в единую программную платформу и расширение перечня охраняемых объектов; на третьем – переход к полнофункциональному комплексу с элементами группового применения и автоматизированного противодействия, сопровождаемый формированием нормативной базы применения таких систем и системы подготовки специалистов.

Международный опыт: обобщённые подходы.

Мировой опыт свидетельствует о том, что применение беспилотных технологий в интересах охраны и противодействия дронам развивается по схожей логике в разных странах: от использования отдельных зарубежных образцов техники к формированию собственных научно-производственных компетенций. Так, израильская компания Rafael Advanced Defense Systems разработала антидроновый комплекс «Drone Dome», применяемый для прикрытия аэропортов и режимных объектов и обеспечивающий обнаружение целей на дальности порядка 3,5 км [9]. В Соединённых Штатах Америки Служба охраны Президента (Secret Service) и Министерство внутренней безопасности с 2018 г. наделены законодательно закреплёнными полномочиями по обнаружению, отслеживанию и нейтрализации беспилотников в целях защиты охраняемых лиц и объектов национального значения – соответствующий закон был принят по итогам анализа именно инцидента с применением дронов против президента Венесуэлы Н. Мадуро [14]. Специализированные ведомства и охранные структуры перечисленных государств последовательно переходят от закупки готовых иностранных систем к разработке национальных решений, адаптированных к конкретным климатическим, географическим и нормативным условиям, что в полной мере отражает и опыт Республики Казахстан, представленный отечественной разработкой «ADEX-2024» [9].

Общей чертой передового зарубежного опыта является отказ от единственного канала обнаружения угроз в пользу мультисенсорных комплексов, а также постепенный переход от систем с исключительно ручным управлением к системам с элементами автономного принятия решений под контролем оператора. При этом сохраняется общий принцип: окончательное решение о применении средств физического или радиоэлектронного воздействия принимает человек, тогда как искусственный интеллект выполняет функцию поддержки принятия решения, ускоряя обнаружение и первичную оценку

угрозы.

Для Республики Казахстан наиболее продуктивным представляется не прямое копирование зарубежных решений, а избирательное заимствование архитектурных принципов – прежде всего принципа мультисенсорной интеграции и модульности - при опоре на отечественную научно-исследовательскую базу и с обязательным учётом региональной специфики применения техники.

Перспективы внедрения и практические предложения.

С учётом изложенного представляется целесообразным сформулировать следующие практические предложения по развитию направления в системе Службы государственной охраны Республики Казахстан.

Во-первых, инициировать создание межведомственной рабочей группы с участием профильных научных и производственных организаций Республики Казахстан для формирования технического задания на разработку отечественного комплексного продукта, объединяющего беспилотные и антидроновые технологии в интересах государственной охраны.

Во-вторых, предусмотреть поэтапную программу опытной эксплуатации отдельных модулей системы на выделенных объектах с последующим анализом результатов и корректировкой технических требований – по аналогии с подходом, применяемым при разработке и верификации отечественных антидроновых комплексов [9].

В-третьих, организовать целевую подготовку и повышение квалификации личного состава по вопросам эксплуатации беспилотных авиационных систем и базовым принципам работы с интеллектуальными алгоритмами анализа данных, что согласуется с задачами формирования кадрового потенциала отрасли, предусмотренными профильной государственной концепцией [2].

В-четвёртых, обеспечить участие представителей Службы государственной охраны в формировании нормативно-технических требований и стандартов применения беспилотных и антидроновых систем в местах массового пребывания людей и на объектах государственной важности, включая вопросы безопасного взаимодействия с гражданским воздушным пространством.

В-пятых, рассмотреть возможность научно-технического сотрудничества с отечественными университетами и научными организациями, уже имеющими практический задел в области интеллектуальных антидроновых систем [9], в целях адаптации перспективных разработок к специфическим задачам государственной охраны.

Заключение. Интеграция технологий искусственного интеллекта в беспилотные авиационные системы открывает качественно новые возможности для обеспечения безопасности охраняемых объектов и лиц. Переход от отдельных технических средств к единому комплексному продукту, объединяющему сенсорный контур, интеллектуальное ядро обработки данных, контур противодействия и программную платформу управления, соответствует общему вектору развития отрасли, закреплённому в государственных программных документах Республики Казахстан [2, 3].

Практическая реализация такого продукта требует последовательных, поэтапных решений: от апробации отдельных модулей до формирования полнофункционального комплекса, подкреплённого соответствующей нормативной базой и системой подготовки кадров. При этом ключевым условием успеха является опора на отечественный научно-технический потенциал, что позволит не только повысить эффективность охранных мероприятий, но и снизить зависимость от зарубежных поставщиков технологий в сфере, непосредственно связанной с обеспечением национальной безопасности.

Приведённые в статье примеры – от Акорды до Абкайка, от Каракаса до Красногоровки – говорят об одном: время на раздумья ограничено, а технологическое отставание в данной сфере напрямую конвертируется в уязвимость охраняемых лиц и объектов. Служба государственной охраны Республики Казахстан обладает всем необходимым для того, чтобы не догонять, а опережать эту угрозу – при условии, что работа по созданию отечественного комплексного продукта начнётся уже сегодня, объединив усилия государственных органов, отечественной науки и промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 О Службе государственной охраны Республики Казахстан: Закон Республики Казахстан от 3 октября 1995 года № 2483: (с изменениями и дополнениями) // Информационная система «ПАРАГРАФ». – URL: zakon.kz (дата обращения 26.09.2026).

2 Об утверждении Концепции развития гражданской беспилотной авиации Республики Казахстан на 2025–2031 годы: Постановление Правительства Республики Казахстан от 4 июня 2025 года № 412 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2500000412> (дата обращения 29.09.2026).

3 Об утверждении Концепции развития искусственного интеллекта в Республике Казахстан на 2024–2029 годы: Постановление Правительства Республики Казахстан от 24 июля 2024 года № 592 // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000592> (дата обращения 25.09.2026).

4 Президента Венесуэлы Николаса Мадуро пытались убить. Во время военного парада его атаковали дроны со взрывчаткой. Главное // Meduza. – 05.08.2018. – URL: <https://meduza.io/feature/2018/08/05/prezidenta-venesuely-nikolasa-maduro-pytalis-ubit-vo-vremya-voennogo-parada-ego-atakovali-drony-so-vzryvchatkoy-glavnoe>.

5 В Багдаде в результате авиаудара США убит генерал КСИР Касем Сулеймани // BFM.ru : деловой портал. – 2020. – 3 января. – URL: <https://www.bfm.ru/news/433414> (дата обращения 26.09.2026).

6 РБК: российский генерал-майор Павел Клименко погиб в ДНР после атаки дрона // Коммерсантъ: общественно-политическая газета. – 2024. – 9 ноября. –

URL: <https://www.kommersant.ru/doc/7295475> (дата обращения 26.09.2026).

7 Война. Тысяча двести двадцатый день. ООН опубликовала доклад об использовании FPV-дронов против мирного населения // Meduza: интернет-издание. – 2025. – 27 июня. – URL: meduza.io (дата обращения: 26.09.2026).

8 Нефтяная атака века: три главных вопроса о нападении дронов на НПЗ в Саудовской Аравии // Новая газета: общественно-политическая газета. – 2019. – 16 сентября. – URL: <https://novayagazeta.ru/articles/2019/09/16/81989-neftyanaya-ataka-veka> (дата обращения 26.09.2026)

9. Исмаилов Д.В., Ксенофонтов Д.А., Зикирьяев Н.Б., Кабдуллин А.А. Антидроновый комплекс для обнаружения, подавления и поражения целей // Вестник Академии гражданской авиации – 2025. – № 3 (38). – С. 22–31. – https://doi.org/10.53364/24138614_2025_38_3_2.

10 Сретенцев А.Н. Использование возможностей машинного распознавания образов в практике борьбы с преступностью // Вестник Калининградского филиала Санкт-Петербургского университета МВД России – 2026. – № 1 (83). – С. 64–70.

11 Куда идёт «Сергек»? // Inbusiness.kz: информационное агентство. – 2025. – 18 марта. – URL: <https://inbusiness.kz/ru/news/kuda-idet-sergek> (дата обращения: 25.09.2026).

12 В Алматы к Единой системе видеомониторинга подключили 45 тысяч камер // Kapital.kz: центр деловой информации. – 2024. – 28 октября. – URL: <https://kapital.kz/tehnology/130946/v-almaty-k-yedinoj-sisteme-videomonitoringa-podklyuchili-45-tysyach-kamer.html> (дата обращения 29.09.2026).

13 Ngoua Ndong Avele J.B. Development of Software and Algorithmic Support and an Interaction Communication System for Controlling a Swarm of Unmanned Aerial Vehicles Performing a Monitoring Mission in Group // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2023. – Т. 16, № 1. – С. 66–76. – DOI: 10.32603/2071-8985-2023-16-1-66-76.

14 Counter Unmanned Aircraft Systems Legal Authorities: фактологическая справка Агентства по кибербезопасности и защищённости инфраструктуры (CISA) Министерства внутренней безопасности США о полномочиях, предоставленных Preventing Emerging Threats Act of 2018 // Cybersecurity and Infrastructure Security Agency : официальный сайт. – 2022. – URL: <https://www.cisa.gov/sites/default/files/2022-11/DHS%20CISA%20UAS%20Legal%20Authorities%20Factsheet.pdf> (дата обращения: 29.09.2026).

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ПОДГОТОВКИ ВОЕННЫХ СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

доктор философии PhD,
полковник запаса Бекишев Е.Ж.
Национальный университет
обороны Республики Казахстан,
г. Астана, Республика Казахстан

Аннотация. Материал посвящен анализу зарубежного опыта подготовки военных специалистов в области эксплуатации и применения беспилотных летательных аппаратов и беспилотных авиационных систем. Рассмотрены подходы США, КНР, Великобритании, Франции, Италии, Польши, Республики Корея, Израиль. Основное внимание уделено архитектуре подготовки персонала: уровни подготовки, формы подготовки, траектории подготовки. Представлены выводы по должностным категориям в области обслуживания беспилотных авиационных систем в военной сфере и краткие предложения для системы военного образования.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, беспилотные летательные аппараты, оператор, специалист, подготовка кадров.

Введение. Беспилотные авиационные системы до 2000 годов рассматривались в основном как объект обеспечения воздушной разведки. В настоящее время, с учетом эффективного применения в вооруженных конфликтах современности беспилотные авиационные системы становятся ключевыми составляющими военной техники не только в области разведки, но и как поражающие средства с высокой степенью проникновения к любым объектам противоборствующей стороны.

Соответственно актуализируются взгляды к системе подготовки кадров в области применения беспилотных авиационных систем. Для Республики Казахстан, проводящей модернизацию армии и расширяющей научно-технический потенциал оборонной сферы, сопоставление отечественной и зарубежной практики представляет собой ключевой инструмент формирования эффективной модели подготовки. [1].

Для анализа зарубежного опыта важно различать:

- беспилотные авиационные системы (БАС), включающая наземные средства, связь, сенсоры и персонал;
- беспилотные летательные аппараты, как непосредственно воздушное судно (БПЛА).

Для определения направлений подготовки и квалификаций необходимо разделить должностные функции при обслуживании и применении БАС.

На первых порах для подготовки военных специалистов было достаточно обучить операторов навыкам военной специфики в учебных центрах. Однако широкое применение БАС требует проработки тактики их применения, алгоритма взаимодействия с различными родами войск, структуры принятия решений и т.д.

Соответственно, все эти вопросы ложатся в основу разработки инструкций, положений, рекомендаций, а в дальнейшем целую систему курсовой подготовки и конечно программу подготовки кадров в области беспилотных авиационных систем.

Основная часть. В ведущих зарубежных вооружённых силах подготовка кадров по БАС постепенно выходит за рамки короткого курса «оператор конкретного типа беспилотника» и формируется как многоуровневая система: базовая авиационная подготовка, эксплуатация и техническое обслуживание, работа с полезной нагрузкой и данными, планирование, воздушное право и безопасность, тренажёрная подготовка, подготовка инструкторов и обучение командного состава.

Особенности подготовки специалистов в области БАС в зарубежных странах:

1) Соединённые Штаты Америки. Систем подготовки специалистов БАС разделена между видами вооружённых сил и включает начальную профессиональную подготовку рядового и сержантского состава, подготовку офицеров, технических специалистов, инструкторов и командно-штабного персонала.

В учебном центре Сухопутных войск ежегодно обучает приблизительно 2000 военнослужащих по 12 программам. Для подготовки экипажей используются современные тренажёры и реальные полёты. Синтетическая среда используется для освоения процедур, а реальный полёт – для подтверждения практической готовности.

Планируется переход на новый профиль обучения, охватывающий эксплуатацию, обслуживание, обучение других, планирование и консультирование, что подразумевает переход от узкой «операторской» специальности к более универсальному политехническому профилю, особенно для малых и средних БАС [2].

2) Великобритания. Британская модель сочетает профессиональную авиационную подготовку экипажей БАС с общей оборонной стратегией беспилотных систем.

7 июля 2025 года открыт центр Protector Training Centre. Проводится более 30 многопрофильных курсов. В центре размещены наземные станции управления, симуляторы и учебные зоны; официально подчёркивается сочетание live и synthetic training [3].

3) Франция. Французские Сухопутные войска перешли к централизованной модели, создав отдельную Школу дронов. В официальных материалах 2023 года указывалось 47 технических и тактических программ подготовки по беспилотной линейке Сухопутных войск [4].

4) Италия. Италия в 2026 году начала формировать централизованную межвидовую систему подготовки по БАС. ВВС Италии сформировали лётную школу дистанционно пилотируемых воздушных систем. Разграничение ролей в системе подготовки: академия формирует офицера и авиационного специалиста, школа БАС даёт типовую квалификацию; строевая часть доводит до должностной готовности [5].

5) Польша. Польша сочетает специализированную подготовку операторов и техников, инженерное высшее образование и командно-тактическую учебную инфраструктуру. Польская модель фактически формирует три ветви: операторскую, инженерную и командно-тактическую [6].

6) Республика Корея. В 2026 году Республика Корея расширила массовую подготовку военнослужащих по БПЛА, включая интеграцию соответствующих навыков в курсантскую подготовку военных академий.

В июле 2026 года Kookbang Ilbo Academy сообщило о подготовке курсантов первого курса. Обучение было частью шестинедельной летней военной подготовки; предварительное ознакомление с техникой проводилось ещё в течение семестра. Практика строилась поэтапно: симуляционное освоение, демонстрация, базовое управление и оценка навыков. Важен сам принцип включения БПЛА уже в подготовку младших курсантов – как базовой технологической грамотности будущего офицера [7].

7) Китайская Народная Республика. В НОАК обучение беспилотным системам развивается в авиационных университетах, инженерных учебных заведениях и профессиональной системе сертификации военнослужащих.

В июле 2020 года Министерство национальной обороны КНР сообщало о лаборатории технологий БПЛА и учебных средствах для систем управления дронами. Важный образовательный акцент: командная подготовка рассматривается одновременно с операторской.

В открытых материалах НОАК описывалась система, где военнослужащий проходит онлайн-модули военного профессионального образования, накапливает практический опыт в части, а затем проходит централизованную оценку экспертами войск и военных учебных заведений. Успешная оценка может завершаться выдачей военной и гражданской квалификации. [8]

Такая схема позволяет учитывать войсковую практику как часть образовательного результата и не концентрировать весь практический этап только в академии.

8) Израиль. Израильская система имеет длительный опыт подготовки операторов дистанционно пилотируемых воздушных судов и сочетает авиационную, разведывательную и командную составляющие [9].

Сравнительная характеристика форм подготовки военных кадров в области применения БАС в зарубежных странах представлена в таблице 1.

Основной дилеммой является, в каких узких направлениях готовить, дифференциация по квалификационным и должностным категориям, период обучения, база практики и обучения: полигоны, тренажеры.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика форм подготовки военных кадров в области применения БАС в зарубежных странах

Страна	Профили	Форма подготовки	Отличительная черта
США	оператор, техник, инструктор, командир, пилот	симулятор + реальные полёты	масштаб и множество квалификаций
Великобритания	пилот БАС, персонал в области работы с информацией для БПЛА	live + synthetic (концепция гибридного обучения: тренажеры и практика), подготовка операторов	интеграция с НАТО
Франция	операторы, мониторы, инструкторы	центр + делегированные площадки	массовая инструкторская сеть
Италия	операторы, пилоты, специалисты систем	базовая, техническая подготовка, специализированная	национальный межвидовой хаб
Польша	операторы, техники, инженеры, офицеры	вуз + квалификация + лаборатории	сильная инженерная ветвь
Республика Корея	курсанты, операторы, инструкторы	теория + симулятор + практика	массовое обучение будущих офицеров
КНР	операторы, инженеры, командиры	вуз + войсковая практика + сертификация	БАС как отдельная дисциплина
Израиль	оператор, сенсорная работа, командир	6–7 месяцев подразделение +	глубокая разведывательная составляющая

В классическом варианте система подготовки военных кадров в зарубежных странах делится на 3 уровня (таблица 2).

При применении БПЛА предусматриваются следующие должности, связанные с применением БПЛА:

– оператор (внешний пилот) – управление полетом и выполнение процедур безопасной эксплуатации;

– оператор полезной нагрузки – работа с оптико-электронными, радиотехническими и иными полезными нагрузками, интерпретация поступающих данных;

– командир экипажа или руководитель полетов – планирование учебной деятельности, контроль безопасности, принятие решения о допуске к полетам;

– технический специалист – диагностика, обслуживание, ремонт, конфигурирование аппаратной части и наземного оборудования;

– специалист связи и сетевой интеграции – обеспечение устойчивой работы каналов связи, обмена данными и совместимости с системами управления;

– специалист по обработке информации – первичная обработка фото-, видео- и телеметрических данных, подготовка информационных продуктов;

– инструктор/мастер-инструктор – подготовка и сертификация операторов внутри части;

– специалист по безопасности полетов и воздушному пространству – соблюдение процедур, правил допуска, ограничений и взаимодействия с авиационными органами.

Таблица 2 – Уровни подготовки военных кадров в области применения БАС

Уровень	Целевая группа	Содержание
А - базовый	все курсанты	устройство БАС, безопасность, воздушное право, симулятор и практическое ознакомление
В - профессиональный	операторы и техники	углублённая теория, связь/навигация, сенсоры, обслуживание, симуляторы и практическая эксплуатация
С - продвинутый	командиры, инженеры, инструкторы	системная интеграция, методика обучения, испытания, автономность и ИИ, организация подразделений

В зарубежных странах присутствуют следующие траектории подготовки военных кадров в области применения БАС:

- гибридная концепция (в отдельных центрах БАС);
- тренажерная подготовка (симуляторы):
- практические полеты;
- подготовка техников;
- подготовка инструкторов;
- инженерная вузовская траектория;
- командная подготовка.

Анализ подготовки кадров показывает, что подготовка по БАС становится самостоятельной частью военного образования, а не только дополнительной специализацией.

Наиболее зрелые системы используют последовательность: теория → симулятор → практика → квалификация → подготовка в подразделении.

Симуляторы являются обязательной частью подготовки, особенно на сложных и дорогих системах.

В ряде государств создаются отдельные школы и центры компетенций, сохраняя базовое обучение в военных академиях.

Инженерная подготовка всё теснее связывается с эксплуатацией, программированием, сенсорикой, автономностью и ИИ.

Подготовка инструкторов и командного состава становится самостоятельной квалификационной траекторией.

На основе опыта подготовки специалистов в области БАС предлагается подготовку в Республике Казахстан проводить по следующим профилям и формам (таблица 3).

Таблица 3 – Профили подготовки военных кадров в области применения БАС

Профиль	Компетенции	Предложения по подготовке в РК
Оператор/ дистанционный пилот	Управление воздушным судном, предполётная подготовка, выполнение штатных процедур, безопасность.	Курс/колледж/ВУЗ
Специалист сенсоров / полезной нагрузки	Работа с оптико-электронными и иными сенсорами, наблюдение, первичная обработка информации.	Курс/колледж/ВУЗ
Техник / ремонтник	Диагностика, обслуживание и восстановление работоспособности комплекса.	Курс/колледж/ВУЗ
Инструктор	Методика обучения, оценка обучаемого, стандартизация процедур.	Курс/колледж/ВУЗ
Командир/ планировщик	Организация подразделения БАС, оценка рисков, постановка задач и интеграция с другими силами.	ВУЗ
Инженер беспилотных и автономных систем	Проектирование, программирование, навигация, сенсорики, автономность и испытания.	ВУЗ

Заключение. Зарубежный опыт показывает, что подготовка военных кадров по БАС превращается в самостоятельную систему образования с собственными школами, центрами компетенций, инженерными специальностями и инструкторскими квалификациями.

Система подготовки разделяет массовую базовую подготовку, профессионального оператора, специалиста сенсоров, техника, инструктора, инженера и командира, связывая их общей системой стандартов и последующей подготовкой в подразделении. Для военного учебного заведения ключевым решением является не просто закупка БПЛА, а формирование устойчивого образовательного контура: программа, инструкторы, симуляторы, техническая лаборатория, полётная площадка, квалификационная оценка и механизм регулярного обновления содержания.

Казахстан обладает уникальной возможностью выстроить гибридную модель подготовки, сочетая лучшие практики с учетом национальных условий. Такая модель может стать основой для формирования современной, технологичной и устойчивой системы военного обучения, способной отвечать вызовам будущей оперативной среды и обеспечивать высокий уровень боевой готовности личного состава [10].

В Республике Казахстан с учетом наличия многоуровневой подготовки и системы непрерывного повышения квалификации целесообразно использовать потенциал военных колледжей и военных институтов для подготовки военных специалистов в области БАС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Концепция развития боевой подготовки Вооруженных Сил Республики Казахстан до 2030 года [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://archive.sarbaz.kz/analytics/kontseptsiya-razvitiya-boevoy-podgotovki-voorugennyh-sil-rk-do-2030-goda-17431145/> (дата обращения: 20.09.2026).
- 2 U.S. Army. New training, new tech, new aircraft will define Army Aviation's future. [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: https://www.army.mil/article/291797/new_training_new_tech_new_aircraft_will_define_army_aviations_future. / (дата обращения: 20.09.2026).
- 3 Royal Air Force. Protector Training Centre Opens at RAF Waddington. [Электронный ресурс]. – 2023. – URL: <https://www.raf.mod.uk/news/articles/protector-training-centre-opens-at-raf-waddington/> (дата обращения: 20.09.2026).
- 4 Ministère des Armées, France. École des drones. [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://www.defense.gouv.fr/terre/unites-larmee-terre/nos-brigades/19e-brigade-dartillerie/ecole-drones>. / (дата обращения: 20.09.2026).
- 5 Aeronautica Militare. 66th Wing: RPA flight school established in Frosinone. [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://www.aeronautica.difesa.it/en/news/66-stormo-costituita-a-frosinone-la-scuola-di-volo-per-aeromobili-a-pilotaggio-remoto-dellaeronautica-militare/>. (дата обращения: 20.09.2026).
- 6 Lotnicza Akademia Wojskowa. Centrum Szkolenia Personelu BSP. [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://www.wojsko-polskie.pl/law/centrum-szkolenia-personelu-bsp/>. (дата обращения: 18.09.2026).
- 7 Kookbang Ilbo. Korea Military Academy drone operation training. [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: https://kookbang.dema.mil.kr/newsWeb/20260709/6/ATCE_CTGR_0010030000/view.do. (дата обращения: 18.09.2026).
- 8 China Military Online. PLA Army launches occupational training, certification for UAV pilots. [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: https://eng.chinamil.com.cn/BILINGUAL/News_209203/16213671.html (дата обращения: 18.09.2026).
- 9 Israel Defense Forces. Conclusion of the RPA Operators' Course. [Электронный ресурс]. – 2022. – URL: <https://www.idf.il/en/articles/2022/conclusion-of-the-rpa-operators-course/>. (дата обращения: 18.09.2026).
- 10 А.М. Жумагулов. Инновации в технологии обучения военнослужащих: международный и отечественный опыт // Научно-образовательный журнал «Хабаршысы-Вестник» – 2026. – № 1 – С.89.

ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТУРЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ЛЁГКОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С УЧЁТОМ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОКАНАЛА

магистр, начальник кафедры защиты информации, полковник Гревцов А.В.
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи
город Алматы, Республика Казахстан
кандидат военных наук, доктор PhD,
ассоциированный профессор, старший
научный сотрудник Тойбазаров Д.О.,
докторант, майор Зверев Н.Н.,
Национальный университет обороны РК,
город Астана, Республика Казахстан
магистр технических наук, начальник
кафедры радиотехнических войск,
подполковник Калипанов М.М.
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи,
город Алматы, Республика Казахстан
директор департамента по НИОКР,
подполковник Кажыбаев К. С.
ТОО «R&D центр «Казахстан
инжиниринг»,
город Астана, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы построения и исследования аппаратуры передачи данных лёгкого беспилотного летательного аппарата, предназначенной для обеспечения двустороннего информационного обмена между бортовым и наземным сегментами беспилотного комплекса. Актуальность исследования определяется необходимостью обеспечения устойчивой передачи команд управления, телеметрической информации и данных полезной нагрузки при ограничениях по массе, энергопотреблению и габаритам бортового оборудования. Рассмотрены основные требования к аппаратуре передачи данных и параметры, определяющие эффективность радиоканала. Предложена структурная организация системы, включающая бортовой и наземный радиомодули, антенные устройства, цифровые интерфейсы и программные средства обработки данных. Проведён анализ влияния дальности распространения радиосигнала на уровень принимаемой мощности и качество информационного обмена. Для оценки эффективности аппаратуры предложено использовать комплекс показателей, включающий RSSI, SNR, вероятность

потери пакетов, задержку и фактическую скорость передачи данных. Сформирована методика экспериментального исследования, позволяющая оценивать рабочую дальность радиоканала с учётом заданных требований к надёжности и производительности. Полученные положения могут быть использованы при разработке и испытании аппаратуры передачи данных лёгких БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, аппаратура передачи данных, радиоканал, радиомодем, телеметрия, RSSI, SNR, потеря пакетов, задержка, информационный обмен.

Введение. Развитие беспилотных летательных аппаратов сопровождается расширением задач, решаемых с использованием бортовых информационных и телекоммуникационных систем. Современный БПЛА представляет собой сложный программно-аппаратный комплекс, эффективность функционирования которого определяется не только лётно-техническими характеристиками, но и возможностями передачи данных между бортовым оборудованием и наземной станцией управления [1, 2].

Аппаратура передачи данных (АПД) обеспечивает обмен командами управления, телеметрической информацией, навигационными параметрами и данными полезной нагрузки. При этом качество информационного обмена непосредственно зависит от характеристик радиоканала: мощности передатчика, чувствительности приёмника, параметров антенн, рабочей частоты, расстояния между узлами связи и условий распространения радиоволн [3, 4].

Особую сложность представляет создание АПД для лёгких БПЛА. Ограничения по массе и энергопотреблению требуют поиска компромисса между дальностью связи, пропускной способностью, надёжностью и потребляемой мощностью. Увеличение мощности передатчика может повысить энергетический запас радиолинии, однако одновременно увеличивает энергопотребление и тепловую нагрузку бортового оборудования.

Кроме того, номинальные характеристики радиомодуля не позволяют в полной мере оценить эффективность системы. Например, заявленная скорость передачи характеризует возможности физического радиоинтерфейса, тогда как фактическая скорость прикладного обмена зависит от служебных данных, повторных передач, качества сигнала и текущего состояния канала [5].

Целью исследования является формирование подхода к построению и оценке аппаратуры передачи данных лёгкого БПЛА с учётом характеристик радиоканала и требований к качеству информационного обмена.

Для достижения поставленной цели рассматриваются требования к АПД, её структурная организация, основные показатели качества радиоканала и методика экспериментальной оценки эффективности передачи данных.

Объектом исследования является система передачи данных лёгкого беспилотного летательного аппарата.

Предметом исследования являются технические характеристики АПД и параметры радиоканала, определяющие дальность, надёжность и производительность информационного обмена.

Основная часть. Требования и структурная организация аппаратуры передачи данных. Аппаратура передачи данных лёгкого БПЛА должна обеспечивать устойчивый двусторонний обмен информацией между бортовым и наземным сегментами при ограничениях по массе, габаритам и энергопотреблению. При формировании требований необходимо учитывать назначение БПЛА, состав полезной нагрузки и характер передаваемой информации [2, 4].

К основным характеристикам АПД относятся дальность связи, пропускная способность, задержка передачи, надёжность доставки пакетов, энергетическая эффективность и устойчивость к изменению условий радиоканала. Для лёгкого БПЛА эти параметры должны рассматриваться комплексно, поскольку улучшение одного из них может приводить к ухудшению других.

Например, увеличение мощности передатчика позволяет повысить энергетический запас радиолинии, но сопровождается ростом энергопотребления. Увеличение скорости передачи требует более высокого качества радиоканала и может приводить к сокращению дальности устойчивой связи. Поэтому выбор технических параметров АПД должен выполняться с учётом реального сценария эксплуатации [3, 5]. Основные требования, предъявляемые к аппаратуре передачи данных лёгкого БПЛА, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные требования к АПД лёгкого БПЛА

Параметр	Основное требование
Дальность связи	Обеспечение устойчивого обмена на заданном удалении
Скорость передачи	Соответствие объёму передаваемой информации
Задержка	Минимизация времени прохождения команд и телеметрии
Надёжность	Минимизация потерь и ошибок передачи
Масса и габариты	Соответствие ограничениям лёгкого БПЛА
Энергопотребление	Рациональное использование бортового источника питания
Информационная безопасность	Защита передаваемых данных и контроль их целостности

Структурно система передачи данных может быть представлена двумя основными сегментами: бортовым и наземным. Бортовой сегмент включает вычислительное устройство, радиомодуль АПД, антенно-фидерную систему и интерфейсы подключения к бортовым системам. Наземный сегмент содержит радиомодуль, антенное устройство, вычислительное оборудование и программное обеспечение оператора. Общая структура системы представлена на рисунке 1.

В бортовом сегменте данные от автопилота, навигационной системы и полезной нагрузки поступают в вычислительный модуль, после чего через цифровой интерфейс передаются в радиомодуль. В качестве интерфейса может использоваться UART, Ethernet или другой цифровой интерфейс, определяемый требованиями конкретной аппаратуры.

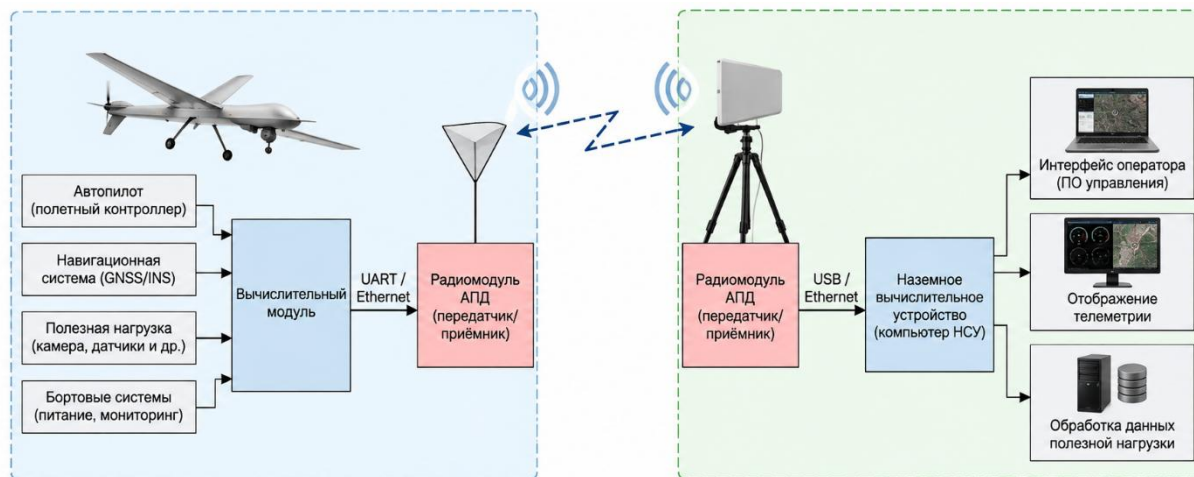


Рисунок 1 – Структура системы передачи данных лёгкого БПЛА

Для передачи телеметрии и команд управления может применяться протокол MAVLink, обеспечивающий структурированный обмен сообщениями между бортовыми системами и наземной станцией [6]. Использование протокольного уровня позволяет отделить обработку содержания сообщений от непосредственно радиотехнического уровня системы.

В системе целесообразно выделять три основных информационных потока: команды управления, телеметрические данные и информацию полезной нагрузки. Для них предъявляются различные требования. Команды управления требуют минимальной задержки и высокой надёжности доставки, телеметрия – регулярности и целостности передачи, а данные полезной нагрузки – достаточной пропускной способности [5, 7]. Характеристики указанных потоков и приоритетные требования к ним представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики основных информационных потоков

Поток	Направление	Приоритетный параметр
Команды управления	Земля → БПЛА	Задержка и надёжность
Телеметрия	БПЛА → Земля	Надёжность и регулярность
Данные полезной нагрузки	БПЛА → Земля	Пропускная способность

Таким образом, структура АПД должна обеспечивать не только физическую передачу радиосигнала, но и согласованную работу аппаратных и программных компонентов. При ухудшении состояния радиоканала приоритет должен отдаваться критически важной информации, прежде всего командам управления и телеметрическим данным.

При разработке аппаратуры также необходимо учитывать возможность регистрации параметров радиоканала. Фиксация RSSI, SNR, задержки, количества переданных и потерянных пакетов позволяет оценивать фактическое состояние системы и проводить последующий анализ результатов испытаний [3, 8].

В результате АПД рассматривается как единая программно-аппаратная система, эффективность которой определяется не отдельными характеристиками радиомодуля, а совокупностью параметров радиоканала, интерфейсов, протоколов обмена и программных средств обработки данных.

2) Модель радиоканала и показатели качества передачи данных.

Эффективность аппаратуры передачи данных определяется не только характеристиками радиомодулей, но и условиями функционирования радиоканала. При движении БПЛА изменяются расстояние до наземной станции, взаимная ориентация антенн и условия распространения радиоволн. Поэтому при проектировании АПД необходимо учитывать энергетический баланс радиолинии и показатели качества цифровой передачи [3, 4].

Одним из основных параметров мониторинга является RSSI (Received Signal Strength Indicator) - показатель уровня принятого сигнала. Его изменение позволяет оценивать изменение энергетического состояния радиолинии в процессе полёта.

Дополнительным показателем является отношение сигнал/шум. Снижение SNR увеличивает вероятность возникновения ошибок при передаче цифровой информации и, в зависимости от используемого радиоинтерфейса, может приводить к снижению фактической скорости передачи или увеличению числа повторных передач [5, 9].

Такой подход позволяет оценивать не только наличие радиосвязи, но и её пригодность для решения конкретной информационной задачи.

При этом максимальная дальность связи не должна определяться только расстоянием, на котором происходит потеря соединения.

Таким образом, предложенная модель позволяет связать физические характеристики радиоканала с качеством прикладного информационного обмена и сформировать объективные критерии оценки, разработанной АПД.

3) Методика исследования и оценка эффективности АПД

Исследование аппаратуры передачи данных целесообразно выполнять поэтапно, начиная с проверки функционирования аппаратных интерфейсов и заканчивая оценкой радиоканала при изменении расстояния и информационной нагрузки.

Экспериментальный стенд должен включать бортовой и наземный модули АПД, вычислительные устройства, антенные системы и программное средство регистрации параметров передачи. На первоначальном этапе бортовой вычислительный модуль может быть заменён тестовым компьютером, формирующим заданный поток информационных сообщений. Это позволяет проводить повторяемые испытания без непосредственного использования летательного аппарата.

Для проведения исследований формируется экспериментальный стенд, включающий бортовой и наземный модули АПД, вычислительные устройства, антенные системы и программное средство регистрации параметров передачи. Общая структура экспериментального стенда представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Структура экспериментального стенда исследования АПД

Основными этапами испытаний являются:

- проверка установления радиосоединения;
- передача тестовых пакетов;
- измерение RSSI и SNR;
- определение фактической скорости передачи;
- измерение задержки;
- определение количества потерянных пакетов;
- исследование изменения параметров при увеличении расстояния;
- оценка работы при двустороннем обмене.

При исследовании радиоканала необходимо формировать журнал испытаний, содержащий временные метки, значения RSSI и SNR, количество переданных и принятых пакетов, величину задержки и фактическую скорость передачи.

Особое внимание следует уделить зависимости параметров от расстояния. По мере удаления БПЛА от наземной станции ожидается снижение уровня принимаемого сигнала. При достижении области недостаточного энергетического запаса возрастает вероятность потери пакетов и увеличивается задержка передачи. Для иллюстрации характера изменения основных показателей радиоканала в зависимости от дальности на рисунке 3 приведены расчётные зависимости. Они не заменяют экспериментальные измерения и предназначены для демонстрации характерных тенденций изменения параметров радиоканала.

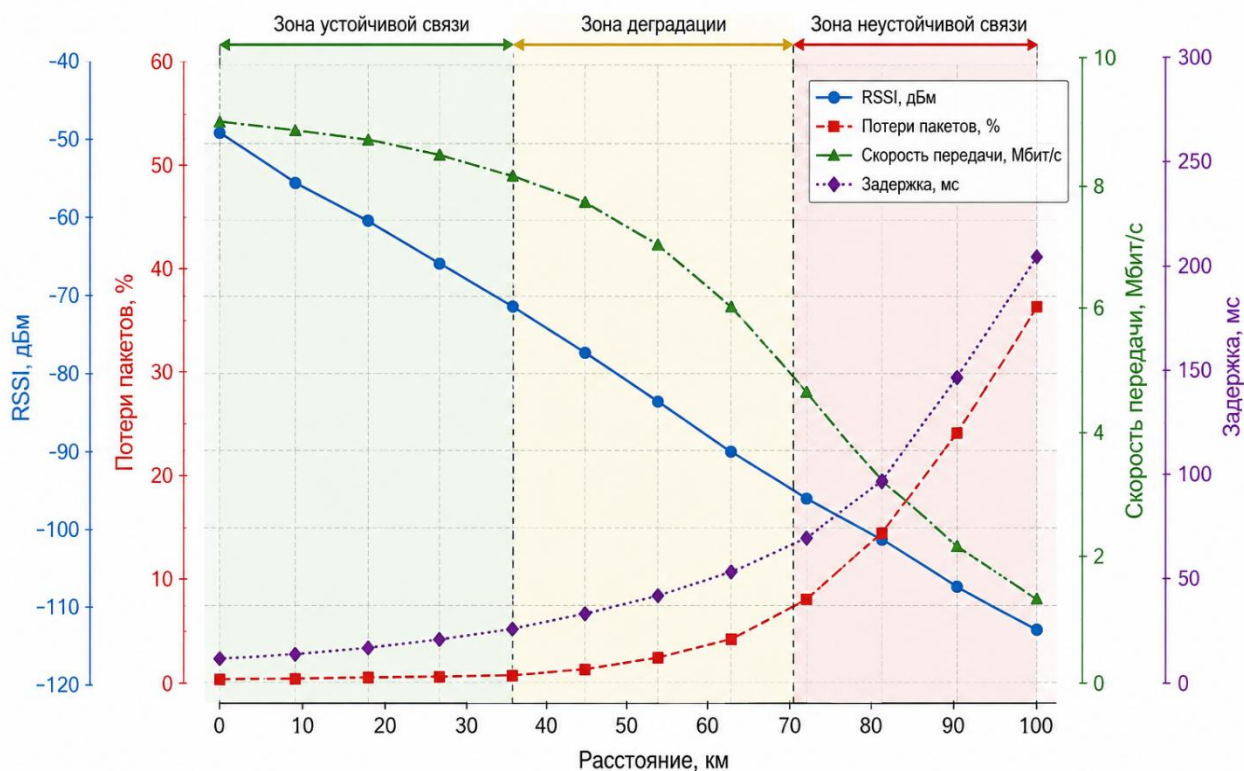


Рисунок 3 – Расчётная зависимость показателей качества радиоканала от дальности

Для оценки эффективности системы предлагается выделять три характерные области работы радиоканала.

В первой области обеспечивается устойчивый обмен данными, уровень сигнала имеет достаточный запас, а потери пакетов и задержка находятся в допустимых пределах.

Во второй области начинается деградация характеристик радиоканала. При этом соединение сохраняется, однако увеличиваются потери пакетов и задержка, а фактическая скорость передачи может снижаться.

В третьей области радиоканал становится неустойчивым. Дальнейшее увеличение расстояния приводит к существенному росту ошибок и периодическим нарушениям соединения.

Следовательно, при оценке, разработанной АПД необходимо определять не только предельную дальность, но прежде всего диапазон, в котором обеспечиваются заданные эксплуатационные характеристики.

Для аппаратуры, рассчитанной на передачу данных со скоростью порядка 6-8 Мбит/с и функционирование на дальностях до 100 км, указанные значения следует рассматривать как целевые технические характеристики, подлежащие проверке в конкретной конфигурации радиолинии. Фактические показатели должны определяться экспериментально с учётом мощности передатчика, чувствительности приёмника, антенных систем, рабочей частоты и условий распространения радиоволн.

Таким образом, предложенная методика позволяет провести комплексную оценку АПД по единой системе показателей и определить фактическую область устойчивого функционирования радиоканала.

4) Обеспечение надёжности и информационной безопасности

Надёжность передачи данных лёгкого БПЛА определяется не только энергетическими характеристиками радиоканала, но и организацией обработки информационных потоков. При ухудшении параметров связи система должна сохранять возможность передачи наиболее критически важных сообщений, прежде всего команд управления и телеметрической информации.

Одним из способов повышения устойчивости является распределение сообщений по приоритетам. Команды управления и служебная информация должны иметь более высокий приоритет, чем данные второстепенной информационной нагрузки. При ограниченной пропускной способности это позволяет сохранить функциональность системы даже при снижении качества радиоканала.

Для повышения достоверности передачи применяются механизмы контроля целостности сообщений, подтверждения доставки и повторной передачи. При этом использование повторной передачи должно учитывать требования к задержке: для некоторых видов телеметрии повторная передача устаревшего сообщения может быть менее эффективной, чем передача нового значения параметра [7, 10]. Информационная безопасность является отдельной составляющей АПД. Передаваемые данные могут подвергаться перехвату, модификации или попыткам несанкционированного доступа. Поэтому при построении защищённого канала должны применяться механизмы аутентификации, контроля целостности и криптографической защиты информации [10, 11].

При этом криптографическая обработка должна учитывать ограниченные вычислительные и энергетические ресурсы бортового оборудования. Дополнительные операции шифрования и проверки целостности увеличивают вычислительную нагрузку и могут влиять на задержку передачи. Поэтому средства защиты должны рассматриваться как составная часть общей архитектуры АПД, а не как отдельный дополнительный модуль.

Важным элементом исследования является регистрация параметров работы системы. В журнале испытаний целесообразно сохранять значения RSSI и SNR, количество переданных и потерянных пакетов, задержку, факты повторной передачи и состояние соединения. Это позволяет установить взаимосвязь между изменением физических характеристик радиоканала и качеством прикладного информационного обмена.

Для предварительной проверки программной части может применяться технология Software-in-the-Loop (SIL), позволяющая исследовать алгоритмы формирования и обработки данных без непосредственного подключения всех физических компонентов системы. На следующем этапе целесообразно использовать Hardware-in-the-Loop (HIL), при котором реальные элементы аппаратуры работают совместно с моделируемой средой [12].

Применение SIL/HIL позволяет выявлять ошибки программного обеспечения, интерфейсного взаимодействия и обработки информационных потоков до проведения натурных испытаний БПЛА. Это повышает воспроизводимость испытаний и снижает затраты на проверку программно-аппаратного комплекса.

Заключение. В статье рассмотрены вопросы построения и исследования аппаратуры передачи данных лёгкого беспилотного летательного аппарата. Показано, что эффективность АПД определяется совокупностью характеристик радиомодуля, антенной системы, цифровых интерфейсов, программных средств и условий распространения радиосигнала.

Сформулированы основные требования к системе передачи данных, включающие дальность связи, пропускную способность, минимальную задержку, надёжность, энергетическую эффективность и информационную безопасность. Рассмотрена структурная организация бортового и наземного сегментов АПД и выделены основные информационные потоки: команды управления, телеметрия и данные полезной нагрузки.

Для оценки качества радиоканала предложено использовать совокупность параметров RSSI, SNR, вероятности потери пакетов, задержки и фактической скорости передачи. Показано, что максимальная дальность связи не является достаточным критерием эффективности системы. В качестве основного эксплуатационного показателя целесообразно использовать рабочую дальность, при которой одновременно выполняются требования по надёжности, задержке и пропускной способности.

Разработана методика исследования, предусматривающая лабораторную проверку аппаратуры, измерение параметров радиоканала при изменении расстояния и информационной нагрузки, а также оценку двустороннего обмена. Применение SIL/HIL-подходов позволяет дополнительно проверить программно-аппаратное взаимодействие до проведения натурных испытаний.

Таким образом, предложенный подход обеспечивает комплексную оценку аппаратуры передачи данных лёгкого БПЛА и может использоваться при разработке, экспериментальной проверке и последующей модернизации радиоканала. Дальнейшие исследования целесообразно направить на получение экспериментальных зависимостей RSSI, SNR, скорости передачи, задержки и потерь пакетов от дальности и условий эксплуатации, а также на оценку эффективности адаптивного управления параметрами радиоканала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Floreano D., Wood R.J. Science, technology and the future of small autonomous drones // Nature. – 2015. – Vol. 521. – P. 460-466.
- 2 Hassanalian M., Abdelkefi A. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review // Progress in Aerospace Sciences. – 2017. – Vol. 91, P.99-131.

3 Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2016. – Vol. 18, No. 4. – P. 2624-2661.

4 Khawaja W., Guvenc I., Matolak D.W., Fiebig U.-C., Schneckenburger N. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21, No. 3. – P. 2361-2391.

5 Zeng Y., Zhang R., Lim T.J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges // IEEE Communications Magazine. – 2016. – Vol. 54, No. 5. – P. 36-42.

6 MAVLink Developer Guide. MAVLink - Micro Air Vehicle Communication Protocol. – URL: <https://mavlink.io/en/> (дата обращения: 22.09.2026).

7 Bekmezci I., Sahingoz O.K., Temel Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey // Ad Hoc Networks – 2013. – Vol. 11, No. 3. – P. 1254-1270.

8 Fotouhi A., Qiang H., Ding M., Hassan M., Giordano L.G., Garcia-Rodriguez A., Yuan J. Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges // IEEE Communications Surveys & Tutorials – 2019. – Vol. 21, No. 4. – P. 3417-3442.

9 Bor-Yaliniz R.I., El-Keyi A., Yanikomeroglu H. Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks // IEEE International Conference on Communications (ICC) – 2016. – P. 1-5.

10 Yaacoub J., Noura H., Salman O., Chehab A. Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations // Internet of Things – 2020. – Vol. 11. – DOI:10.1016/j.iot.2020.100218

11 Fotouhi A., Ding M., Hassan M. Flying drone base stations for macro hotspots // IEEE Access – 2018. – Vol. 6. – P. 19530–19539.

12 Ardupilot Documentation. Software in the Loop (SITL) – Copter documentation. – URL: <https://ardupilot.org/dev/docs/sitl-simulator-software-in-the-loop.html> (дата обращения: 22.09.2026).

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА ИННОВАЦИОННОГО КОМПЛЕКСНОГО ПРОДУКТА В ДРОНОВОЙ ИНДУСТРИИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

магистр педагогических наук Джакупов К.М.
Пограничная академия Комитета национальной
безопасности Республики Казахстан,
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассмотрено понятие инновационного комплексного продукта в дронной индустрии, предложена его многокомпонентная структура, включающая обучающую подсистему. Систематизированы модели оценки технологической зрелости и этапного (stage-gate) управления разработкой, применение которых проиллюстрировано на примере отечественного проекта.

Ключевые слова: инновационный комплексный продукт, дронная индустрия, искусственный интеллект, технологическая готовность, stage-gate, подготовка кадров.

Введение. Государственная политика Республики Казахстан последовательно ориентирует экономику на переход от импорта готовых изделий к созданию отечественных инновационных продуктов, обладающих технологической самостоятельностью. Применительно к дронной индустрии это означает, что конечной целью является не отдельно взятый беспилотный летательный аппарат (БПЛА), а инновационный комплексный продукт: согласованный набор аппаратной платформы, программного обеспечения и технологий искусственного интеллекта (ИИ), наземной инфраструктуры и сопровождающих услуг, включая обучение персонала, который может поставляться, эксплуатироваться и обслуживаться как единое целое. Тема настоящей конференции – создание такого продукта с использованием передовых технологий ИИ – прямо указывает на то, что от участников отрасли ожидается системный, а не узкотехнический взгляд на разработку.

Приоритетность этой задачи закреплена в Концепции развития искусственного интеллекта на 2024-2029 годы, относящей развитие инфраструктуры и человеческого капитала к числу ключевых направлений [1], и в Законе Республики Казахстан «Об искусственном интеллекте», устанавливающем требования к контролю человека над системами ИИ и классификацию таких систем по степени автономности [2].

Отечественная практика показывает, что построение полного цикла создания подобных продуктов уже начато: в конце 2025 года было объявлено о создании в Павлодаре казахстанско-корейского совместного предприятия по сборке и обслуживанию беспилотников, часть моделей которого прямо ориентирована на охрану границ и мониторинг инфраструктуры [3].

Формирование такого предприятия ставит вопрос о том, как обоснованно управлять созданием комплексного продукта, объединяющего аппаратную часть, ИИ-компоненты и обучение персонала, чтобы избежать типичной ошибки – локальной оптимизации отдельных технологий при отсутствии готовности продукта в целом.

Целью статьи является систематизация подходов к формированию облика инновационного комплексного продукта в дронной индустрии на основе технологий ИИ: определение его структуры, методов оценки технологической зрелости компонентов и этапного управления разработкой, а также роли обучающей подсистемы. Исследование выполнено на основе анализа открытых отечественных и зарубежных источников.

Основная часть. Отличие комплексного продукта от отдельного технического изделия подробно обосновано в теории продуктовых платформ: устойчивое конкурентное преимущество создает не единичное изделие, а платформа общих компонентов, технологий и процессов, на основе которой формируется целое семейство продуктов [4]. Применительно к дронной индустрии с элементами ИИ это означает, что заказчику – ведомству или гражданской организации – должен поставляться не летательный аппарат сам по себе, а согласованный комплекс, включающий не менее шести взаимосвязанных подсистем (таблица 1).

Таблица 1 – Структура инновационного комплексного продукта в дронной индустрии

Подсистема	Назначение	Типичные элементы
1. Платформа (носитель)	Полет, энергообеспечение, модульность под разные полезные нагрузки	Планер, силовая установка, источники питания
2. Полезная нагрузка и датчики	Сбор первичных данных об обстановке	Оптические и тепловизионные камеры, радиолокационные модули
3. ИИ-аналитика (бортовая и наземная)	Обнаружение, классификация и сопровождение объектов, поддержка решений оператора	Модели компьютерного зрения [5], алгоритмы поддержки принятия решений
4. Наземное управление и связь	Планирование полетов, каналы передачи данных, комплексирование с другими средствами	Наземные станции управления, сети передачи данных [6]
5. Сервисная и нормативная поддержка	Техническое обслуживание, сертификация, соответствие законодательству об ИИ	Регламенты обслуживания, разрешительная документация
6. Обучающая (кадровая) подсистема	Подготовка операторов и обслуживающего персонала	Учебные программы, тренажеры, методические материалы [7]

Отсутствие любой из перечисленных подсистем не позволяет считать изделие завершенным комплексным продуктом даже при высоком качестве отдельных его частей. Показательно, что рассмотренный ниже отечественный проект с самого начала предусматривает не только сборку аппаратов, но и поэтапную передачу программного обеспечения и отдельное соглашение о подготовке кадров с профильным колледжем [3], то есть выстраивается именно как комплексный, а не только аппаратный продукт.

Технологическая зрелость отдельных подсистем количественно оценивается по шкале уровней готовности технологии (Technology Readiness Level, далее – TRL), определяющей условия, которые должны быть выполнены на каждом из девяти уровней – от формулирования базовых принципов до подтвержденной эксплуатации в штатных условиях [8]. Вместе с тем, по обоснованному мнению разработчиков подхода к оценке системной готовности, ни одна система не может считаться готовой к развертыванию исходя только из зрелости входящих в нее технологий, взятых по отдельности: не меньшее значение имеет готовность их взаимной интеграции [9]. Это замечание прямо применимо к инновационному комплексному продукту, подсистемы которого (таблица 1) создаются разными исполнителями и должны быть состыкованы между собой.

Обозначим через TRL_i оценку технологической готовности i -й подсистемы по девятибалльной шкале [8], где $i = 1, \dots, n$, а n – число подсистем продукта. Вслед за [9] используем нормированные величины $trl_i = TRL_i / 9$, принимающие значения от 0 до 1. Поскольку задержка или неготовность любой из подсистем задерживает готовность продукта в целом, нижнюю, консервативную оценку готовности всего комплексного продукта дает наименее зрелая из его подсистем:

$$R = \min\{trl_1, trl_2, \dots, trl_n\} \quad (1)$$

Показатель (1) удобен как сигнал для управленческого решения: он явно указывает, какая именно подсистема сдерживает готовность продукта, и не позволяет высоким значениям TRL «зрелых» подсистем маскировать отставание остальных. Так, при высокой готовности планера и ИИ-аналитики, но неразработанной программе подготовки операторов, показатель (1) останется низким, что и должно служить основанием для соответствующего управленческого решения.

Для учета не только зрелости отдельных подсистем, но и согласованности их интеграции между собой, по аналогии с подходом [9], в упрощенном для целей настоящей статьи виде, введем показатель готовности интеграции $irl_i \in [0, 1]$, характеризующий состыкованность i -й подсистемы с остальными. Обобщенный индекс готовности продукта тогда определяется как их среднее произведение:

$$S = (1 / n) \cdot \sum trl_i \cdot irl_i \quad (2)$$

В отличие от показателя (1), указывающего на конкретное узкое место, показатель (2) агрегирует состояние всех подсистем и их взаимной интеграции и удобен для отслеживания общей динамики проекта во времени. На практике целесообразно применять оба показателя совместно: (2) – для мониторинга хода разработки в целом, (1) – для принятия решения о готовности продукта к очередному этапу.

Ключевая особенность предлагаемой адаптации состоит в том, что, начиная с третьей стадии, наравне с техническими критериями оценивается готовность учебных материалов: обучающая подсистема проходит тот же цикл разработки и испытаний, что и аппаратно-программная часть, а не создается по остаточному принципу после завершения основной разработки.

Этапное управление разработкой продукта целесообразно строить по модели stage-gate, разделяющей процесс на последовательные стадии, между которыми расположены контрольные точки (гейты) с явными критериями перехода и решением «продолжить / доработать / остановить проект» [10]. Адаптация этой модели к инновационному комплексному продукту в дробной индустрии с учетом введенных выше показателей и подсистемы обучения представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Этапы (stage-gate) создания инновационного комплексного продукта

Стадия	Ориентир по (1)	Ключевые результаты гейта
1. Изучение возможностей	0,1-0,2	Анализ потребности заказчика, предварительная оценка технологий по подсистемам таблицы 1
2. Обоснование концепции	0,2-0,3	Архитектура продукта по подсистемам, включая укрупненный план обучающей подсистемы
3. Разработка	0,4-0,6	Работоспособные прототипы подсистем, программа испытаний, проект учебных материалов
4. Испытания и валидация	0,6–0,8	Комплексные испытания продукта в целом, апробация учебных материалов на пилотной группе
5. Запуск и сопровождение	0,9–1,0	Серийная поставка, сертификация, развернутая программа подготовки эксплуатирующего персонала

Наряду с показателями зрелости и этапностью, к продукту предъявляются требования, вытекающие из законодательства об ИИ. Закон Республики Казахстан «Об искусственном интеллекте» разделяет системы по степени автономности – от систем, в которых окончательное решение всегда принимает человек, до систем, допускающих действия без его вмешательства, – и обязывает разработчика заранее определять, к какой категории относится создаваемый продукт [2]. Для продукта, предназначенного для обработки данных ограниченного доступа, тот же закон предусматривает применение локальных систем ИИ, не подключенных к сетям телекоммуникаций общего пользования

[2], что должно быть заложено в архитектуру наземного управления (подсистема 4 таблицы 1) на стадии обоснования концепции, а не добавлено впоследствии.

Изложенный подход можно проиллюстрировать на примере упомянутого выше павлодарского проекта. Соглашение о создании совместного предприятия было заключено между отечественной компанией и южнокорейским производителем беспилотников, чьи модели уже эксплуатируются вооруженными силами Республики Корея; при этом, по словам руководителя отечественной стороны, при выборе партнера рассматривался и вариант с производителями, не предоставляющими доступ к исходному коду, однако решающим фактором стала возможность полного контроля над программной архитектурой поставляемых изделий [3]. Как поясняет руководитель компании, «технологический суверенитет требует полного контроля над кодом и архитектурой системы» [3].

Технологический трансферт по проекту выстроен поэтапно: сначала – крупноузловая сборка корпусов и обучение специалистов, затем – производство отдельных элементов (наземных станций управления, коммуникационных модулей), далее – передача программного обеспечения и совместная разработка новых моделей под нужды отечественных заказчиков [3]. Линейка из четырех первых моделей включает аппараты для мониторинга трубопроводов, охраны границ и спасательных операций, картографии, транспортировки грузов и разведки, что делает продукт применимым как в оборонной, так и в гражданской сфере [3]. Одновременно с производственными вопросами заключено соглашение между южнокорейским университетом и отечественным колледжем информационных технологий о совместной подготовке кадров в сфере БПЛА [3].

Данный проект наглядно подтверждает предложенную структуру: помимо аппаратной сборки, соглашение с самого начала охватывает передачу программного обеспечения и подготовку кадров, то есть уже на старте задействованы не менее четырех из шести подсистем таблицы 1. Само обоснование выбора партнера показывает, что для отечественных участников отрасли управляемость ИИ-компоненты является не второстепенным, а определяющим фактором выбора модели создания продукта, а включение образовательной организации в проект с этапа его запуска – практическим подтверждением того, что обучающую подсистему целесообразно закладывать одновременно с аппаратно-программной частью, как это отражено в таблице 2.

Систематическую разработку обучающей подсистемы целесообразно вести по модели ADDIE (анализ, проектирование, разработка, применение, оценка), изначально созданной для подготовки военных специалистов и остающейся одной из наиболее употребимых моделей систематизированной разработки обучения [7]. Отдельного внимания в программе подготовки требует взаимодействие оператора с системой ИИ: установлено, что как некритичное доверие рекомендациям автоматики, так и, напротив, необоснованный отказ от ее использования проявляются у операторов различного уровня опытности и не устраняются без целенаправленного обучения [11]. Следовательно, программа

подготовки должна включать не только эксплуатационные навыки, но и практику работы с ошибочными сигналами системы ИИ.

С учетом изложенного предлагаются следующие меры по формированию инновационного комплексного продукта в дроновой индустрии:

1) формировать команду разработки как межфункциональную, включающую наряду с инженерами и специалистами по ИИ методиста по разработке обучения, начиная со стадии обоснования концепции;

2) на каждом гейте оценивать готовность продукта по показателям (1) и (2) применительно ко всем шести подсистемам таблицы 1, включая обучающую, а не только к аппаратно-программной части;

3) не допускать перехода к запуску и сопровождению (стадия 5 таблицы 2) при значении показателя (1) ниже целевого хотя бы по одной подсистеме;

4) заключать соглашения с образовательными организациями на стадии разработки, а не после начала серийных поставок, по аналогии с рассмотренным примером;

5) предусматривать поэтапную локализацию производства – от сборки к изготовлению компонентов и совместной разработке программного обеспечения;

6) заранее определять степень автономности создаваемого продукта в соответствии с Законом «Об искусственном интеллекте» и предусматривать локальный контур обработки данных там, где это требуется по характеру решаемых задач.

Заключение. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

Во-первых, инновационный комплексный продукт в дроновой индустрии целесообразно рассматривать как согласованную систему из шести подсистем – платформы, полезной нагрузки, ИИ-аналитики, наземного управления и связи, сервисно-нормативной поддержки и обучения персонала, – а не как отдельно взятый летательный аппарат.

Во-вторых, предложенные показатели (1) и (2), основанные на нормированных уровнях технологической готовности подсистем, позволяют выявлять узкие места разработки и отслеживать ее общую динамику, а их применение на гейтах адаптированной модели stage-gate (таблица 2) обеспечивает равное внимание к техническим и обучающим компонентам продукта.

В-третьих, рассмотренный пример отечественного проекта подтверждает практическую состоятельность предложенного подхода: поэтапная передача технологий, приоритет управляемости программной архитектуры и раннее привлечение образовательной организации соответствуют структуре и логике таблиц 1 и 2, полученным независимо от этого примера.

В-четвертых, требования Закона «Об искусственном интеллекте» к классификации систем по степени автономности и к локальной обработке данных ограниченного доступа должны закладываться в архитектуру продукта на стадии обоснования концепции, а не рассматриваться как дополнение на завершающих стадиях разработки.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка детальной методики определения весов при вычислении показателя (2) для продуктов дроновой индустрии и создание отдельного инструмента оценки готовности обучающей подсистемы, сопоставимого по строгости с шкалой технологической готовности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Об утверждении Концепции развития искусственного интеллекта на 2024–2029 годы: постановление Правительства Республики Казахстан от 24 июля 2024 года № 592. [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=34317430 (дата обращения: 25.09.2026).

2 Об искусственном интеллекте: Закон Республики Казахстан от 17 ноября 2025 года № 230-VIII ЗРК (с изменениями от 24.06.2026 г.). [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=33297881 (дата обращения: 25.09.2026).

3 Новая высота: Казахстан и Корея запускают совместное производство дронов. [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://forbes.kz/articles/novaya-vysota-kazahstan-i-koreya-zapuskayut-sovmestnoe-proizvodstvo-dronov-9972c7> (дата обращения: 25.09.2026).

4 Meyer M.H., Lehnerd A.P. The Power of Product Platforms: Building Value and Cost Leadership – New York: Free Press, 1997. – 267 p.

5 Wu X., Li W., Hong D. [et al.] Deep Learning for Unmanned Aerial Vehicle-Based Object Detection and Tracking: A Survey // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine – 2022. – Vol. 10, № 1. – P. 91-124.

6 Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint // IEEE Communications Surveys & Tutorials – 2016. – Vol. 18, № 4. – P. 2624-2661.

7 Branson R.K., Rayner G.T., Cox J.L. [et al.] Interservice Procedures for Instructional Systems Development (5 vols.): TRADOC Pam 350-30 / NAVEDTRA 106A. – Fort Monroe, VA: U.S. Army Training and Doctrine Command, 1975. – 5 vols.

8 ISO 16290:2013. Space systems – Definition of the Technology Readiness Levels (TRLs) and their criteria of assessment – Geneva: ISO, 2013. – 12 p.

9 Sauser B.J., Ramirez-Marquez J.E., Magnaye R.B., Tan W. System Maturity Indices for Decision Support in the Defense Acquisition Process // Proceedings of the 5th Annual Acquisition Research Symposium, Naval Postgraduate School – Monterey, 2008. – P. 127–140.

10 Cooper R.G. Stage-Gate Systems: A New Tool for Managing New Products // Business Horizons – 1990. – Vol. 33, № 3. – P. 44-54.

11 Parasuraman R., Manzey D.H. Complacency and Bias in Human Use of Automation: An Attentional Integration // Human Factors – 2010. – Vol. 52, № 3. – P. 381-410.

ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕГРАЦИЯ БОЕВОЙ ЧАСТИ ПРОТИВОТАНКОВОГО УПРАВЛЯЕМОГО РАКЕТНОГО КОМПЛЕКСА 9М14 НА БЕСПИЛОТНЫЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

доктор философии (PhD),
полковник Джусупбеков Т.Х.,
старший научный сотрудник,
подполковник Колумбетов Б.Д.,
старший научный сотрудник,
Балкишев К.Т.
Национальный университет обороны,
город Астана, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассмотрена проблема интеграции противотанковых управляемых ракет с беспилотными авиационными платформами малого класса. Проведен анализ объективных ограничений боевого применения подобных технических решений, представлены тактико-технические характеристики ракет 9М14М и 9М14П и описание разработанных устройств крепления и инициации взрывчатого вещества.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, противотанковая управляемая ракета 9М14 «Малютка», устройство инициации взрывчатого вещества.

Введение. Статья опубликована в рамках выполнения научного проекта грантового финансирования на 2024-2026 годы № АР234035/0223 «Обоснование технических параметров и разработка методики применения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов в тактических подразделениях (исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан)».

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) получили широкое распространение в различных областях, включая разведку, мониторинг, связь и доставку полезных грузов. Одним из перспективных направлений развития является их применение для доставки и использования боеприпасов, что позволяет существенно расширить функциональные возможности БПЛА и повысить эффективность их применения в сложных условиях [1].

Одновременно с развитием беспилотных технологий в ряде государств сохраняется значительный парк противотанковых управляемых ракет ранних поколений, в том числе ПТУР 9М14 «Малютка», находящихся на длительном хранении.

В условиях быстрого развития беспилотных систем представляет практический интерес возможность вторичного использования таких изделий в составе беспилотных авиационных комплексов, что может повысить их эксплуатационную ценность без необходимости разработки принципиально

новых образцов вооружения [2].

Целью исследования является обоснование возможности интеграции боевой части ракет 9М14 на БПЛА.

Для достижения указанной цели необходимо выполнение следующих задач:

- провести анализ использования ПТУР с БПЛА;
- разработать технические решения по интеграции боевой части ПТРК 9М14 на БПЛА коптерного типа;
- описать результаты экспериментальных исследований разработанных технических решений.

Предметом исследования является технология интеграция боевой части ПТРК 9М14 на БПЛА.

Основная часть. Анализ боевого применения ПТУР с БПЛА показывает, что ведущие производители рассматривают в качестве носителей ПТУР тяжелые дроны типа «Орион», «Bayraktar TB2», «MQ-9 Reaper» и т.д. или специализированные тяжелые дроны коптерного типа.

Так, в ходе вооруженных конфликтов в Сирии, Нагорном Карабахе и в Украине зафиксированы факты боевого применения ПТУР UMTAS с БПЛА Bayraktar TB2 и Anka-S, а также уничтожение бронетехники ракетами AGM-114 «Hellfire» с дронов MQ-9 Reaper [3–8].

При этом существует ряд объективных ограничений боевого применения ПТУР с БПЛА:

- высокая масса ракет и пусковых устройств;
- необходимость обеспечения устойчивости и управляемости носителя;
- сложность интеграции систем наведения и управления;
- высокие требования к электропитанию и бортовой электронике;
- экономическая эффективность по сравнению со специализированными авиационными средствами и поражения.

В рамках научного проекта специалистами Национального университета обороны разработан опытный образец устройства инициации взрывчатых веществ с помощью электродетонатора ЭДП, проведена апробация применения FPV дрона снаряженного боеприпасом ПГ-7 и устройством инициации в варианте «камикадзе», изучена конструкция ПТУР 9М14 «Малютка», фото которой представлено на рисунке 1, разработан и изготовлен опытный образец устройства крепления боевой части ПТУР 9М14 «Малютка» в качестве боеприпаса для дронов, фото которого представлено на рисунке 2, выполнены исследовательские испытания по боевому применению FPV дрона «Ара» с боевой частью 9М14П на базе учебного полигона «Матыбулак» (рисунок 3,4).



Рисунок 1 – Ракета 9М14 ПТРК «Малютка»

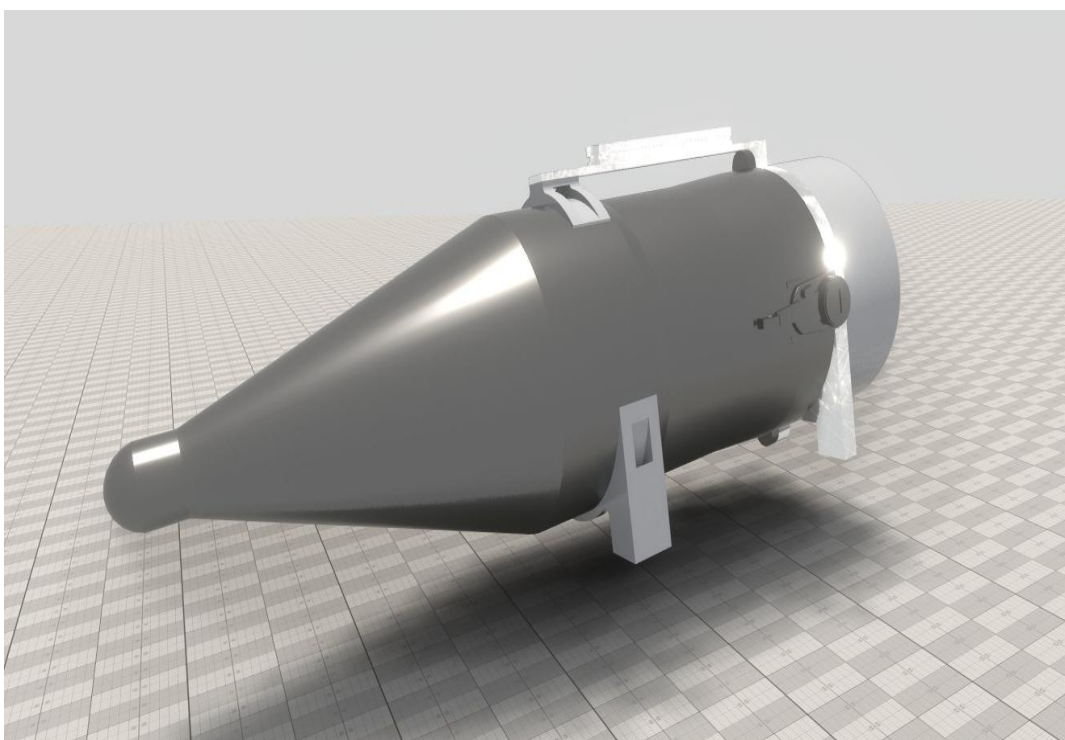


Рисунок 2 – 3D модель боевой части с переходным устройством



Рисунок 3 – модификации FPV дрона «Ара»

Результаты испытания показали, что применять боевую часть ПТУР 9М14 возможно с минимальными доработками путем извлечения штатного взрывного устройства 9Э236 и замещением его 50 граммами пластичного взрывчатого вещества. Также испытания боевого применения FPV дрона «Ара» с боевой частью 9М14П в режиме «камикадзе» по бронеобъекту на удалении 1200 метров показали высокую точность доставки боеприпаса к цели и ее гарантированное поражение (рисунок 4).



Рисунок 4 – результаты боевого применения FPV дрона «Ара» с боевой частью 9М14П в режиме «камикадзе» по бронеобъекту на удалении 1200 метров

Таким образом, результаты проведенных испытаний разработанных технических решений показали возможность их применения в тактических подразделениях Вооруженных Сил Республики Казахстан.

Кроме того, полученные результаты могут быть использованы при формировании научно-технического задела для последующей разработки интеграционных решений БПЛА с различными видами боеприпасов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Yosera, R. Design and development of a kamikaze drone with integrated autopilot and automatic target recognition system / R. Yosera, N. R. S. Muda // International Journal of IJNRSM. – 2024. – URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21942.10566> (дата обращения 15.09.2026)
- 2 Колумбетов Б.Д., Кабдолда Ж., Бойко А.В. Разработка технических требований и выбор носителя (беспилотного авиационного комплекса) для применения противотанковой управляемой ракеты 9М14 «Малютка» // Вестник Национального университета обороны –2026. – №1(108). – С.166-170.
- 3 India tests ULPGM-V3 fire-and-forget missile that can be launched from drones, check its features // The Economic Times. – 2024. – URL: <https://m.economictimes.com/news/defence/india-tests-ulpgm-v3-fire-and-forget-missile-that-can-be-launched-from-drones-check-its-> (дата обращения: 15.09.2026).
- 4 GA-ASI and USAF Demonstrate APKWS on MQ-9A Reaper // General Atomics Aeronautical Systems, Inc. – 2026. – 11 May. – URL: <https://www.ga-asi.com/ga-asi-and-usaf-demonstrate-apkws-on-mq-9a-reaper> (дата обращения 26.09.2026).
- 5 Мощные ракеты Х-БПЛА ударного "Орион-Э" превращают в металлолом танки ВСУ // Вестник Мордовии : информационное агентство. – 2024. – URL: <https://vestnik-rm.ru/news/oborona-i-bezopasnost/mocshnye-rakety-h-bpla-udarnogo-orion-e-prevracshayut-v-metallolom-tanki-vsu> (дата обращения 15.09.2026).
- 6 Industry partners test drone-mounted rocket launcher at Fort Rucker // The United States Army : official website. – 2026. – 26 May. – URL: https://www.army.mil/article/292791/industry_partners_test_drone_mounted_rocket_launcher_at_fort_rucker (дата обращения 15.09.2026).
- 7 Мандровская, А. Ставят ПТРК на квадрокоптеры: россияне хвалятся тяжелыми дронами "Перун-Ф" (фото, видео) / А. Мандровская // Фокус : онлайн-медиа. –2024. –25 янв. – URL: <https://focus.ua/digital/622628-stavyat-ptrk-na-kvadrokopty-rossiyane-hvalyatsya-tyazhelymi-dronami-perun-f-foto-video> (дата обращения: 15.09.2026).
- 8 Очень странные беспилотники. В Беларуси, кажется, приняли на вооружение два новых дрона – рассказываем о них [Электронный ресурс] – URL: <https://news.zerkalo.io/cellar/24427.html> (дата обращения 15.09.2026).

ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ТРАНСФОРМИРУЕМОЙ КОНСТРУКЦИИ

доктор философии (PhD), полковник
Джусупбеков Т.Х.,
полковник запаса Куандыков А.А.,
майор Каширбеков А.О.
Национальный университет обороны,
город Астана, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассмотрена проблема повышения функциональных возможностей беспилотных летательных аппаратов малого класса при одновременном обеспечении их индивидуальной переносимости. Показано противоречие между расширением перечня решаемых задач и необходимостью ограничения массы и транспортных габаритов беспилотного авиационного комплекса. Предложена концепция многофункционального беспилотного летательного аппарата трансформируемой конструкции с модульным принципом формирования целевой нагрузки. Сформулированы основные требования к предлагаемой концепции и определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, трансформируемая конструкция, модульная архитектура, целевая нагрузка, мобильность.

Современный этап развития беспилотных авиационных систем характеризуется расширением перечня задач, выполняемых беспилотными летательными аппаратами, и повышением требований к их мобильности, автономности и функциональной адаптивности. БПЛА малого класса применяются для воздушного наблюдения, мониторинга местности и объектов, получения фото- и видеоинформации, обеспечения информационного обмена и доставки малогабаритных грузов.

Одним из перспективных направлений развития беспилотных систем является использование модульного принципа построения. Исследования NASA рассматривают модульные беспилотные авиационные системы, как реконфигурируемые платформы, позволяющие адаптировать аппарат к различным вариантам целевого оборудования и повторно использовать основные элементы конструкции [1].

Одновременно развивается направление складных и трансформируемых БПЛА. Экспериментальные исследования показывают принципиальную реализуемость конструкции аппарата, отдельные элементы которого переводятся из компактного состояния в рабочее перед выполнением полета [2].

Особое значение подобные решения приобретают для малогабаритных БПЛА, предназначенных для эксплуатации одним оператором. В данном случае к традиционным летно-техническим требованиям добавляются ограничения по массе переносимого комплекта, транспортному объему, времени развертывания и количеству операций, необходимых для подготовки аппарата к применению.

Практический интерес представляет также использование БПЛА для доставки медицинских средств. Экспериментальные исследования и систематические обзоры показывают возможность применения беспилотных аппаратов для транспортирования медицинских изделий и других средств медицинского обеспечения [3].

Вместе с тем расширение функциональных возможностей одной беспилотной платформы сопровождается необходимостью размещения дополнительного оборудования, что может приводить к увеличению массы, габаритов и энергопотребления аппарата.

В связи с этим возникает необходимость поиска такого принципа построения малогабаритного БПЛА, при котором расширение его функциональных возможностей не требует создания отдельной воздушной платформы для каждой решаемой задачи.

Одним из возможных направлений решения данной проблемы является сочетание трансформируемой конструкции воздушной платформы и модульного принципа построения ее целевого оборудования.

Целью исследования является обоснование концепции индивидуально переносимого многофункционального беспилотного летательного аппарата трансформируемой конструкции, функциональное назначение которого изменяется посредством применения сменного целевого оборудования.

Анализ развития БПЛА позволяет выделить основное противоречие, определяющее рассматриваемую научно-практическую проблему.

С одной стороны, расширение функциональных возможностей БПЛА требует увеличения состава целевого оборудования, необходимого для решения различных задач. С другой стороны, обеспечение индивидуальной переносимости требует ограничения массы, транспортного объема и сложности комплекса.

Одним из возможных направлений разрешения данного противоречия является совместное использование двух принципов:

- 1) конструктивной трансформации базовой платформы;
- 2) модульного формирования целевого оборудования.

В основу предлагаемой концепции положен принцип: «один оператор – одна базовая трансформируемая платформа – несколько функциональных конфигураций».

При таком подходе базовая платформа обеспечивает выполнение полета, управление, навигацию и энергоснабжение, а конкретное функциональное назначение определяется составом целевой нагрузки.

Под трансформируемой конструкцией предлагается понимать такое конструктивное исполнение БПЛА, которое позволяет изменять его

пространственную конфигурацию при переводе из транспортного положения в рабочее и обратно.

При этом необходимо разграничивать понятия **трансформируемости** и **модульности**.

Трансформируемость предназначена преимущественно для обеспечения компактности при транспортировании и последующего формирования требуемой рабочей конфигурации аппарата.

Модульность предназначена для изменения функционального назначения аппарата посредством замены целевого оборудования при сохранении единой базовой воздушной платформы.

Таким образом, предлагаемая концепция предполагает разделение комплекса на две взаимосвязанные составляющие: базовую платформу и сменное функциональное оборудование, представленные на рисунке 1.



Рисунок 1 – Концептуальная схема многофункционального БПЛА трансформируемой конструкции

Базовая платформа объединяет элементы, необходимые независимо от выполняемой задачи: несущую конструкцию, энергетическую подсистему, средства управления, навигации и информационного обмена.

Сменное оборудование определяет конкретное функциональное назначение аппарата.

Такая структура позволяет рассматривать беспилотный аппарат не как отдельное специализированное техническое средство, а как унифицированную воздушную платформу с изменяемым функциональным назначением.

Важным положением предлагаемой концепции является отказ от постоянного размещения на аппарате всего возможного целевого оборудования. Требуемая конфигурация должна формироваться исходя из характера предстоящей задачи.

Для рассматриваемой платформы могут быть выделены четыре базовые функциональные конфигурации.

1. Конфигурация наблюдения – предназначена для визуального наблюдения, мониторинга местности и объектов, получения фото- и видеоинформации.

2. Конфигурация ретрансляции сигналов - предназначена для расширения зоны информационного обмена и обеспечения устойчивой связи между удаленными абонентами.

3. Конфигурация транспортировки предназначена для перевозки медикаментов, средств первой необходимости и иных малогабаритных грузов. Перспективность применения беспилотных аппаратов в медицинской логистике подтверждается экспериментальными исследованиями, хотя в научной литературе отмечается необходимость дальнейшей оценки удобства, безопасности и взаимодействия пользователя с системой [4].

4. Конфигурация измерений предполагает размещение средств экологического, метеорологического либо иного специализированного мониторинга.

Количество возможных конфигураций может быть расширено при сохранении базовой платформы. Принципиальным условием такого расширения является унификация механических, энергетических и информационных интерфейсов функциональных модулей.

На основе предложенной концепции требования к перспективному БПЛА целесообразно объединить в несколько взаимосвязанных групп:

1. Массогабаритные требования, определяющие возможность транспортирования комплекса одним оператором.

2. Эксплуатационные требования, характеризующие удобство транспортирования, разворачивания, подготовки к применению и обратного перевода аппарата в транспортное положение.

3. Требования к модульности, предполагающие унификацию интерфейсов сменного оборудования.

4. Требования к надежности трансформируемой конструкции. Многократные циклы изменения конфигурации не должны приводить к недопустимому ухудшению эксплуатационных свойств аппарата.

5. Эргономические требования, обусловленные эксплуатацией системы одним человеком.

Следовательно, рациональность рассматриваемой платформы должна оцениваться не только традиционными летными показателями, но также показателями мобильности, унификации и эксплуатационной приспособленности.

Для предварительной оценки концепции целесообразно сопоставить применение нескольких специализированных БПЛА с использованием одной трансформируемой модульной платформы.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика подходов к построению комплекса

№ п/п	Показатель	Специализированные БПЛА	Единая трансформируемая платформа
1	Количество базовых типов	Несколько	Один
2	Номенклатура основных элементов	Обширная	Унифицированная
3	Изменение функционального назначения	Ограничено назначением аппарата	Замена целевого модуля
4	Транспортируемое имущество	Зависит от числа типов БПЛА	Потенциально сокращается за счет общей платформы
5	Подготовка оператора	Освоение нескольких платформ	Освоение одной платформы
6	Техническое обслуживание	Различается по типам	Более высокая степень унификации
7	Расширение функций	Новый аппарат или существенная модернизация	Возможность разработки дополнительного модуля

Для количественного исследования этого эффекта может быть введен коэффициент функциональной универсальности:

$$K_{\phi} = \frac{N_{\phi}}{N_{\delta}} \quad (1)$$

где N_{ϕ} – количество функциональных конфигураций;

N_{δ} – количество типов базовых воздушных платформ

При реализации рассматриваемой концепции предполагается обеспечить условие $N_{\delta} = 1$ при возможности последовательного увеличения N_{ϕ} .

При этом эффективность концепции может быть представлена функциональной зависимостью:

$$E = f(M, V, T_p, N_{\phi}, K_y) \quad (2)$$

где M – масса переносимого комплекта;

V – транспортный объем;

T_p – время развертывания;

K_y – степень унификации.

Таким образом, трансформируемость и модульность целесообразно рассматривать не изолированно, а как взаимодополняющие свойства перспективной беспилотной платформы. В отличие от традиционного подхода, при котором каждой задаче соответствует специализированный аппарат, предлагаемая концепция предполагает сохранение общей воздушной платформы и изменение только того оборудования, которое непосредственно связано с выполняемой функцией. Наибольший практический эффект такой подход

способен обеспечить в условиях, когда оператору требуется последовательно решать несколько различных задач, а количество переносимого оборудования ограничено. Одновременно трансформируемая конструкция создает дополнительные требования к надежности соединений, жесткости развернутой конструкции, распределению массы, удобству обслуживания и ресурсу механизмов трансформации. Поэтому сама возможность уменьшения транспортных габаритов еще не свидетельствует о преимуществе предлагаемого решения. Целесообразность его практической реализации должна подтверждаться комплексной оценкой, учитывающей как преимущества универсальности, так и возможное усложнение конструкции.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на формирование системы количественных требований, создание экспериментального макета и проверка основных положений предлагаемой концепции.

Полученные результаты могут быть использованы при формировании научно-технического задания для последующей разработки индивидуально переносимых multifunctional беспилотных авиационных систем модульного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dahlgren R. P., Alonso J. J., Fladeland M. M. Progress on Modular Unmanned Aircraft Technology // ASPRS 3rd UAS Symposium. Palm Springs, 2016. NASA Technical Reports Server. Document ID 20200001164.
2. Wu G., Pei X., Wang D., Nan L., Wang D., Zhou H., Bai Y. Peregrine Falcon: Design and Experimentation of a Folding and Launchable Quadcopter Drone // Drones. – 2024. – Vol. 8, No. 10. Art. 565. – DOI: 10.3390/drones8100565.
3. Stephan F., Reinsperger N., Grünthal M., Paulicke D., Jahn P. Human drone interaction in delivery of medical supplies: A scoping review of experimental studies // PLOS ONE. – 2022. – Vol. 17. – No. 4. e0267664. – DOI: 10.1371/journal.pone.0267664.
4. Ling G., Draghic N. Drone for medical products transportation in maternal healthcare: A systematic review and framework for future research // Medicine. – 2020. – Vol. 99, No. 36. e21967. – DOI: 10.1097/MD.00000000000021967.

ОТ ДРОНА К АВТОНОМНОМУ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ АГЕНТУ: РОЛЬ ГЕНЕРАТИВНОГО ИИ И БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ В РАЗВИТИИ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ

доцент, подполковник Естемесов А.Б.
Академия Комитета национальной
безопасности Республики Казахстан,
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Статья посвящена анализу перспектив интеграции генеративного искусственного интеллекта и больших языковых моделей (LLM) в современные беспилотные летательные аппараты. Рассматривается переход от традиционной модели управления дроном к концепции автономного интеллектуального агента, способного воспринимать окружающую среду, интерпретировать задачи, осуществлять рассуждение, планировать последовательность действий и взаимодействовать с человеком на естественном языке. На основе анализа современной научной литературы рассматриваются возможности использования больших языковых и мультимодальных моделей в навигации, планировании, восприятии окружающей среды и человеко-машинном взаимодействии. Показано, что перспективным направлением развития дронной индустрии является интеграция LLM и multimodal foundation models с традиционными системами управления, компьютерным зрением и бортовыми вычислительными средствами. Одновременно выделяются ограничения, связанные с надёжностью решений, задержками, вычислительными ресурсами, галлюцинациями моделей и необходимостью обеспечения безопасности автономных систем.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, искусственный интеллект, генеративный искусственный интеллект, большие языковые модели, LLM, мультимодальные модели, автономные агенты, интеллектуальные системы, дронная индустрия.

Введение. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) за относительно короткий период превратились из дистанционно управляемых технических устройств в сложные киберфизические системы, способные самостоятельно выполнять отдельные навигационные и операционные задачи. Развитие компьютерного зрения, машинного обучения и автономной навигации позволило существенно расширить возможности беспилотных систем. Однако большинство современных решений по-прежнему строится вокруг заранее заданных алгоритмов, специализированных моделей и ограниченного набора сценариев.

Появление генеративного искусственного интеллекта и больших языковых моделей открывает возможность следующего этапа развития. В отличие от

традиционных алгоритмов, LLM способны работать с естественным языком, обобщать информацию, формировать планы действий и взаимодействовать с различными цифровыми инструментами. Исследования последних лет показывают растущий интерес к интеграции LLM с робототехническими системами и беспилотными аппаратами [1–3].

В опубликованном в 2025 году обзоре UAV Leveraging GenAI/LLMs, a Brief Survey систематизированы исследования 2021-2024 годов, посвящённые применению генеративного ИИ и LLM в UAV. Авторы отмечают перспективность таких технологий для повышения адаптивности, взаимодействия с человеком и интеллектуальности беспилотных систем [1].

Таким образом, актуальным становится вопрос не только о создании более автономного дрона, но и о переходе от понятия «автономный аппарат» к понятию «автономный интеллектуальный агент».

Основная часть. 1) От автономного дрона к интеллектуальному агенту. Традиционная автономность БПЛА предполагает выполнение заранее определённого набора функций: стабилизация полёта, следование маршруту, обнаружение объектов, избегание препятствий и возвращение в заданную точку. Такие функции могут выполняться без постоянного вмешательства оператора, однако система действует преимущественно в рамках заранее определённых алгоритмов. Концепция интеллектуального агента предполагает более высокий уровень автономности. В этом случае система должна не только выполнять отдельные команды, но и интерпретировать поставленную цель, оценивать состояние окружающей среды, выбирать последовательность действий и адаптироваться к изменению ситуации.

Именно такую перспективу рассматривают Tian и соавторы в работе UAVs meet LLMs: Overviews and perspectives towards agentic low-altitude mobility. Авторы предлагают концепцию agentic UAVs, в которой беспилотная система получает возможности автономного восприятия, рассуждения, памяти и использования внешних инструментов [2].

В упрощённом виде переход можно представить следующим образом (рисунок 1):

дистанционно управляемый дрон → автономный дрон →
интеллектуальный дрон → автономный AI-агент

Рисунок 1– Концепцию agentic UAVs переход в упрощённом виде

Последний этап предполагает объединение нескольких технологических компонентов: компьютерного зрения, мультимодальных моделей, больших языковых моделей, планировщиков, систем управления и инструментов взаимодействия с внешней цифровой средой.

2) Роль больших языковых моделей. Первоначально LLM создавались преимущественно для обработки естественного языка. Однако развитие multimodal foundation models существенно расширило область их применения.

Современные модели способны работать не только с текстом, но и с изображениями, аудиоданными и другими типами информации.

Для беспилотных систем это имеет принципиальное значение. Дрон получает информацию об окружающей среде преимущественно посредством сенсоров и камер, тогда как LLM может выступать в качестве высокоуровневого модуля интерпретации и планирования.

Например, оператор может сформулировать задачу естественным языком:

«Осмотри территорию, найди повреждённые участки объекта и сообщи об их расположении».

В традиционной системе подобная задача должна быть заранее преобразована в набор формализованных команд. В агентной архитектуре языковая модель потенциально может интерпретировать намерение оператора, сформировать план, обратиться к системе компьютерного зрения, определить необходимые действия и передать их соответствующим модулям управления.

Исследования в области робототехники демонстрируют аналогичную тенденцию. Обзоры Wang et al. и Xu et al. показывают, что foundation models и LLM рассматриваются как перспективный механизм объединения восприятия, планирования, рассуждения и взаимодействия человека с физическим агентом [3, 4]. При этом важно подчеркнуть: LLM не обязательно должна непосредственно управлять двигателями или другими низкоуровневыми системами БПЛА. Более реалистичной представляется иерархическая архитектура, в которой языковая модель отвечает за интерпретацию целей и высокоуровневое планирование, а специализированные алгоритмы обеспечивают безопасное выполнение конкретных действий.

3) Мультимодальный искусственный интеллект как следующий этап.

Одной из основных особенностей беспилотной системы является необходимость одновременно обрабатывать различные типы информации. Камера предоставляет визуальные данные, навигационная система — координаты, инерциальные датчики — параметры движения, а оператор может передавать текстовые или голосовые инструкции.

Поэтому перспективным направлением становится использование мультимодальных моделей, способных объединять различные информационные потоки. Такой подход соответствует общей тенденции развития embodied AI - искусственного интеллекта, функционирующего в физической среде. Исследования в области foundation models для робототехники показывают, что дальнейшее развитие автономных систем связано с объединением восприятия, рассуждения, планирования и действия в единой архитектуре [3, 4].

Для дроновой индустрии это может означать появление систем, в которых визуальное восприятие, языковая интерпретация и планирование миссии становятся элементами единого интеллектуального контура.

4) Генеративный ИИ и человеко-машинное взаимодействие.

Отдельное значение генеративный ИИ приобретает в организации взаимодействия оператора с беспилотной системой.

Вместо большого количества специализированных команд человек получает возможность формулировать задачи в естественной форме. При этом система, в свою очередь, может предоставлять оператору не только технические показатели, но и текстовое объяснение текущего состояния и предполагаемых действий.

Таким образом, взаимодействие может приобрести двусторонний характер (рисунок 2):

человек → естественно-языковая задача → ИИ → планирование →
выполнение → анализ результата → объяснение → человек

Рисунок 2 – Цикл взаимодействия человека и искусственного интеллекта

Подобный подход соответствует развитию language-based robotics, где языковые модели рассматриваются как интерфейс между человеком, роботом и окружающей средой [5].

Для дронной индустрии – это особенно важно при реализации сложных комплексных продуктов, предполагающих участие человека не в непосредственном управлении каждым элементом системы, а в постановке целей, контроле и корректировке деятельности автономного агента.

5) Ограничения и проблемы

Несмотря на значительный потенциал, интеграция генеративного ИИ в физические автономные системы имеет существенные ограничения.

Во-первых, языковые модели могут генерировать некорректные или фактически необоснованные ответы. Для цифрового помощника подобная ошибка может быть относительно безопасной, однако в физической системе ошибочное решение способно привести к повреждению оборудования или созданию опасной ситуации.

Во-вторых, LLM требуют значительных вычислительных ресурсов. Для беспилотных систем эта проблема дополнительно усложняется ограничениями по массе, энергопотреблению и производительности бортовых вычислительных платформ.

В-третьих, возникает проблема времени реакции. Многие задачи управления БПЛА требуют обработки данных в режиме реального времени, поэтому задержка, допустимая для языкового интерфейса, может быть неприемлемой для низкоуровневого управления.

Наконец, остаётся проблема объяснимости и контроля автономных решений. Современные исследования генеративного ИИ в робототехнике подчёркивают, что успешная демонстрация возможностей моделей ещё не означает их готовности к непосредственному применению в сложных физических средах [6-8].

Поэтому наиболее рациональной представляется гибридная архитектура, в которой генеративный ИИ выполняет функции высокоуровневого анализа, интерпретации и планирования, тогда как критически важные операции

остаются под контролем специализированных алгоритмов и механизмов безопасности.

Заключение. Развитие генеративного искусственного интеллекта и больших языковых моделей создаёт предпосылки для качественного изменения архитектуры беспилотных систем. Если традиционный БПЛА представляет собой преимущественно автономное техническое устройство, выполняющее заранее определённые функции, то перспективная модель предполагает формирование интеллектуального агента, способного воспринимать окружающую среду, интерпретировать задачи, осуществлять рассуждение, планировать действия и взаимодействовать с человеком.

Наиболее перспективным представляется не полное замещение традиционных алгоритмов управления языковыми моделями, а их интеграция в многоуровневую архитектуру. В такой системе LLM и мультимодальные foundation models могут обеспечивать интеллектуальный уровень — понимание задач, анализ контекста, планирование и взаимодействие с оператором, — тогда как специализированные алгоритмы обеспечивают навигацию, управление и безопасность.

Таким образом, дальнейшая трансформация дроновой индустрии может быть связана не столько с созданием «более автономного дрона», сколько с созданием комплексного интеллектуального продукта, объединяющего физическую платформу, сенсорные системы, компьютерное зрение, генеративный ИИ, автономное планирование и человеко-машинное взаимодействие. Именно переход от автономного устройства к автономному интеллектуальному агенту может стать одним из ключевых направлений развития беспилотных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Cidjeu D. D., Fendji L. K., Kamla V. C., Tchappi I. UAV Leveraging GenAI/LLMs, a Brief Survey // *Procedia Computer Science* – 2025. – Vol. 265. – P. 382–389. – DOI: 10.1016/j.procs.2025.07.195.

2 Tian Y., Lin F., Li Y. et al. UAVs meet LLMs: Overviews and perspectives towards agentic low-altitude mobility // *Information Fusion* – 2025. – Vol. 122. Article 103158. – DOI: 10.1016/j.inffus.2025.103158.

3 Wang J., Wu Z., Li Y. et al. Large Language Models for Robotics: Opportunities, Challenges, and Perspectives // *Journal of Automation and Intelligence* – 2024. – Art. 100061. – DOI: 10.48550/arXiv.2401.04334.

4 Xu Z., Wu K., Wen J. et al. A Survey on Robotics with Foundation Models: Toward Embodied AI // *arXiv preprint* – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2402.02385.

5 Hunt W., Ramchurn S. D., Soorati M. D. A Survey of Language-Based Communication in Robotics // *arXiv preprint* – 2024. – DOI: 10.48550/arXiv.2406.04086.

6 Will generative AI transform robotics? // *Nature Machine Intelligence*. – 2024. – Vol. 6. – P. 579. – DOI: 10.1038/s42256-024-00862-2.

7 Schmidgall S., Kim J. W., Kuntz A. et al. General-purpose foundation models for increased autonomy in robot-assisted surgery // Nature Machine Intelligence – 2024. – Vol. 6. – P. 1275-1283. – DOI: 10.1038/s42256-024-00917-4.

8 Ji Y., Zhang Z., Tang D. et al. Foundation models assist in human–robot collaboration assembly // Scientific Reports. – 2024. – Vol. 14. Article 24828. – DOI: 10.1038/s41598-024-75715-4.

ВЛИЯНИЕ ОШИБОК КЛАССИФИКАЦИИ LOS/NLOS НА ТОЧНОСТЬ INS/UWB-НАВИГАЦИИ МАЛОРАЗМЕРНОГО БПЛА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТРАЕКТОРИЯХ ДВИЖЕНИЯ И КОНФИГУРАЦИЯХ РАДИОМАЯКОВ

заместитель начальника штаба,
подполковник Есетов А.Д.
доктор философии (PhD),
подполковник Құлжанбаев С.Т.
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи,
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Исследовано влияние ошибок классификации LOS/NLOS на точность INS/UWB-навигации малоразмерного БПЛА в условиях отсутствия спутниковых навигационных сигналов. На основе имитационного моделирования и 100 прогонов Монте-Карло установлено, что влияние ошибочного допуска NLOS-измерений и исключения LOS-измерений на среднеквадратическую ошибку позиционирования зависит от траектории движения и конфигурации радиомаяков.

Ключевые слова: БПЛА, INS/UWB-навигация, LOS/NLOS, XGBoost, расширенный фильтр Калмана, Монте-Карло, ошибки классификации.

Введение. Обеспечение автономной навигации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при отсутствии сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) является актуальной задачей, особенно при полётах внутри помещений. Одним из подходов является совместное использование инерциальных измерений и сверхширокополосной (Ultra-Wideband, UWB) дальнометрии [1, 2]. Инерциальные измерения обеспечивают непрерывное прогнозирование движения, но характеризуются накоплением ошибки, тогда как UWB позволяет корректировать оценку положения по расстояниям до радиомаяков с известными координатами. Совместное использование этих источников данных применяется в интегрированных навигационных системах [2, 3].

Существенным фактором снижения точности UWB-позиционирования является распространение сигнала в условиях отсутствия прямой видимости (Non-Line-of-Sight, NLOS). Отражение, дифракция и прохождение сигнала через препятствия могут приводить к положительному смещению измеренной дальности [4, 5]. Для выявления NLOS-измерений применяются различные методы, включая методы машинного обучения [5, 6].

В данной работе для классификации UWB-измерений используется XGBoost [7]. При этом традиционные метрики Precision, Recall и F1-score не

позволяют непосредственно оценить влияние ошибок классификации на конечную точность навигационной системы. Рассматриваются два типа ошибок: False LOS, когда NLOS-измерение ошибочно допускается к коррекции EKF, и False NLOS, когда корректное LOS-измерение исключается из коррекции.

Цель исследования – количественно оценить влияние ошибок False LOS и False NLOS на точность INS/UWB-навигации малоразмерного БПЛА при различных траекториях движения и конфигурациях UWB-радиомаяков. Исследование выполнено методом имитационного моделирования с использованием классификатора XGBoost, расширенного фильтра Калмана и контрольных режимов обработки UWB-измерений.

Основная часть. Модель INS/UWB-навигации. Модель движения БПЛА. В работе используется упрощенная шестимерная модель состояния, содержащая три координаты положения и три компоненты скорости БПЛА.

Вектор состояния определяется следующим образом:

$$x_k = [x_k, y_k, z_k, v_{x,k}, v_{y,k}, v_{z,k}] \quad (1)$$

где x_k, y_k, z_k – координаты БПЛА;

$v_{x,k}, v_{y,k}, v_{z,k}$ – компоненты скорости.

Прогнозирование положения и скорости по инерциальным измерениям выполняется согласно выражениям:

$$p_{k+1}^- = p_k^+ + v_k^+ \cdot \Delta t + 0,5 \cdot a_k \cdot \Delta t^2 \quad (2)$$

$$v_{k+1}^- = v_k^+ + a_k \cdot \Delta t \quad (3)$$

где p_k – положение БПЛА;

v_k – скорость;

a_k – ускорение;

$\Delta t = 0,01$ с – период дискретизации.

Верхние индексы «-» и «+» обозначают прогнозируемую и скорректированную оценки соответственно.

Ориентация БПЛА не включена в оцениваемый вектор состояния. В рамках принятого упрощения предполагается, что ориентация стабилизируется системой управления полетом. Поэтому используемая модель не описывает в полном объеме ошибки ориентации и их влияние на преобразование измерений акселерометра.

Модель UWB-дальнометрии

Для i -го UWB-радиомаяка с известными координатами x_i, y_i, z_i истинная дальность между маяком и БПЛА определяется выражением:

$$d_{i,k} = \sqrt{[(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2 + (z_k - z_i)^2]} \quad (4)$$

Измеренная дальность моделируется следующим образом:

$$z_{i,k} = d_{i,k} + \varepsilon_{i,k} + b_{i,k} \quad (5)$$

где $z_{i,k}$ – измеренная дальность;

$d_{i,k}$ – истинная дальность;

$\varepsilon_{i,k}$ – случайная составляющая ошибки измерения;

$b_{i,k}$ – дополнительное смещение дальности, возникающее в условиях NLOS.

В имитационной модели использованы следующие параметры:

– для LOS-измерений дополнительное смещение отсутствует $b_{i,k} = 0$;

– стандартное отклонение случайной ошибки LOS $\sigma_{LOS} = 0,15$ м;

– для NLOS-измерений моделируется дополнительное положительное смещение с экспоненциальным распределением и средним значением $\mu_{NLOS} = 1,5$ м;

– вероятность возникновения NLOS в имитационной модели $p_{NLOS} = 0,30$;

– максимальная дальность UWB-измерений ограничена значением 60 м, с периодом 0,1 с, что соответствует частоте 10 Гц.

Указанные значения являются параметрами имитационной модели и не представляют собой результаты натурных измерений конкретного UWB-оборудования.

Классификация и объединение измерений.

Для определения условий распространения UWB-сигнала используется предварительно обученный классификатор XGBoost [7].

На вход классификатора поступают четыре признака: RSS – характеризует уровень принятого сигнала, FPPR – отношение, связанное с мощностью первого принятого пути, ToF Variance – вариацию оценки времени распространения сигнала, CIR Max – максимальное значение характеристики импульсного отклика канала.

Классификатор формирует бинарное решение LOS/NLOS. Если измерение классифицировано как LOS, оно допускается к процедуре коррекции EKF. Если измерение классифицировано как NLOS, оно исключается из коррекции.

В настоящей работе предметом исследования является влияние ошибочных решений существующего классификатора XGBoost на конечную точность навигационной системы.

Для объединения инерциальных и UWB-измерений используется EKF с шестимерным вектором состояния. Прогнозирование состояния выполняется по инерциальным измерениям с частотой 100 Гц, а коррекция по UWB-дальномерии – с частотой 10 Гц. При этом, коррекция EKF выполняется при наличии не менее трех доступных дальномерных измерений.

Ковариация ошибки UWB-измерений масштабируется с учетом геометрического фактора GDOP [8]:

$$R_k = \alpha \cdot GDOP_k^2 \cdot R_0 \quad (6)$$

где R_k – ковариация ошибки UWB-измерений на текущем шаге;

R_0 – базовая ковариация;

$GDOP_k$ – геометрический фактор;
 α – коэффициент масштабирования.

Для конфигураций «Треугольник» и «Квадрат» используется $\alpha = 0,5$, а для «Линия со смещением» $\alpha = 0,15$.

Максимально допустимое значение геометрического фактора составляет $GDOP_{max} = 3,0$.

Значение $\alpha = 0,15$ для конфигурации «Линия со смещением» было подобрано вручную в исходной имитационной модели. Поэтому различия абсолютных значений RMSE между этой и другими конфигурациями нельзя интерпретировать как результат исключительно геометрии расположения радиомаяков.

Методика исследования. Сценарии моделирования

Рассмотрены три траектории движения БПЛА: прямолинейное движение продолжительностью 60 с, движение по траектории Лиссажу продолжительностью 120 с и зависание продолжительностью 30 с. Для каждой траектории использованы три конфигурации четырёх UWB-маяков: «Треугольник», «Квадрат» и «Линия со смещением».

Таким образом, исследовано девять комбинаций «траектория движения – конфигурация радиомаяков». Для каждой комбинации выполнено 100 независимых прогонов Монте-Карло.

Режимы обработки UWB-измерений (таблица 1).

При оценке влияния ошибок классификации рассмотрены пять режимов.

Таблица 1 – Режимы обработки дальномерных измерений

Режим	Описание
Без классификации	Используются все доступные UWB-измерения
XGBoost	Измерения отбираются по решениям классификатора
Истинные метки	Используются истинные метки LOS/NLOS из симулятора
Исправление False LOS	Из набора XGBoost исключаются ошибочно допущенные NLOS-измерения
Исправление False NLOS	В набор XGBoost возвращаются ошибочно исключенные LOS-измерения

Истинные метки LOS/NLOS доступны только в рамках имитационной модели. Поэтому режим с истинными метками и два режима исправления ошибок являются исследовательскими контрольными режимами, а не алгоритмами, реализуемыми в автономной навигационной системе.

Режим с истинными метками не рассматривается как гарантированная нижняя граница RMSE: исключение или добавление измерений изменяет состав дальномерной информации и геометрические условия коррекции EKF, поэтому использование истинных меток не обязано обеспечивать минимальную ошибку в каждом сценарии.

Критерий точности и статистический анализ

Основным показателем точности навигации является среднеквадратическая ошибка положения RMSE:

$$\text{RMSE} = \sqrt{[(1/K) \cdot \sum_{k=1}^K ((\hat{x}_k - x_k)^2 + (\hat{y}_k - y_k)^2 + (\hat{z}_k - z_k)^2)]} \quad (7)$$

где K – количество временных отсчетов;

$\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k$ – оцененные координаты БПЛА;

x_k, y_k, z_k – истинные координаты.

Для отдельной оценки последствий ошибок классификации рассчитывается эффект исправления False LOS:

$$\Delta_{\text{FL}} = \text{RMSE}_{\text{XGB}} - \text{RMSE}_{\text{correct FL}} \quad (8)$$

и эффект исправления False NLOS:

$$\Delta_{\text{FN}} = \text{RMSE}_{\text{XGB}} - \text{RMSE}_{\text{correct FN}} \quad (9)$$

Положительное значение Δ означает уменьшение RMSE после исправления соответствующего типа ошибки. Отрицательное значение означает увеличение RMSE.

Для непосредственного сравнения двух эффектов используется разность:

$$D = \Delta_{\text{FL}} - \Delta_{\text{FN}} \quad (10)$$

При $D > 0$ исправление False LOS в среднем обеспечивает большее снижение RMSE, чем исправление False NLOS. При $D < 0$ наблюдается обратное соотношение.

Статистической единицей повторения является отдельный прогон Монте-Карло, а не отдельное UWB-измерение. Для каждой из девяти комбинаций условий рассчитаны среднее значение D, 95% доверительный интервал и p-значение парного статистического сравнения по 100 прогонам.

Поскольку выполняется девять основных сравнений, используется поправка Бонферрони. Скорректированный уровень статистической значимости составляет:

$$\alpha_{\text{corr}} = 0,05 / 9 \approx 0,0056 \quad (11)$$

Результаты исследования. Качество классификации XGBoost

В ходе 100 прогонов Монте-Карло для всех исследованных сценариев сформирована агрегированная матрица ошибок классификатора XGBoost.

Общее количество классифицированных UWB-измерений составило 2 076 600.

Для класса NLOS получены следующие показатели: Precision = 0,875; Recall = 0,936; F1-score = 0,905. Классификатор ошибочно допустил к дальнейшей

обработке 39599 NLOS-измерений (False LOS) и ошибочно исключил 83 091 LOS-измерение (False NLOS) (таблица 2).

Таблица 2 – Матрица ошибок классификации LOS/NLOS

Истинный класс	Предсказано LOS	Предсказано NLOS
LOS	1 371 591	83 091
NLOS	39 599	582 319

Несмотря на то, что количество False NLOS превышает количество False LOS более чем в два раза, количество ошибок само по себе не позволяет определить их влияние на конечную точность навигации.

В предыдущем исследовании значение F1-score для класса NLOS составляло около 0,94 и было получено на сбалансированной синтетической тестовой выборке с соотношением классов LOS/NLOS 50/50. В настоящем исследовании F1-score= 0,905 рассчитан по UWB-измерениям, сформированным непосредственно в ходе навигационного эксперимента Монте-Карло, в котором вероятность возникновения NLOS была задана равной 0,30. Показатели получены в различных условиях формирования данных. Наблюдаемое различие нельзя однозначно объяснить только изменением соотношения классов, так как распределения входных признаков также могут различаться.

Точность навигации при различных режимах обработки (таблица 3).

Таблица 3 – Средний RMSE навигации по 100 прогонам Монте-Карло, м

Траектория/ маяки	Без классификации	XGBoost	Истинные метки	Исправление False LOS	Исправление False NLOS
Прямая/ треугольник	4,590	3,887	3,681	3,725	3,842
Прямая/квадрат	5,330	4,933	5,009	5,025	4,917
Прямая/линия со смещением	5,645	5,284	5,168	5,295	5,155
Лиссажу/треугольник	0,939	0,505	0,411	0,439	0,474
Лиссажу/квадрат	0,900	0,332	0,220	0,236	0,308
Лиссажу/линия со смещением	2,737	1,425	1,089	1,214	1,240
Зависание/треугольник	0,857	0,270	0,119	0,128	0,249
Зависание/квадрат	1,112	0,267	0,122	0,128	0,250
Зависание/линия со смещением	1,354	0,519	0,278	0,296	0,493

Использование классификации XGBoost сопровождалось меньшим средним RMSE по сравнению с режимом использования всех UWB-измерений.

Для траектории Лиссажу и режима зависания использование истинных LOS/NLOS-меток также сопровождалось меньшим средним RMSE по сравнению с XGBoost во всех трех конфигурациях радиомаяков. Для прямолинейного движения наблюдается иная картина. При конфигурации «Треугольник» средний RMSE уменьшился с 3,887 до 3,681 м, а при конфигурации «Линия со смещением» – с 5,284 до 5,168 м. Однако соответствующие 95% доверительные интервалы парной разности XGBoost и режима истинных меток включают ноль.

При конфигурации «Квадрат» средний RMSE при использовании истинных меток, напротив, составил 5,009 м против 4,933 м для XGBoost.

Следовательно, использование истинных меток LOS/NLOS не обеспечивает безусловного уменьшения RMSE во всех исследованных условиях. Наблюдаемый эффект зависит от сценария движения и конфигурации используемых радиомаяков.

Раздельное влияние False LOS и False NLOS (таблица 4).

Для определения влияния каждого типа ошибок были проанализированы изменения RMSE после раздельного исправления False LOS и False NLOS.

Таблица 4 – Среднее изменение RMSE после исправления ошибок классификации, м.

Траектория / конфигурация	Δ_{FL}	Δ_{FN}
Прямая / Треугольник	+0,162	+0,045
Прямая / Квадрат	–0,091	+0,017
Прямая / Линия со смещением	–0,011	+0,129
Лиссажу / Треугольник	+0,066	+0,031
Лиссажу / Квадрат	+0,096	+0,024
Лиссажу / Линия со смещением	+0,211	+0,186
Зависание / Треугольник	+0,143	+0,021
Зависание / Квадрат	+0,139	+0,017
Зависание / Линия со смещением	+0,223	+0,026

Положительное значение соответствует уменьшению среднего RMSE после исправления ошибки, отрицательное – его увеличению.

При зависании исправление False LOS сопровождалось уменьшением среднего RMSE на 0,139-0,223 м. Для False NLOS уменьшение составило 0,017–0,026 м. При движении по траектории Лиссажу среднее уменьшение RMSE после

исправления False LOS составило 0,066-0,211 м, а после исправления False NLOS – 0,024-0,186 м.

Для прямолинейного движения характер эффектов двух типов ошибок различался. Исправление False NLOS во всех трёх конфигурациях сопровождалось уменьшением среднего RMSE на 0,017-0,129 м. В то же время эффект исправления False LOS менял знак: для конфигурации «Треугольник» средний RMSE уменьшился на 0,162 м, тогда как для конфигураций «Квадрат» и «Линия со смещением» он увеличился на 0,091 и 0,011 м соответственно. Однако наличие положительного или отрицательного среднего эффекта не свидетельствует о его статистической значимости.

Статистическое сравнение двух типов ошибок (таблица 5).

Для непосредственного сравнения последствий False LOS и False NLOS использована парная разность D.

После учета поправки Бонферрони статистически значимое различие между эффектами двух типов ошибок сохраняется в пяти из девяти исследованных комбинаций.

При зависании различие статистически значимо для всех трех конфигураций радиомаяков. Во всех случаях $D > 0$, то есть исправление False LOS обеспечивало большее уменьшение RMSE, чем исправление False NLOS.

При движении по траектории Лиссажу аналогичный результат получен для конфигураций «Треугольник» и «Квадрат».

Для конфигурации «Линия со смещением» при движении по траектории Лиссажу 95% доверительный интервал включает ноль, поэтому статистически подтвержденного различия между эффектами двух типов ошибок не установлено.

При прямолинейном движении доверительные интервалы также включают ноль во всех трех конфигурациях. Следовательно, статистически значимого различия между влиянием False LOS и False NLOS для прямолинейной траектории не выявлено.

Таблица 5 – Статистическое сравнение эффектов исправления False LOS и False NLOS

Траектория / маяки	Среднее D, м	95% ДИ, м	p
Прямая / треугольник	0,1175	–0,1441...0,3790	0,375
Прямая / квадрат	–0,1082	–0,2925...0,0761	0,247
Прямая / линия	–0,1403	–0,3334...0,0529	0,153
Лиссажу / треугольник	0,0347	0,0233...0,0461	$2,81 \times 10^{-8}$
Лиссажу / квадрат	0,0721	0,0638...0,0803	$1,40 \times 10^{-31}$
Лиссажу / линия	0,0251	–0,0692...0,1194	0,599
Зависание / треугольник	0,1216	0,1073...0,1359	$6,03 \times 10^{-31}$

Зависание / квадрат	0,1215	0,1097...0,1333	$2,57 \times 10^{-37}$
Зависание / линия	0,1970	0,1686...0,2254	$1,05 \times 10^{-24}$

Обсуждение результатов. Полученные результаты показывают, что количество ошибок классификации само по себе недостаточно для оценки их влияния на навигационную систему. В эксперименте количество False NLOS (83 091) более чем вдвое превысило количество False LOS (39 599), однако при зависании устранение False LOS дало существенно большее уменьшение среднего RMSE, чем восстановление False NLOS. Аналогичный результат получен для траектории Лиссажу в конфигурациях «Треугольник» и «Квадрат». Следовательно, более редкий тип ошибки в определённых условиях может оказывать более существенное влияние на точность позиционирования.

Возможное объяснение – неодинаковое влияние двух типов ошибок на коррекцию EKF: ошибочно допущенное NLOS-измерение вносит смещение непосредственно в оценку состояния, тогда как ошибочно исключённое LOS-измерение лишь уменьшает объём доступной информации. Однако это гипотеза, а не установленный механизм. На прямолинейной траектории устранение False LOS не всегда уменьшало RMSE: в двух из трёх конфигураций средний эффект оказался отрицательным. Проверка гипотезы требует отдельного анализа последовательности коррекций EKF, числа доступных LOS-маяков и динамики GDOP и выходит за рамки настоящей работы.

Различие F1-score = 0,94 на сбалансированной тестовой выборке и F1-score = 0,905 в навигационном эксперименте показывает, что качество классификатора следует оценивать с учётом условий формирования данных и его влияния на конечную навигационную ошибку.

При интерпретации результатов необходимо учитывать ограничение: для конфигурации «Линия со смещением» использовался $\alpha = 0,15$, тогда как для «Треугольника» и «Квадрата» — $\alpha = 0,5$. Поэтому различия абсолютных RMSE между конфигурациями нельзя объяснять исключительно геометрией маяков; основные выводы основаны на парных сравнениях внутри одной конфигурации, где настройки EKF неизменны.

Дополнительные ограничения: все UWB- и инерциальные измерения получены имитационным моделированием, натурные испытания не проводились; используется упрощённая шестимерная модель EKF без оценивания ориентации и смещений датчиков; режимы исправления False LOS и False NLOS используют истинные метки симулятора и предназначены только для диагностического анализа [8].

Заключение. В работе исследовано влияние ошибок классификации LOS/NLOS на точность INS/UWB-навигации малоразмерного БПЛА. Для трёх траекторий и трёх конфигураций четырёх радиомаяков выполнено по 100 прогонов Монте-Карло. Использованы пять режимов обработки дальномерных измерений, позволяющих оценить общее влияние ошибок классификатора и отдельно исследовать последствия False LOS и False NLOS.

Показано, что влияние ошибок классификации на точность позиционирования зависит от условий моделирования и не определяется только количеством ошибочных решений. При зависании во всех трёх конфигурациях исправление False LOS дало более выраженное уменьшение RMSE, чем исправление False NLOS; различия значимы по парному t-критерию с поправкой Бонферрони. При движении по траектории Лиссажу аналогичный результат получен для «Треугольника» и «Квадрата», для «Линии» значимого различия не выявлено. При прямолинейном движении значимого различия не установлено ни в одной конфигурации; для «Квадрата» и «Линии» исправление False LOS сопровождалось небольшим увеличением среднего RMSE.

Таким образом, оценка классификатора UWB-измерений только по Precision, Recall и F1-score недостаточна для определения его влияния на интегрированную навигационную систему. Наряду с традиционными метриками целесообразно анализировать влияние ошибочных решений на конечную ошибку позиционирования в конкретных условиях движения и расположения радиомаяков.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на экспериментальную проверку выявленных закономерностей с реальным UWB-оборудованием, а также на анализ связи между последствиями ошибок классификации, числом доступных LOS-маяков и геометрией дальномерных измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao J., Deng Z., Hu E., Su W., Lou B., Liu Y. An Indoor UAV Localization Framework with ESKF Tightly-Coupled Fusion and Multi-Epoch UWB Outlier Rejection // *Sensors*. – 2025. – Vol. 25, No. 24. Art. 7673. – DOI: 10.3390/s25247673.
2. Fan Q., Sun B., Sun Y., Zhuang X. Performance Enhancement of MEMS-Based INS/UWB Integration for Indoor Navigation Applications // *IEEE Sensors Journal*. – 2017. – Vol. 17, No. 10. P. 3116-3130. – DOI: 10.1109/JSEN.2017.2689802.
3. Feng D., Wang C., He C., Zhuang Y., Xia X.-G. Kalman-Filter-Based Integration of IMU and UWB for High-Accuracy Indoor Positioning and Navigation // *IEEE Internet of Things Journal* – 2020. – Vol. 7, No. 4. P. 3133-3146. – DOI: 10.1109/JIOT.2020.2965115.
4. Marano S., Gifford W.M., Wymeersch H., Win M.Z. NLOS Identification and Mitigation for Localization Based on UWB Experimental Data // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* – 2010. – Vol. 28, No. 7. P. 1026-1035. – DOI: 10.1109/JSAC.2010.100907.
5. Barral V., Escudero C.J., García-Naya J.A., Maneiro-Catoira R. NLOS Identification and Mitigation Using Low-Cost UWB Devices // *Sensors* – 2019. – Vol. 19, No. 16. Art. 3464. – DOI: 10.3390/s19163464.
6. Nkrow R.E., Silva B., Boshoff D., Hancke G.P., Gidlund M., Abu-Mahfouz A.M. NLOS Identification and Mitigation for Time-Based Indoor Localization

Systems: Survey and Future Research Directions // ACM Computing Surveys. – 2024. – Vol. 56, No. 12. – Art. 303. P. 1–41. – DOI: 10.1145/3663473.

7. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining – 2016. – P. 785–794. – DOI: 10.1145/2939672.2939785.

8. Albaidhani A., Alsudani A. Anchor Selection by Geometric Dilution of Precision for an Indoor Positioning System Using Ultra-Wide Band Technology // IET Wireless Sensor Systems – 2021. – Vol. 11, No. 1. P. 22-31. – DOI: 10.1049/wss2.12006.

МЕТОД ALLIC КОРРЕКЦИИ СЛАБОУСВЕЩЁННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ КАК ИИ-КОМПОНЕНТ ПРЕДОБРАБОТКИ ВИДЕОПОТОКА ДЛЯ ДЕТЕКЦИИ ОБЪЕКТОВ В ДРОНОВЫХ СИСТЕМАХ

к.т.н., профессор Жумадилаева А.К.,
магистр технических наук Негутаров А.М.
Евразийский национальный университет
имени Л.Н. Гумилева,
Сайфулин Р.В. ТОО «QAZAQ AIRO»,
город Астана, Республика Казахстан

Аннотация. Рассмотрен метод ALLIC локально-адаптивной коррекции слабоосвещённых изображений как компонент предобработки видеопотока беспилотных летательных аппаратов. Лёгкая нейронная сеть (120 360 параметров) включает оценку кривых яркости, шумоподавление, маску тёмных зон и восстановление насыщенности. На LOL eval15 получены PSNR 19,65 дБ, SSIM 0,851; проверка выполнена детектором YOLOv8n.

Ключевые слова: улучшение слабоосвещённых изображений; глубокое обучение; локально-адаптивная коррекция; детекция объектов; беспилотные летательные аппараты; дроновая индустрия; искусственный интеллект.

Введение. Создание комплексных продуктов в дронной индустрии опирается на встроенные в контур обработки данных технологии искусственного интеллекта: автоматическое обнаружение объектов, навигацию, инспекцию и мониторинг. Значительная часть таких задач – патрулирование, поиск, инспекция инфраструктуры – выполняется в сумерках и ночью, когда на матрицу камеры БПЛА попадает мало света: падает контраст, искажаются цвета, растёт шум, и детекторы, обученные на дневных кадрах, работают хуже. Время обработки при этом ограничено: в контурах управления беспилотниками задержка не должна превышать 10–25 мс [1]. Предварительное улучшение слабоосвещённых изображений (Low-Light Image Enhancement, LLIE) повышает точность детекции: в двухэтапной схеме mAP детектора YOLO вырос с 0,490 до 0,574 после обработки сетью TBEFN [2], а слияние RGB- и тепловизионных данных в задаче ночного наблюдения с БПЛА подняло mAP с 64,7 до 79,4 % [3].

Большинство методов LLIE выполняет коррекцию глобально: единое преобразование применяется ко всем пикселям. В сценах со смешанным освещением (ночная улица с фонарями) осветление тёмных зон пересвечивает освещённые, а метрики PSNR и SSIM плохо отражают пригодность результата для последующих задач компьютерного зрения [4].

Цель работы – разработка и экспериментальная проверка лёгкого метода локально-адаптивной коррекции слабоосвещённых изображений, пригодного

как ИИ-компонент предобработки видеопотока перед детектором объектов в дронах системах.

Основная часть. Анализ существующих методов. Классические методы – эквализация гистограммы, гамма-коррекция – изменяют пиксели по единому закону без учёта локального контекста [5]; теория Retinex [6, 7] опирается на гладкость освещённости и порождает гало-артефакты. Глубокое обучение предложило автоэнкодер LLNet [8], безреферентную оценку кривых яркости Zero-DCE и Zero-DCE++ [9, 10], сети на основе декомпозиции Retinex [11, 12], GAN и гибридные трансформер-CNN архитектуры. Обзор публикаций 2017-2025 гг. (методология PRISMA, база Scopus) показал рост числа работ с менее чем 50 в 2017 г. до почти 490 в 2025 г. и типовые режимы отказа: усиление шума, пересвет, сдвиг домена [4, 13].

Ограничения существующих подходов: глобальный характер коррекции; обучение на интерьерных наборах LOL с равномерным освещением; падение цветовой насыщенности при осветлении в RGB; недостаточность PSNR и SSIM для оценки пригодности результата для детекции. Для дронах систем к ним добавляются требования лёгкости и малой задержки. Они определили требования к методу ALLIC (Adaptive Low-Light Image Correction): усиливать тёмные зоны, сохраняя освещённые, сохранять цвет и оцениваться в том числе по работе детектора.

Метод ALLIC. Общая схема.

ALLIC – лёгкая нейронная сеть (120 360 обучаемых параметров), состоящая из шести последовательных модулей (рисунок 1). Исходное изображение x_{orig} доступно модулям, которым необходимо сверяться с входом (вычисление карты освещённости, маски, поправки и цветокоррекции).

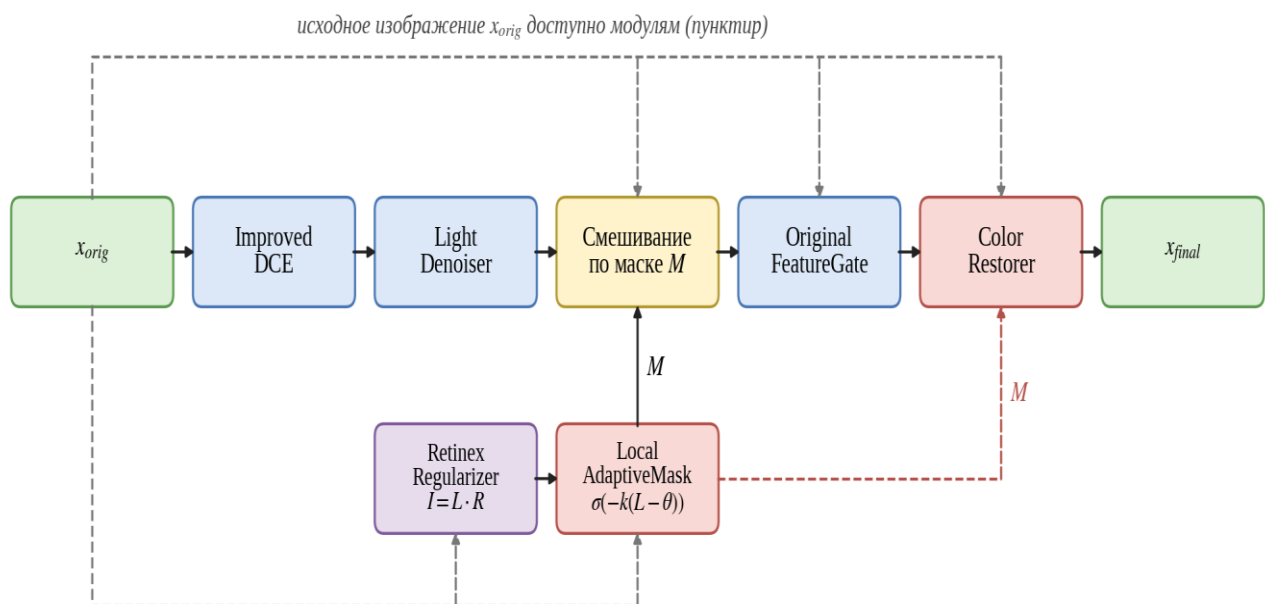


Рисунок 1 – Структура метода ALLIC (пунктир – использование исходного изображения)

Модули.

ImprovedDCE выполняет $T = 8$ итераций обучаемой кривой яркости, где $A_t(x)$ – карта коэффициентов, оцениваемая четырёхслойной свёрточной сетью (32 фильтра) с блоком канального внимания Squeeze-and-Excitation:

$$I_t(x) = I_{t-1}(x) + A_t(x) \cdot I_{t-1}(x) \cdot (1 - I_{t-1}(x)). \quad (1)$$

Кривая не меняет значения 0 и 1 и монотонна при $A_t \in (0; 1)$. Как и в ZeroDCE [9, 10], кривые оцениваются без эталона, однако на выходе сети применён sigmoid с делением на T , что ограничивает осветление.

LightDenoiser – компактная U-Net (три уровня, 24 фильтра) в резидуальной форме, подавляющая шум, усиленный на предыдущем этапе; для контроля изменений добавлен регуляризатор $L_{\text{denoise}} = \|x_{\text{clean}} - x_{\text{dce}}\|_1$, включаемый с 30-й эпохи.

RetinexRegularizer раскладывает изображение по модели $I = L \cdot R$; трёхслойная сеть оценивает по x_{orig} карту освещённости $L \in [0; 1]$, которая используется для построения маски и в регуляризаторе гладкости.

LocalAdaptiveMask формирует мягкую маску тёмных зон $M(x) \in [0; 1]$ по карте L и яркости оригинала $Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B$:

$$M(x) = G_\sigma \cdot \frac{1}{2} [\sigma(-k(L(x) - \theta)) + \sigma(-k(Y(x) - \theta))], \quad (2)$$

где σ – сигмоида,

k и θ – обучаемые параметры (крутизна и порог; $\theta \in [0,2; 0,7]$, $k \in [3; 20]$, начальные значения 0,45 и 8),

G_σ – фиксированное гауссово ядро 15×15 ($\sigma = 2,5$). Результат смешивается с оригиналом:

$$x_{\text{blended}} = M \odot x_{\text{clean}} + (1 - M) \odot x_{\text{orig}}. \quad (3)$$

Таким образом, в тёмных зонах результат определяют ImprovedDCE и LightDenoiser, в освещённых сохраняется оригинал, на границах происходит плавный переход.

OriginalFeatureGate добавляет к результату смешивания небольшую поправку, построенную по признакам исходного изображения и ограниченную гейт-картой $g \in [0; 1]$:

$$x_{\text{gated}} = \text{clamp}(x_{\text{blended}} + g \odot c, 0, 1), \quad c = s \cdot \tanh(W_{\text{orig}} f_{\text{orig}}), \quad (4)$$

где s – обучаемый скаляр (начальное значение 0,05), ограничивающий амплитуду поправки.

ColorRestorer компенсирует падение насыщенности S , возникающее при осветлении. Сеть по конкатенации x_{orig} и улучшенного изображения предсказывает карту $\Delta s \in (-1; 1)$; коррекция применяется только к каналу S в пространстве HSV и только в тёмных зонах:

$$S_{\text{new}}(x) = \text{clamp}(S(x) + \Delta s(x) \cdot s_{\text{sat}} \cdot M(x), 0, 1). \quad (5)$$

Амплитуда s_{sat} обучается (начальное значение 0,15, верхняя граница 0,5); каналы H и V не изменяются.

Функция потерь.

Обучение минимизирует взвешенную сумму девяти составляющих:

$$L_{\text{total}} = \lambda_1 L_1 + \lambda_2 L_2 + \dots + \lambda_9 L_9. \quad (6)$$

Составляющие (в скобках веса): L_{pixel} – потеря Charbonnier (1,0); $L_{\text{ssim}} = 1 - \text{SSIM}$ (1,0); L_{percept} – перцептивная потеря по признакам VGG-16 (0,04); L_{mono} – монотонность и гладкость кривых (0,5); L_{smooth} – гладкость карты освещённости (0,1); L_{exposure} – целевая яркость патчей 16×16 , равная 0,55 (0,2); L_{denoise} (0,1); L_{mask} – согласованность маски с яркостью оригинала (0,3); L_{color} – близость нормированных цветовых каналов и штраф избыточной насыщенности (0,5).

Экспериментальная оценка. Обучение и измерения выполнены на GPU NVIDIA GeForce RTX 4070 Ti SUPER (16 ГБ) в PyTorch (FP16). Обучающая выборка объединяет LOL v1 [11] и LOL v2 Real Captured и составляет 1863 пары; валидация – на LOL eval15. Пригодность результата для детекции проверялась на ExDark [14] (7363 ночных снимка, 12 классов, 14 297 объектов) детектором YOLOv8n с порогом уверенности 0,25. Метрики: PSNR, SSIM, разность средней уверенности детектора на улучшенном и исходном изображении Δconf и доля изображений ok, %, для которых уверенность не снизилась. Обучение: AdamW, $lr = 2 \cdot 10^{-4}$, косинусное расписание с перезапусками, патч 256×256 , батч 8, 300 эпох (около 2 ч 15 мин).

Обучение сошлось: PSNR на LOL eval15 вырос с 14,90 дБ (эпоха 10) до 19,65 дБ (эпоха 300), SSIM – с 0,591 до 0,851, за последние 50 эпох PSNR вырос лишь на 0,11 дБ. Δconf монотонно возрастала до +0,077, ok, % достиг 81. Результаты сопоставлены с Retinex-Net, Zero-DCE, Zero-DCE++ и KinD (таблица 1); значения базовых методов взяты из оригинальных публикаций [9, 10, 11, 12]. Также приведена промежуточная версия ALLIC v0.1 без модулей LocalAdaptiveMask и ColorRestorer.

Таблица 1 – Сравнение ALLIC с базовыми методами на LOL eval15

Метод	PSNR, дБ	SSIM	YOLO Δconf	ok, %	ExDark ok, %
Retinex-Net	16,77	0,462	–	–	–
Zero-DCE	14,86	0,559	–	–	–
Zero-DCE++	22,11	0,800	–	–	–
KinD	20,87	0,800	–	–	–
ALLIC v0.1	20,10	0,854	+0,062	78,0	43,0
ALLIC	19,65	0,851	+0,077	81,0	43,7

По PSNR ALLIC уступает Zero-DCE++ и KinD, по SSIM (0,851) превосходит или равен всем базовым методам. Отставание по PSNR объяснимо: маска намеренно ограничивает осветление светлых зон, тогда как эталоны LOL «полностью осветлены». По метрикам детектора полная версия превосходит

ALLIC v0.1: $\Delta\text{conf} +0,077$ против $+0,062$, ok 81 % против 78 %, на ExDark 43,7 % против 43,0 % при более низком PSNR (19,65 против 20,10 дБ). Метрики детектора для базовых методов не измерялись.

На реальных ночных сценах ExDark (рисунок 2) освещённые зоны сохраняются, а яркость затенённых участков повышается; становятся различимы силуэт человека и велосипед. Вместе с тем на ExDark средний Δconf отрицателен ($-0,043$), а ok, % = 43,7 означает, что у большей части снимков уверенность детектора снизилась.



Рисунок 2 – Результаты ALLIC на ночных сценах ExDark (слева – исходное изображение, справа – результат)

Место ALLIC в дроновой системе и ограничения. В комплексном дроновом продукте ALLIC занимает место между камерой и детектором: кадр видеопотока проходит коррекцию, после чего поступает на модуль обнаружения объектов и далее в контур принятия решений. Метод содержит около 120 тыс. параметров и обрабатывает кадр 720p примерно за 5 мс на используемом GPU, то есть укладывается в допустимую для контуров управления задержку [1]; для бортовых вычислителей потребуется дополнительная оптимизация (например, квантование). Ограничения. Отрицательный Δconf на ExDark объясняется тем, что YOLOv8n обучен на дневных снимках COCO, а ALLIC – на LOL; уверенность детектора – косвенный показатель, прямая оценка mAP по разметке ExDark не выполнялась. На сценах с жёлто-оранжевым натриевым освещением возможен цветовой сдвиг. Обучающая выборка невелика, базовые методы взяты из публикаций, а испытания на кадрах БПЛА и на бортовых вычислителях не проводились. Направления развития: обучение на аэросъёмке и ночных кадрах с борта БПЛА, совместная оптимизация с детектором, оценка неопределённости и оптимизация под встраиваемые платформы.

Заключение. Разработан метод ALLIC локально-адаптивной коррекции слабоосвещённых изображений: лёгкий (120 360 параметров) конвейер из шести

модулей с обучаемой маской тёмных зон, восстановлением насыщенности в HSV и функцией потерь из девяти составляющих.

На LOL eval15 получены PSNR 19,65 дБ и SSIM 0,851, прирост средней уверенности YOLOv8n составил +0,077 при доле улучшенных изображений 81 %. Метод целесообразно рассматривать как ИИ-компонент предобработки видеопотока в дронах при условии дальнейшей проверки на бортовых кадрах и оптимизации под встраиваемое оборудование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Zainab L., Afzal H., Mahmood K., Arif O. A light-weight deep learning framework for Low Light Image Enhancement // *Neurocomputing* – 2025. – Vol. 621. Article 129236.

2 Al-Refai G., Elmoaqet H., Al-Refai A., Alzu'bi A., Al-Hadhrami T., Alkhateeb A. Two-stage object detection in low-light environments using deep learning image enhancement // *PeerJ Computer Science* – 2025. – Vol. 11. Article e2799.

3 Gasimov V. Thermal-RGB fusion with lightweight CNNs for night-time drone surveillance and real-time adaptive sensor selection // *Problems of Information Technology* – 2025. – P. 45–55.

4 Al Sobbahi R., Tekli J. Comparing deep learning models for low-light natural scene image enhancement and their impact on object detection and classification: Overview, empirical evaluation, and challenges // *Signal Processing: Image Communication* – 2022. – Vol. 109. Article 116848.

5 Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital image processing. – 4th ed. – New York : Pearson, 2018. – 1168 p.

6 Land E. H., McCann J. J. Lightness and Retinex theory // *Journal of the Optical Society of America* – 1971. – Vol. 61, No. 1. – P.1-11.

7 Jobson D. J., Rahman Z., Woodell G. A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes // *IEEE Transactions on Image Processing* – 1997. – Vol. 6, No.7. P. 965-976.

8 Lore K. G., Akintayo A., Sarkar S. LLNet: A deep autoencoder approach to natural low-light image enhancement // *Pattern Recognition* – 2017. – Vol. 61. – P.650-662.

9 Guo C., Li C., Guo J., Loy C. C., Hou J., Kwong S., Cong R. Zero-reference deep curve estimation for low-light image enhancement // *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* – 2020. – P.1780-1789.

10 Li C., Guo C., Loy C. C. Learning to enhance low-light image via zero-reference deep curve estimation // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* – 2021. – Vol. 44, No. 8. – P.4225-4238.

11 Wei C., Wang W., Yang W., Liu J. Deep Retinex decomposition for low-light enhancement // *British Machine Vision Conference (BMVC)* – 2018. – No. 0451. – P.1-11.

12 Zhang Y., Zhang J., Guo X. Kindling the darkness: A practical low-light image enhancer // Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia – 2019. – P.1632-1640.

13 Li C., Guo C., Han L., Jiang J., Cheng M. M., Gu J., Loy C. C. Low-light image and video enhancement using deep learning: A survey // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence – 2021. – Vol. 44, No.12. – P. 9396-9416.

14 Loh Y. P., Chan C. S. Getting to know low-light images with the exclusively dark dataset // Computer Vision and Image Understanding – 2019. – Vol. 178. – P.30-42.

ОЗЫҚ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ПАЙДАЛАНА ОТЫРЫП, ДРОН ИНДУСТРИЯСЫНДА ИННОВАЦИЯЛЫҚ КЕШЕНДІ ӨНІМДІ ТЫЛ БӨЛІМШЕСІНДЕ ЖАСАУ

материалдық қамтамасыз ету циклының
бастығы, полковник Жакин А.Е.
курсант Ундаганов Б.Ж.
Қазақстан Республикасы Ұлттық
Ұлан Академиясы,
Петропавл қаласы, Қазақстан Республикасы

Аңдатпа. Бұл мақала жасанды интеллект (ЖИ) технологияларын дрон индустриясына енгізу жолдарын қарастырады. Тыл бөлімшесінің қажеттіліктеріне сәйкес инновациялық өнімдерді жасау, қамтамасыз ету және қолдану мәселелері зерттеледі. ЖИ технологияларының артықшылықтары, қолданылу аясы және болашақ перспективалары талданады. Қазіргі уақытта ұшқышсыз ұшу аппараттары материалдық-техникалық қамтамасыз ету, жүктерді жеткізу, аумақты бақылау, нысандардың жағдайын мониторингтеу және логистикалық процестерді автоматтандыру бағыттарында кеңінен қолданылуда. Жасанды интеллектті дрон жүйесіне енгізу арқылы оның автономдылығын арттыруға, деректерді жылдам өңдеуге және тылдық міндеттерді орындау тиімділігін жоғарылатуға мүмкіндік бар

Кілт сөздер: жасанды интеллект, дрон, инновация, тыл қызметі, Қазақстан, ұлттық ұлан, қорғаныс технологиялары, автоматтандыру, талдау жүйелері, жасанды интеллект, дрон, ұшқышсыз ұшу аппараты, тыл, логистика, инновациялық өнім, автоматтандыру, материалдық-техникалық қамтамасыз ету, мониторинг.

Кіріспе. Қазіргі заманда жасанды интеллект (ЖИ) технологиялары қорғаныс-қауіпсіздік саласында түбегейлі өзгерістер енгізуде. Дрон индустриясы – бұл технологиялық прогресс пен стратегиялық қажеттіліктің кесілісу нүктесі. ЖИ негізіндегі дрондардың дамуы ұлттық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің жаңа мүмкіндіктерін ашады. Тыл бөлімшелерінің негізгі міндеттерінің бірі – әскери бөлімнің үздіксіз қызмет етуіне қажетті материалдық ресурстарды ұйымдастыру және олардың қозғалысын бақылау.

Осы үдерістерді жетілдіру үшін заманауи цифрлық технологияларды, соның ішінде жасанды интеллект пен ұшқышсыз ұшу аппараттарын пайдалану өзекті болып табылады. Осыған байланысты тыл бөлімшелерінің қажеттіліктеріне бейімделген жасанды интеллектпен басқарылатын инновациялық дрон кешенін жасау материалдық-техникалық қамтамасыз ету сапасын арттырудың перспективалы бағыты болып табылады.

Қазіргі заманда жасанды интеллект (ЖИ) технологиялары қорғаныс-қауіпсіздік саласында түбегейлі өзгерістер енгізуде. Дрон индустриясы – бұл технологиялық прогресс пен стратегиялық қажеттіліктің кесілісу нүктесі.

Негізгі бөлім. ЖИ негізіндегі дрондардың дамуы ұлттық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің жаңа мүмкіндіктерін ашады (кесте 1).

Кесте 1 – Жасанды интеллект технологияларының негізгі тірлері

Технология	Сипаттамасы	Қолданылу аясы
Машиналық оқыту	Деректерді талдау арқылы жүйені үйрету	Ақаулықты анықтау, автоматтандыру
Терең оқыту	Нейрондық желілер арқылы күрделі есептеулер	Навигация, көзқарас бағдарламалары
Компьютерлік көру	Видеоақпараттан объектілерді тану	Бақылау жүйелері, танымалық дрондар
Табиғи тілді өңдеу	Мәтіндер мен дауысты ақпаратты түсіну	Коммуникация жүйелері, бұйрық беру
Үлкен деректер (Big Data)	Үлкен мөлшердегі ақпаратты өңдеу	Стратегиялық шешімдер, болжам жасау

Технологиялық инфрақұрылым.

Дрон жүйелері:

– кадағалау дрондары – аймақтық мониторинг, қорғаныс объектілерін тексеру;

– тасымалдау дрондары – медициналық жабдық, құжаттар, азық-түлік тасымалдау;

– байланыс дрондары – қалыпты байланыс жүйелерінің бұзылу кезінде альтернатива.

Кәсіби құрылым 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2 – Кәсіби құрылым

Рөл	Міндеттері
Дрон операторлары	Дрондарды ұшу, кадағалау, деректер жинау
Инженерлер	Жүйелерді жөндеу, техникалық қызмет көрсету
Деректер аналитиктері	Деректерді талдау, нәтижелерді түсіндіру
Бағдарламашылар	ЖИ алгоритмдерін жасау, интеграциялау

Жасанды интеллект компоненттері:

- компьютерлік көру – объектілерді тану, адамдарды анықтау;
- байланыс жүйелері – реал уақытта деректер алмасу;
- байланыс жүйелері – реал уақытта деректер алмасу;

Байланыс инфрақұрылымы:

- радиоэлектронды құралдар;
- спутниктік байланыс;
- жергілікті байланыс желілері

Инновациялық кешенді өнімнің құрылымы.

Тыл бөлімшелеріне арналған инновациялық кешенді өнімді бірнеше өзара байланысты элементтен құруға болады.

Бірінші элемент – ұшқышсыз ұшу аппараты. Оның негізгі міндеті – ақпарат жинау, мониторинг жүргізу және қажет болған жағдайда шағын жүктемені тасымалдау.

Екінші элемент – жасанды интеллект модулі. Бұл модуль дроннан келіп түсетін ақпаратты өңдейді, объектілерді анықтайды және алынған мәліметтерді жүйелейді.

Үшінші элемент – басқару және мониторинг платформасы. Ол операторға дронның орналасқан жерін, аккумулятор деңгейін, тапсырманың орындалу барысын және басқа да көрсеткіштерді бақылауға мүмкіндік береді.

Төртінші элемент – логистикалық ақпараттық жүйе. Оның көмегімен тыл бөлімшесіндегі материалдық ресурстардың қозғалысын бақылау және жоспарлау жүзеге асырылады.

Осы элементтердің бір жүйеге біріктірілуі тыл қызметінің жұмысын автоматтандыруға мүмкіндік береді. Мысалы, дрон белгілі бір аумақты бақылау кезінде камера арқылы ақпарат жинайды.

Жасанды интеллект алгоритмдері осы ақпаратты өңдеп, объектілердің орналасуы мен олардың жағдайы туралы мәлімет қалыптастырады. Нәтижесінде тыл қызметінің жауапты маманы қажетті ақпаратты қысқа уақытта алады.

Іске асыру жоспары

1-кезең: Жоспарлау және дайындық (3-6 ай):

- жобаны бекіту;
- қажетті ресурстарды жинау;
- заңнамалық негізді дайындау.

2-кезең: Пилоттық жоба (6-12 ай):

- шектеулі аумақта сынақтан өткізу;
- технологияларды тестілеу;
- нәтижелерді талдау.

3-кезең: Масштабтау (12-24 ай):

- толық операциялық қызметке шығу;
- барлық қажетті аймақтарға тарату;
- тәжірибені бөлісу.

Қауіпсіздік және заңнамалық талаптар:

- Қазақстан Республикасының әуе кеңістігін пайдалану ережелері;
- деректерді қорғау және құпиялылық талаптары;
- қызметкерлердің кәсіби біліктілігі;
- қауіпсіздік нұсқаулықтары мен ережелері.

Күтілетін нәтижелер:

- уақыт үнемдеу – 30-50% дейін;
- қауіпсіздікті арттыру – 25-40% дейін;
- тиімділік – 20-35% дейін;
- қызмет көрсету сапасы – айтарлықтай жақсарады.

Жасанды интеллект технологияларын енгізу

Жасанды интеллект – үлкен көлемдегі ақпаратты талдау, объектілерді тану, жағдайды бағалау және белгілі бір алгоритмдер негізінде шешім ұсыну мүмкіндігін беретін технологиялар жиынтығы.

Дрон кешеніне жасанды интеллектті енгізу бірнеше негізгі бағытта жүзеге асырылуы мүмкін:

- бейне және фотоматериалдарды автоматты талдау;
- объектілерді автоматты түрде анықтау;
- маршруттарды оңтайландыру;
- дронның техникалық жағдайын бақылау;
- қойма және логистикалық процестер туралы ақпаратты өңдеу;
- ауа райы және басқа да факторларды ескере отырып тапсырмаларды жоспарлау;
- алынған мәліметтерді тыл бөлімшесінің ақпараттық жүйесіне жіберу.

Кешенді өнімнің жұмыс істеу қағидаты.

Ұсынылатын жүйенің жұмыс істеу принципін бірнеше кезеңге бөлуге болады.

Бірінші кезеңде – тыл бөлімшесі белгілі бір тапсырманы жүйеге енгізеді. Мысалы, қойма объектісінің жағдайын бақылау немесе белгілі бір нүктеге шағын жүкті жеткізу міндеті қойылады.

Екінші кезеңде – жүйе тапсырманы талдап, дронның жұмыс параметрлерін анықтайды. Жасанды интеллект қолжетімді мәліметтерді пайдалана отырып, тапсырманы орындаудың оңтайлы нұсқасын ұсынады.

Үшінші кезеңде – дрон тапсырманы орындайды және камералар мен басқа да сенсорлар арқылы ақпарат жинайды.

Төртінші кезеңде – алынған ақпарат жасанды интеллект жүйесі арқылы өңделеді. Нәтижесінде операторға қысқаша талдау және қажетті ақпарат ұсынылады.

Бесінші кезеңде – жиналған мәліметтер тыл бөлімшесінің ақпараттық базасына енгізіліп, кейінгі жоспарлау кезінде пайдаланылуы мүмкін.

Жасанды интеллектпен жабдықталған дрон кешенін енгізудің негізгі артықшылықтарының бірі – уақытты үнемдеу. Адамның бірнеше сағат ішінде орындауы мүмкін бақылау жұмысын автоматтандырылған жүйе қысқа уақыт ішінде орындауға мүмкіндік береді.

Қорытынды. Тыл бөлімшесінде дрон индустриясының инновациялық кешенін құру заманауи қарулы күштердің талабына сай келетін маңызды қадам. Жасанды интеллект технологияларының қосылуы арқылы Қазақстанның қорғаныс қабілеттілігі айтарлықтай артатын болады. Бұл жоба менің дерекқорыма нақты жоспарлар мен құжаттар болмағандықтан, жалпы сипаттама ретінде ұсынылды. Нақты іске асыру үшін Тыл бөлімшесінің жоспарлау бөлімімен кеңесу қажет. Дрондарды жасанды интеллектпен жабдықтау олардың тек ұшу және бақылау мүмкіндіктерін ғана емес, сонымен қатар ақпаратты автоматты түрде өңдеу, объектілерді анықтау, логистикалық процестерді жоспарлау және тыл қызметінің жұмысын оңтайландыру мүмкіндіктерін кеңейтеді.

Тыл бөлімшелеріне арналған инновациялық кешенді өнімді енгізу материалдық ресурстардың қозғалысын бақылауды жетілдіруге, қажетті ақпаратты жылдам алуға және қызметкерлердің уақыт шығынын азайтуға мүмкіндік береді. Сонымен қатар мұндай технологияларды пайдалану әскери бөлімнің материалдық-техникалық қамтамасыз ету жүйесінің заманауи талаптарға бейімделуіне жағдай жасайды. Ұсынылып отырған инновациялық кешенді өнімді одан әрі дамыту үшін жасанды интеллект, компьютерлік көру, автономды басқару және цифрлық логистика технологияларын бір жүйеге біріктіру қажет.

Бұл ретте технологияны қолдану қауіпсіздік талаптарына, қолданыстағы нормативтік-құқықтық актілерге және адамның бақылауындағы басқару қағидаттарына сәйкес жүзеге асырылуы тиіс. Осылайша, озық жасанды интеллект технологияларын пайдалана отырып жасалған дрон кешені тыл бөлімшелерінің қызметін автоматтандыруға, логистикалық процестердің тиімділігін арттыруға және әскери бөлімнің материалдық-техникалық қамтамасыз ету сапасын жаңа деңгейге көтеруге мүмкіндік беретін перспективалы инновациялық шешім ретінде қарастырылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1 Қазақстан Республикасы Ішкі істер министрінің міндетін атқарушының 2025 жылғы 15 сәуірдегі № 296 бұйрығы «Қазақстан Республикасының Ұлттық ұланын қызметтік жануарлармен қамтамасыз етудің заттай нормаларын бекіту туралы» // Қазақстан Республикасы Нормативтік құқықтық актілерінің ақпараттық-құқықтық жүйесі «Әділет». – URL: zan.kz (жүгінген күні 29.09.2026).

2 Қазақстанның Ұлттық ұланы мерзімді әскери қызметшілер үшін ҰҰА операторларын оқытуды бастады // ҚазТАГ : халықаралық ақпарат агенттігі. – 2025. – 20 мамыр. – URL: <https://kaztag.kz> (жүгінген күні 29.09.2026)

3 Сенаторлар әскери бөлімінің жағдайымен танысты // Қазақстан Республикасы Парламенті Сенатының ресми сайты: Баспасөз қызметі. – 2023. – 26 қазан. – URL: parlam.kz (жүгінген күні 29.09.2026).

4 Ұландық сарбаздар асхана тағамын электронды жүйе арқылы бағалай алады // Polisia.kz : Қазақстан Республикасы Ішкі істер министрлігінің ресми ақпараттық медиа-порталы. – 2026. – 18 мамыр. – URL: <https://polisia.kz> (жүгінген күні 29.09.2026).

5 Сенаторлар Ұлттық ұлан туралы заңды іске асыру мәселелерін талқылады // Егемен Қазақстан, 2017

6 Ұлттық ұлан мекемелер аумағын күзетуді толық бақылауына алды // Inbusiness.kz : ақпараттық агенттік. – 2026. – 12 наурыз. – URL: <https://inbusiness.kz> (жүгінген күні 29.09.2026)

7 Қ. Қожамжаров ҚР Премьер-Министріне ҚР Ұлттық ұланының қызметіндегі өзекті мәселелер туралы депутаттық сауал жолдады // Қазақстан Республикасы Парламенті Сенатының ресми сайты. – 2020. – 18 маусым. – URL: parlam.kz (жүгінген күні 29.09.2026).

8 Ұлттық ұланда қаржылық сауатты арттыру бойынша сабақ өтті // Polisia.kz : Қазақстан Республикасы Ішкі істер министрлігінің ресми ақпараттық медиа-порталы. – 2025. – 12 қараша. – URL: <https://polisia.kz> (жүгінген күні: 06.10.2026)

ОТ ВИРТУАЛЬНОЙ СРЕДЫ К ФИЗИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ: DUCKIETOWN В ПОДГОТОВКЕ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ИИ И АВТОНОМНЫМ СИСТЕМАМ

сеньор-лектор кафедры
общеобразовательных дисциплин
Железнова И.О.
Академия Гражданской авиации
Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассматривается опыт создания виртуальной учебной лаборатории автономных систем на базе образовательной и исследовательской платформы Duckietown. Представлены предпосылки выбора платформы, этапы развертывания программной среды Duckiematrix на 17 студенческих и одном преподавательском компьютере, а также подход к организации практических занятий по программированию, компьютерному зрению и управлению мобильными роботами. Отдельное внимание уделено накопленному опыту работы студентов с физическими робототехническими платформами на базе Arduino и объективным ограничениям этого уровня оборудования при переходе к задачам обработки изображений, многоагентного взаимодействия и автономной навигации. Обосновывается поэтапное создание физической лаборатории, объединяющей симуляцию, наземных роботов и учебные беспилотные летательные аппараты. Показана роль открытой и воспроизводимой экспериментальной среды в подготовке кадров и верификации алгоритмов, которые впоследствии могут адаптироваться к прикладным задачам авиации, промышленности, чрезвычайных служб и других отраслей.

Ключевые слова: Duckietown, Duckiematrix, автономные системы, искусственный интеллект, компьютерное зрение, мобильная робототехника, симуляция, воспроизводимость, беспилотные летательные аппараты.

1 Актуальность подготовки специалистов по автономным системам.

Современные автономные транспортные системы формируются на пересечении программирования, математического моделирования, компьютерного зрения, искусственного интеллекта, теории управления, обработки сенсорных данных, электроники и механики. Подготовка специалистов в этой области не может ограничиваться изучением отдельных программных средств или выполнением разрозненных лабораторных работ. Студент должен понимать взаимосвязь между алгоритмом, моделью среды, датчиками, исполнительными механизмами и наблюдаемым поведением технической системы.

Для авиационного образования данная задача имеет особое значение. Выпускники, работающие с беспилотными летательными аппаратами и другими сложными техническими комплексами, должны уметь анализировать систему как единое целое, выявлять причины отклонений, проверять гипотезы экспериментально и документировать полученные результаты. Такие компетенции формируются в процессе регулярной практической работы, при которой изменение программного кода приводит к измеримому изменению поведения автономного агента.

Развертывание полноценной физической лаборатории требует оборудования, помещений, технического обслуживания и устойчивой методической базы. При ограниченных ресурсах рациональным решением является поэтапная модель: сначала создается единая виртуальная среда, затем в нее включаются физические наземные роботы, после чего учебный комплекс расширяется за счет беспилотных летательных аппаратов и задач многоагентного управления.

2 Duckietown как образовательная и исследовательская платформа.

Проект Duckietown был создан в 2016 году в Массачусетском технологическом институте как учебная среда для исследования задач автономного транспорта. Основная идея платформы состоит в уменьшении физического масштаба транспортной системы при сохранении принципиальной сложности инженерных задач: восприятия окружающей среды, локализации, планирования движения, управления, взаимодействия нескольких агентов и обеспечения безопасности.

К настоящему времени платформа получила распространение более чем в 310 университетах и 190 компаниях в 75 странах. Ее использование в разных образовательных и исследовательских организациях создает важное преимущество: результаты могут сопоставляться в унифицированной среде, а разработанные алгоритмы и учебные задания могут переноситься между лабораториями. Официальная документация включает материалы по настройке программной среды, сборке и эксплуатации роботов, компьютерному зрению, калибровке, управлению, локализации, планированию и работе с беспилотными платформами.

Duckietown сочетает виртуальную и физическую части. Среда Duckiematrix позволяет создавать виртуальные миры, размещать в них автономных агентов, подключать программные модули и исследовать поведение системы без риска повреждения оборудования. Физический Duckiebot дает возможность переносить алгоритмы на реальную мобильную платформу и изучать влияние шумов датчиков, освещения, механических допусков, задержек и ошибок калибровки.

3 Создание виртуальной лаборатории DuckieSimTown.

В Академии гражданской авиации создана виртуальная лаборатория DuckieSimTown. Программная среда развернута на 17 студенческих ноутбуках и одном компьютере преподавателя. В качестве базовой операционной системы используется Ubuntu 22.04, для учебного программирования применяется Python

3.10, а моделирование выполняется в среде Duckiematrix. Единая конфигурация рабочих мест позволяет проводить синхронные практические занятия со всей учебной группой и уменьшает различия, связанные с локальными настройками компьютеров.

Развертывание выполнялось поэтапно. На первом этапе была адаптирована установка среды на компьютерах с Windows с использованием WSL и подготовлена инструкция. На следующем этапе были настроены системы с Windows 10 и Ubuntu 22.04, после чего Duckiematrix был установлен на студенческие компьютеры. Публикация видеомануала обеспечила документирование процедуры и создала основу для воспроизведения установки другими преподавателями и образовательными организациями.

Виртуальная лаборатория используется как инженерная среда, а не как средство демонстрации. Студенты изменяют параметры программы, наблюдают движение автономного агента, сопоставляют ожидаемое и фактическое поведение, определяют причины отклонений и проверяют исправления повторным экспериментом. По мере освоения среды задания могут переходить от базовых команд движения к условной логике, обработке сенсорных данных, компьютерному зрению, управлению по обратной связи и взаимодействию нескольких агентов.

4 Методика практической подготовки.

Методика занятий строится вокруг экспериментального цикла: наблюдение системы, формулирование вопроса, выдвижение гипотезы, изменение программного кода, проведение эксперимента и объяснение результата. Такой подход развивает способность исследовать незнакомую техническую систему и снижает зависимость от готовых пошаговых инструкций.

В рамках платформы могут последовательно изучаться основы Python, Linux, контейнеризация, кинематика мобильного робота, одометрия, обработка изображений, обнаружение объектов, локализация, планирование маршрута и алгоритмы управления. Виртуальная среда дает возможность многократно повторять испытания в одинаковых условиях, фиксировать исходные параметры и сравнивать версии алгоритмов. Одновременно она позволяет создавать нештатные ситуации, которые трудно или небезопасно воспроизводить на физическом оборудовании на начальном этапе обучения.

Результатом учебного задания считается не только факт выполнения заданного движения. Студент должен описать условия эксперимента, используемую версию программы, наблюдаемое поведение и причины расхождения между моделью и результатом. Тем самым практическая работа приближается к структуре инженерного исследования.

5 Опыт работы с физическими платформами на базе Arduino.

До развертывания DuckieSimTown студенты Академии получили опыт создания физических мобильных роботов на базе микроконтроллеров Arduino. В ходе практической работы выполнялись сборка платформ, подключение двигателей и датчиков, настройка электронных компонентов, программирование реакции на препятствия и испытание автономного слалома на учебной трассе.

Данный этап подтвердил высокую педагогическую ценность физического эксперимента. Студенты столкнулись с различиями характеристик двигателей, погрешностями датчиков, ошибками монтажа и необходимостью калибровки. Они увидели, что работоспособность программы не гарантирует требуемого поведения реального устройства без учета характеристик аппаратной части и условий среды.

Вместе с тем микроконтроллерный уровень имеет объективные ограничения по вычислительной мощности и памяти. Он подходит для базового управления двигателями, опроса простых датчиков и выполнения детерминированной логики, но недостаточен для полноценной обработки видеопотока, современных алгоритмов компьютерного зрения, локализации по комплексным данным и координации группы автономных агентов. Поэтому дальнейшее развитие требует перехода к платформам с более производительными вычислительными модулями, камерами и программной архитектурой, поддерживающей модульную разработку.

6 Поэтапный переход к физической лаборатории.

Предлагаемая модель развития лаборатории предусматривает сохранение уже созданной виртуальной инфраструктуры и ее дополнение физическими платформами. Симуляция используется для первичной разработки и безопасной проверки алгоритма. Затем тот же алгоритм переносится на физического робота, где проводится калибровка и оценивается устойчивость к реальным помехам. После отработки одиночного робота создаются сценарии взаимодействия нескольких машин и формируется основа для перехода к учебным беспилотным летательным аппаратам.

Этап	Среда	Основные задачи	Образовательный результат
1	Arduino	Двигатели, простые датчики, автономный слалом	Первичный опыт физической робототехники
2	Duckiematrix	Моделирование, отладка, повторяемые эксперименты	Алгоритмическое и системное мышление
3	Duckiebot	Компьютерное зрение, локализация, управление	Переход от модели к реальной системе
4	Группа роботов	Обмен данными, координация, безопасность	Основы многоагентных систем
5	Учебные дроны	Автономный полет, зрение, планирование	Компетенции для беспилотной авиации

Физическая часть лаборатории должна включать парк учебных Duckiebot, стандартизированную трассу, камеры и сенсорные модули, оборудование для зарядки и обслуживания, а также запасные компоненты. Авиационный контур целесообразно создавать на базе программируемых учебных дронов с защищенной зоной полетов, средствами позиционирования и единым программным интерфейсом. Общая инфраструктура хранения данных и версий программ обеспечит связь между виртуальными и физическими экспериментами.

7 Открытость, валидность и воспроизводимость исследований.

Для образовательных и фундаментальных исследований автономных систем принципиальное значение имеют проверяемость и воспроизводимость результата. Научное утверждение о работоспособности алгоритма должно сопровождаться описанием условий эксперимента, конфигурации оборудования и программного обеспечения, критериев оценки и наблюдаемых ограничений. Другой исследователь должен иметь возможность повторить испытание и получить сопоставимый результат.

Duckietown официально позиционируется как открытая исследовательская платформа. Унифицированная архитектура, общая документация, модульное построение программного обеспечения и контейнеризация создают условия для воспроизводимого развертывания. Это позволяет сравнивать алгоритмы не по эффективности отдельной демонстрации, а по заранее определенным метрикам в известных условиях.

Открытость методологии не противоречит требованиям информационной безопасности. Необходимо различать научное ядро исследования и конкретное прикладное применение. Открытыми могут оставаться математические модели, методы тестирования, учебные наборы данных, базовые алгоритмы и критерии оценки. Ограниченный режим доступа может применяться к оперативным данным, характеристикам объектов, реальным маршрутам, специальным сценариям и результатам ведомственной адаптации.

Таким образом, оптимальной является схема, при которой алгоритм сначала проходит объективную проверку на общей воспроизводимой экспериментальной базе, а затем адаптируется к специализированной задаче. Этот подход снижает технические риски, делает обоснованным выбор метода и создает понятную границу ответственности между фундаментальным исследованием и прикладным внедрением.

Когда-то в моей научной работе был важный переход от лабораторных исследований к экспедициям на научных судах. Именно там особенно ясно становилось, что реальная среда всегда сложнее модели. Сегодня я хочу, чтобы мои студенты тоже прошли этот путь: от программной модели к физической системе, от заранее известных условий к настоящей инженерной неопределённости.

8 Ожидаемые результаты и направления сотрудничества.

Создание физической лаборатории на базе уже работающей виртуальной инфраструктуры позволит организовать сквозную подготовку: от основ программирования и моделирования до компьютерного зрения, управления физическими роботами и автономного полета. Студенты смогут переносить алгоритмы из симуляции на реальные устройства, измерять влияние аппаратных ограничений и выполнять проекты, связанные с задачами авиации и других отраслей.

Лаборатория может использоваться не только в учебном процессе, но и как площадка для студенческих исследовательских работ, междисциплинарных проектов, соревнований, подготовки выпускных работ и апробации прикладных алгоритмов. Единая воспроизводимая среда создает основу для сотрудничества с университетами, исследовательскими организациями, производителями робототехники и беспилотных систем, государственными структурами и промышленными предприятиями.

К возможным формам партнерства относятся предоставление оборудования, совместное финансирование лабораторных комплектов, экспертное сопровождение, постановка прикладных задач, организация стажировок и выполнение совместных исследований. Академия со своей стороны располагает виртуальной инфраструктурой, методикой развертывания, подготовленными рабочими местами, опытом физической робототехники и студентами, готовыми к проектной работе.

Виртуальная лаборатория учит строить модель. Физическая лаборатория учит отвечать за то, как эта модель работает в реальном мире.

Заключение. Опыт Академии гражданской авиации показывает, что практическую подготовку в области автономных систем можно начинать до создания полностью оснащенной физической лаборатории. Развертывание DuckieSimTown на 17 студенческих и одном преподавательском компьютере обеспечило единое пространство для программирования, моделирования и экспериментальной работы. Предшествующий опыт автономного слалома на Arduino подтвердил готовность студентов работать с физическими системами и одновременно обозначил границы микроконтроллерного уровня.

Следующим обоснованным этапом является создание физического комплекса Duckietown с наземными роботами, стандартизированной трассой и последующим включением учебных дронов. Такой комплекс позволит связать виртуальную разработку с реальными измерениями, перейти к компьютерному зрению и многоагентному взаимодействию, а также обеспечить воспроизводимую проверку алгоритмов до их адаптации к отраслевым задачам.

Реализация проекта требует партнерского участия образовательных, научных, государственных и промышленных организаций. При наличии оборудования и экспертной поддержки уже созданная виртуальная инфраструктура может стать основой устойчивой учебной и исследовательской

среды по автономным системам, ориентированной на подготовку специалистов для авиации, робототехники и беспилотной индустрии Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Duckietown. A brief history of Duckietown. URL: <https://duckietown.com/history/> (дата обращения: 05.10.2026).
- 2 Duckietown. Robotics and AI research with Duckietown. URL: <https://duckietown.com/research-papers/> (дата обращения: 05.10.2026).
- 3 The Duckietown Manual. URL: <https://docs.duckietown.com/ente/duckietown-manual/> (дата обращения: 05.10.2026).
- 4 The Duckietown Manual. Simulation and the Duckiematrix. URL: <https://docs.duckietown.com/ente/> (дата обращения: 05.10.2026).
- 5 The Duckietown Manual. Docker and reproducible deployments. URL: <https://docs.duckietown.com/ente/duckietown-manual/70-developer-manual/basics/development/developer-basics-docker.html> (дата обращения: 05.10.2026).
- 6 Железнова И. Развертывание Duckietown на доступных компьютерах: видеомануал. URL: <https://youtu.be/0vqfccIVb5Q> (дата обращения: 05.10.2026).

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ ВЫБОР АРХИТЕКТУРЫ EDGE AI ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

докторант, майор Зверев Н.Н.
Национальный университет обороны РК,
город Астана, Республика Казахстан

Аннотация. Предложен подход к выбору места выполнения алгоритмов искусственного интеллекта в беспилотных авиационных системах. Сравниваются облачная, наземная периферийная, бортовая и распределённая архитектуры. Для пяти сценариев Республики Казахстан показано, что рациональный вариант определяется требованиями к задержке, связи, энергопотреблению, автономности и масштабу применения.

Ключевые слова: Edge AI, беспилотные авиационные системы, БПЛА, искусственный интеллект, периферийные вычисления, архитектура, Казахстан.

Введение. Современный беспилотный летательный аппарат всё чаще является не только носителем камеры или датчика, но и подвижным вычислительным узлом. На борту формируются видеопотоки, тепловизионные изображения, навигационные данные и телеметрия. Для распознавания объектов, контроля маршрута, обнаружения препятствий и поддержки решений эти данные необходимо обработать за приемлемое время. При этом возможности БПЛА ограничены массой, запасом энергии и производительностью бортовой электроники.

Традиционный подход предполагает передачу данных в удалённое облако, где размещены мощные вычислительные ресурсы. Однако для БПЛА важна не только скорость работы самой нейронной сети, но и полная задержка от получения данных до выдачи решения. Она включает передачу по радиоканалу, обработку на сервере и возврат результата. В статье P. McEnroe, S. Wang и M. Liyanage A Survey on the Convergence of Edge Computing and AI for UAVs показано, что именно сочетание ограничений по задержке, энергии и качеству беспроводного соединения стало одной из причин развития Edge AI для БПЛА [1]. Статья Mobile Edge Computing and Machine Learning in the Internet of Unmanned Aerial Vehicles Z. Ning и соавторов подтверждает, что для Internet of UAVs критическими факторами остаются изменяющиеся беспроводные каналы, ограниченная ёмкость аккумулятора и ограниченные вычислительные ресурсы аппарата [2].

Под Edge AI в настоящей работе понимается выполнение алгоритмов искусственного интеллекта максимально близко к источнику данных: на наземном локальном сервере, непосредственно на борту БПЛА либо совместно несколькими аппаратами. Китайские исследования также рассматривают БПЛА

одновременно как пользователя периферийного сервера и как самостоятельный вычислительный узел [3-5].

Для Республики Казахстан вопрос выбора архитектуры имеет прикладное значение. Концепция развития гражданской беспилотной авиации на 2025-2031 годы предусматривает расширение применения БАС, развитие собственных технологий, научно-исследовательских работ и испытательной инфраструктуры [6]. Концепция развития искусственного интеллекта на 2024-2029 годы ориентирует внедрение искусственного интеллекта в промышленность, энергетику, транспорт, сельское хозяйство и другие отрасли [7]. Одновременно продолжается развитие наземной и спутниковой телекоммуникационной инфраструктуры, что означает различие условий связи в городе, сельской местности и на протяжённых маршрутах [8].

Цель исследования – разработать простую многокритериальную методику выбора места выполнения «AI-функций» в БАС и применить её к типовым сценариям Республики Казахстан. В отличие от обзора отдельных алгоритмов, внимание сосредоточено на вопросе: где именно целесообразно выполнять интеллектуальную обработку – в облаке, на наземном сервере, на борту БПЛА или распределённо в группе аппаратов.

Основная часть. Четыре варианта размещения интеллектуальной обработки (таблица 1). В работе рассматриваются четыре архитектуры. Их следует понимать не как последовательные поколения технологий, а как разные варианты размещения вычислений.

Таблица 1 – Основные варианты архитектуры Edge AI

Архитектура	Где выполняется AI	Основное преимущество	Основное ограничение
Cloud AI	Удалённый центр обработки или облачная платформа	Большие вычислительные ресурсы; удобство хранения и обучения моделей	Высокая зависимость от внешнего канала; сетевая задержка
Ground Edge AI	Наземная станция, мобильный сервер, рядом с зоной полёта	Снижение задержки по сравнению с облаком; тяжёлые вычисления вынесены с борта	Сохраняется зависимость от радиоканала «БПЛА - земля»
Onboard Edge AI	Непосредственно на БПЛА	Минимальная зависимость критических функций от внешней сети; быстрый локальный отклик	Дополнительные масса, мощность, нагрев и стоимость бортовой аппаратуры
Collaborative Edge AI	Несколько БПЛА и/или наземных узлов совместно	Распределение нагрузки; совместное восприятие; масштабирование группы	Требует устойчивого межбортового обмена и сложной координации

Cloud AI подходит для обучения моделей, хранения больших массивов данных, построения карт и ретроспективного анализа. Его слабое место –

зависимость полного контура решения от внешней сети. Ground Edge приближает сервер к месту выполнения задачи и позволяет оставить на БПЛА только относительно лёгкие функции. Однако передача исходного видеопотока или других данных всё равно требует устойчивого канала.

Практический эксперимент J. Sun и соавторов показал характерный компромисс. При переносе архитектуры обнаружения объектов YOLOv5 с периферийного модуля Jetson Orin NX на внешний вычислительный ресурс время обработки задания уменьшилось с 44,5 до 6,7 мс, однако при пропускной способности канала передачи данных от БПЛА 100 Мбит/с среднее время прохождения данных по сети в прямом и обратном направлениях составило 115 мс [9]. Следовательно, быстрый сервер не гарантирует малой полной задержки, если существенную часть времени занимает связь.

Onboard Edge AI предполагает размещение средств искусственного интеллекта непосредственно на борту БПЛА. В этом случае весь цикл — от получения и обработки данных до распознавания объектов и формирования решения — выполняется без обязательного обращения к внешним вычислительным ресурсам. Практическая реализуемость такого подхода подтверждается наличием серийных компактных вычислительных платформ. Например, платформы NVIDIA Jetson Nano и Jetson Orin позволяют непосредственно на борту БПЛА выполнять обработку изображений с камеры, обнаруживать и классифицировать объекты, а также использовать полученные результаты для решения навигационных и других прикладных задач. Например, Y. Lan и соавторы получили 40 кадров/с на мини компьютере Jetson Xavier NX в задаче патрулирования сада [10], а H.V.Koay и соавторы показали до 12,8 кадров/с на более доступном одноплатном микрокомпьютере Jetson Nano 2 GB [11]. Работа авторов K.Jiang и T.Tang демонстрирует 57 кадров/с на мини компьютере Jetson Orin NX при применении квантования TensorRT INT8 для обнаружения объектов и планирования маршрута [12]. Эти значения получены в разных экспериментах и не должны напрямую сравниваться как единый показатель; они ярко демонстрируют практические возможности бортового AI.

Collaborative Edge AI переносит акцент с одного аппарата на группу. БПЛА могут обмениваться результатами обнаружения, картами, признаками или частями вычислительной задачи. Такой подход особенно интересен для больших территорий и групповых миссий, но его эффективность определяется качеством межбортовой сети и алгоритмом распределения вычислений.

Критерии выбора архитектуры

Для широкой инженерной практики методика должна быть достаточно простой. Поэтому предлагается оценивать четыре архитектуры по семи критериям:

Используются следующие обозначения:

L – полная задержка получения решения;

C – зависимость от внешней связи;

B – требуемая полоса и объём передаваемых данных;

E – дополнительная энергетическая нагрузка на БПЛА;

Р – требования к бортовым вычислительным ресурсам;
 А – автономность при ухудшении или потере внешнего соединения;
 S – масштабируемость для групповых и распределённых задач.

Поскольку опубликованные работы используют разные БПЛА, нейронные сети, разрешение изображений и способы измерений, объединять их численные результаты в одну «среднюю задержку» методологически неправильно. Поэтому на этапе архитектурного проектирования используется шкала полезности от 1 до 5, где 5 означает наиболее благоприятное свойство архитектуры по конкретному критерию, а 1 – наименее благоприятное. Нормированная оценка определяется как:

$$q_{ij} = (r_{ij} - 1) / 4 \quad (1)$$

где r_{ij} – оценка архитектуры j по критерию i по шкале 1-5;
 q_{ij} – её нормированное значение от 0 до 1.

Делитель 4 соответствует диапазону используемой шкалы ($5 - 1 = 4$). В результате оценке 1 соответствует нормированное значение 0, а оценке 5 – значение 1.

Таблица 2 – Базовые оценки архитектур по шкале полезности 1-5

Архитектура	L	C	B	E	P	A	S
Cloud AI	1	1	1	3	5	1	4
Ground Edge	3	2	2	4	4	2	4
Onboard Edge	5	5	5	3	2	5	3
Collaborative Edge	4	4	4	2	3	4	5

Высокая оценка Onboard Edge по задержке, зависимости от связи и автономности объясняется тем, что критическая обработка не требует обязательной передачи данных наружу. Cloud AI, наоборот, практически не требует мощного вычислителя на борту, поэтому получает наивысшую оценку по критерию Р. Ground Edge выгоден по бортовой энергетической и вычислительной нагрузке, а Collaborative Edge - по масштабируемости группы.

Важность критериев меняется от задачи к задаче. Для поиска человека при чрезвычайной ситуации особенно важны скорость реакции и автономность. Для сельскохозяйственного мониторинга выше роль объёма передаваемых данных, энергии и возможности работы вдали от постоянной инфраструктуры.

Для групповых БПЛА главным становится масштабирование. Вес критерия определяется нормированием его сценарной важности u_i от 1 до 5:

$$w_i = u_i / \sum u_i \quad (2)$$

Интегральная оценка архитектуры для конкретного сценария рассчитывается как:

$$K_j = \sum w_i q_{ij} \quad (3)$$

где w_i – весовой коэффициент (вес) i -го критерия.

Архитектура с максимальным K рассматривается как предпочтительная на этапе предварительного проектирования. Такой результат не заменяет испытаний: он служит формализованной поддержкой решения до появления единого набора натурных измерений.

Сценарии применения в Республике Казахстан

Для проверки методики выбраны пять сценариев, которые соответствуют актуальным направлениям применения БАС и ИИ в Казахстане. Они различаются по требованиям к связи, скорости реакции, энергии и масштабу (таблица 3).

Сельское хозяйство. Официальные материалы Правительства Республики Казахстан связывают повышение эффективности сельского хозяйства с цифровыми технологиями, дистанционным мониторингом и применением агродронов [13]. При обследовании больших площадей БПЛА формирует значительный объём изображений.

Постоянная передача всего видеопотока не всегда необходима: на борту можно выявлять аномалии, отбирать значимые кадры и передавать уже результаты и координаты, а тяжёлую аналитику и переобучение модели выполнять после полёта.

Мониторинг ЛЭП и нефтегазовой инфраструктуры. Концепция развития ИИ относит энергетику, нефтегазовый сектор и промышленность к значимым направлениям внедрения интеллектуальных технологий. Линейные объекты имеют большую протяжённость, поэтому качество связи вдоль всего маршрута может меняться. Здесь полезна бортовая первичная диагностика: обнаружение дефекта или аномалии выполняется на БПЛА, а подтверждающие материалы передаются при наличии канала.

Чрезвычайные ситуации и поиск. МЧС Республики Казахстан сообщает о расширении применения БПЛА и функций искусственного интеллекта [14].

Для поиска людей, обнаружения очага пожара и оценки опасной зоны критична возможность продолжить работу даже при ухудшении внешней связи. Следовательно, распознавание и основные навигационные функции должны сохраняться локально; при наличии нескольких аппаратов полезен обмен результатами между ними.

Городской мониторинг. В городе выше вероятность наличия устойчивой наземной телекоммуникационной и вычислительной инфраструктуры. Это создаёт условия для Ground Edge: на БПЛА остаются безопасность полёта и первичная фильтрация, а ресурсоёмкая видеоаналитика переносится на локальный наземный сервер. Такой вариант уменьшает требования к каждому воздушному вычислителю.

Таблица 3 – Сценарные веса критериев

Сценарий	L	C	B	E	P	A	S
Сельское хозяйство	0,087	0,174	0,217	0,174	0,087	0,174	0,087
ЛЭП / нефтегаз	0,136	0,182	0,136	0,182	0,091	0,182	0,091
ЧС / поиск	0,200	0,160	0,080	0,120	0,080	0,200	0,160
Городской мониторинг	0,111	0,056	0,056	0,278	0,278	0,056	0,167
Группа / удалённые территории	0,154	0,077	0,077	0,077	0,077	0,154	0,385

Групповое применение на удалённых территориях. Национальные проекты связи последовательно расширяют широкополосный, мобильный и спутниковый доступ, однако условия эксплуатации на большой территории страны объективно различаются. Для группы БПЛА рациональна иерархическая схема: каждый аппарат сохраняет минимальный локальный набор AI-функций, аппараты обмениваются результатами между собой, а Ground/Cloud используются при доступности внешнего канала.

Результаты расчётной апробации

После нормирования базовых оценок таблицы 2 и применения сценарных весов по формуле (3) получены интегральные оценки, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Интегральные оценки архитектур

Сценарий	Cloud	Ground Edge	Onboard	Collaborative	Предпочтительный вариант
Сельское хозяйство	0,239	0,446	0,804	0,663	Onboard Edge
ЛЭП / нефтегаз	0,250	0,466	0,795	0,659	Onboard Edge
ЧС / поиск	0,260	0,480	0,800	0,710	Onboard Edge
Городской мониторинг	0,542	0,639	0,569	0,583	Ground Edge
Группа / удалённые территории	0,404	0,558	0,712	0,788	Collaborative Edge

Полученный результат показывает, что универсально «лучшей» архитектуры нет. Для сельского хозяйства, инспекции протяжённых объектов и задач ЧС наибольшую оценку получил Onboard Edge. Причина проста: в этих

сценариях ценятся автономность, снижение зависимости от канала и возможность быстро обрабатывать данные непосредственно в полёте. Для городского мониторинга предпочтительным оказался Ground Edge, поскольку развитая наземная инфраструктура позволяет вынести тяжёлые вычисления с БПЛА. Для группы на удалённой территории лидирует Collaborative Edge, где главное преимущество связано с масштабируемостью и совместной работой нескольких узлов.

Важно правильно трактовать значения К. Они являются результатом предложенной модели поддержки решения, а не результатами натурального сравнительного испытания четырёх одинаковых БАС. Исходные публикации проводились на разных аппаратных платформах и задачах. Поэтому таблица 4 показывает архитектурную целесообразность, а не метрологическое превосходство конкретного устройства.

Для проверки устойчивости результата веса каждого сценария в исходной исследовательской модели изменялись в пределах $\pm 20\%$ с последующей нормировкой; лидер каждого сценария сохранялся. Это указывает на устойчивость вывода к умеренному изменению приоритетов, но не устраняет необходимость натурной проверки базовых оценок архитектур.

Практические рекомендации

Результаты позволяют сформулировать общий принцип построения БАС с Edge AI для Казахстана: критические функции следует размещать максимально близко к БПЛА, а ресурсоёмкие и некритичные по времени задачи - переносить на наземную или облачную инфраструктуру. Иными словами, перспективна не одна «чистая» архитектура, а гибридное распределение функций.

Практически это означает следующее распределение функций. В сельском хозяйстве и при инспекции протяжённых объектов на борту целесообразно выполнять первичное обнаружение аномалий и геопривязку, а в облаке - обучение моделей и долгосрочную аналитику. При ЧС локально сохраняются поиск людей, обнаружение огня/дыма и навигация; несколько аппаратов могут объединять результаты на Ground/Collaborative Edge. В городе основную видеоаналитику можно переносить на наземный узел, оставляя на БПЛА функции безопасности. Для удалённой группы БПЛА необходим локальный резервный режим и распределённый обмен результатами, тогда как облако используется для подготовки моделей и послемиссионного анализа.

При выборе бортового вычислителя необходимо учитывать не только заявленную производительность в TOPS (Tera Operations Per Second), но и массу, потребляемую мощность, тепловой режим и влияние на продолжительность полёта. Современные серийные вычислительные платформы NVIDIA Jetson Nano, Xavier и Orin подтверждают практическую возможность выполнения алгоритмов искусственного интеллекта непосредственно на борту БПЛА, в том числе для обработки изображений, обнаружения и распознавания объектов [10-12]. Однако увеличение вычислительной мощности повышает требования к питанию и охлаждению. В свою очередь, перенос вычислений наружу также не является «бесплатным», поскольку радиомодем должен передавать

значительный поток данных и поддерживать устойчивый канал передачи данных от БПЛА к наземной станции.

Поэтому для дальнейших исследований в Республике Казахстан целесообразно разработать единую методику сравнительных испытаний различных вариантов размещения средств искусственного интеллекта. На одном БПЛА, с использованием одной камеры и одной нейронной сети, необходимо последовательно оценить обработку данных в облачной среде, на наземном вычислительном узле и непосредственно на борту БПЛА. Для группы аппаратов дополнительно может быть исследован вариант распределённой обработки данных.

В ходе испытаний следует измерять время от получения исходных данных до формирования результата, скорость передачи данных, производительность обработки изображений, потребляемую вычислительным оборудованием мощность, его температурный режим, расход энергии за полёт и влияние вычислительной нагрузки на продолжительность полёта.

Такие испытания позволяют перейти от сравнительных экспертных оценок к количественным показателям, полученным в единых экспериментальных условиях. Отдельно следует учитывать вопросы безопасности. Функции предотвращения столкновений, аварийного возврата и другие действия, связанные с безопасностью полёта, не должны полностью зависеть от доступности удалённого облака. При применении БПЛА вблизи людей и объектов критической инфраструктуры необходимо предусматривать контроль достоверности результатов, возможность их последующего анализа, а также возможность вмешательства оператора в процесс управления.

Заключение. В работе предложен упрощённый многокритериальный подход к выбору архитектуры Edge AI для беспилотных авиационных систем. Рассмотрены четыре уровня размещения интеллектуальной обработки: Cloud AI, Ground Edge AI, Onboard Edge AI и Collaborative Edge AI. Их сравнение выполнено по семи критериям: задержка, зависимость от связи, требуемая полоса передачи, энергетическая нагрузка, требования к бортовым ресурсам, автономность и масштабируемость.

Расчётная апробация для пяти сценариев Республики Казахстан показала, что выбор архитектуры зависит от условий задачи. Onboard Edge наиболее рационален для сельскохозяйственного мониторинга, инспекции протяжённых объектов и реагирования на ЧС; Ground Edge – для городской среды с развитой инфраструктурой; Collaborative Edge – для групповых задач на удалённых территориях. При этом облако сохраняет важную роль для обучения моделей, хранения данных и аналитики.

Основной практический вывод состоит в том, что перспективная БАС должна предусматривать гибкое распределение вычислительных задач между бортовыми, наземными и облачными средствами. При наличии устойчивого канала связи для обработки данных могут использоваться наземные и облачные вычислительные ресурсы.

При ухудшении качества связи приоритет следует отдавать обработке данных непосредственно на борту БПЛА или на доступных наземных вычислительных средствах. В случае потери внешней связи критически важные функции искусственного интеллекта, прежде всего связанные с безопасностью полёта и выполнением основных задач, должны сохранять работоспособность непосредственно на борту БПЛА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 McEnroe P., Wang S., Liyanage M. A Survey on the Convergence of Edge Computing and AI for UAVs: Opportunities and Challenges // IEEE Internet of Things Journal – 2022. – Vol. 9, No. 17. – P.15435-15459. DOI: 10.1109/IJOT.2022.3176400.

2 Ning Z., Hu H., Wang X., Guo L., Guo S., Wang G., Gao X. Mobile Edge Computing and Machine Learning in the Internet of Unmanned Aerial Vehicles: A Survey // ACM Computing Surveys – 2023. – Vol. 56, No. 1. – P. 1-31. DOI: 10.1145/3604933.

3 Dong C., Shen Y., Qu Y. 基于无人机的边缘智能计算研究综述 [A Survey of UAV-Based Edge Intelligent Computing] // 智能科学与技术学报 [Chinese Journal of Intelligent Science and Technology] –2020. – Vol. 2, No. 3. – P. 227-239.

4 Liu P., Lei J., Liu W. Unmanned Aerial Vehicle-Enabled Edge Computing: Architecture, Multiple Access and Computation Offloading // Systems Engineering and Electronics – 2024. – Vol. 46, No. 9. – P. 3198-3210. DOI: 10.12305/j.issn.1001-506X.2024.09.31.

5 Wang K., Cao T., Li X., Li H., Li M., Zhou M. A Survey on Trajectory Planning and Resource Allocation in Unmanned Aerial Vehicle-Assisted Edge Computing Networks // Journal of Electronics & Information Technology – 2025. –Vol. 47, No. 5. – P. 1266-1281. DOI: 10.11999/JEIT241071.

6 Об утверждении Концепции развития гражданской беспилотной авиации Республики Казахстан на 2025-2031 годы: постановление Правительства Республики Казахстан от 4 июня 2025 года № 412. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2500000412> (дата обращения: 14.09.2026).

7 Об утверждении Концепции развития искусственного интеллекта на 2024-2029 годы: постановление Правительства Республики Казахстан от 24 июля 2024 года № 592. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000592> (дата обращения: 14.09.2026).

8 Официальный информационный ресурс Премьер-Министра Республики Казахстан. – URL: <https://primeminister.kz/en/news/100-of-kazakhstans-population-to-be-provided-with-internet-access-by-2027-30633> (дата обращения: 14.09.2026).

9 Sun J., Lin H., Shi W., Xu W., Wang D. CF-mMIMO-Based Computational Offloading for UAV Swarms: System Design and Experimental Results // Electronics – 2025. – Vol. 14, No. 13. – Art. 2708. DOI: 10.3390/electronics14132708.

10 Lan Y., Lin S., Du H., Guo Y., Deng X. Real-Time UAV Patrol Technology in Orchard Based on the Swin-T YOLOX Lightweight Model // Remote Sensing – 2022. – Vol. 14, No. 22. Art. 5806. – DOI: 10.3390/rs14225806.

11 Koay H.V., Chuah J.H., Chow C.O., Chang Y.L., Yong K.K. YOLO-RTUAV: Towards Real-Time Vehicle Detection through Aerial Images with Low-Cost Edge Devices // Remote Sensing – 2021. – Vol. 13, No. 21. Art. 4196. DOI: 10.3390/rs13214196.

12 Jiang K., Tang T. 无人机实时目标检测与动态路径规划在边缘计算平台的应用 [Application of UAV Real-Time Object Detection and Dynamic Path Planning on an Edge Computing Platform] // Journal of Guilin University of Electronic Technology – 2025. – Vol. 45, No. 1. – P. 62–71.

13 Официальный информационный ресурс Премьер-Министра Республики Казахстан. – URL: <https://primeminister.kz/ru/news/uvelichit-urozhaynost-v-selskom-khozyaystve-putem-vnedreniya-tsifrovykh-tekhnologiy-namereny-v-kazakhstane> - 29670 (дата обращения: 14.09.2026).

14 МЧС Казахстана расширяет применение дронов и искусственного интеллекта. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/emer/press/news/details/1278345> (дата обращения: 14.09.2026).

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ БПЛА-РЕТРАНСЛЯТОРОМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ СЕТИ УКВ РАДИОСВЯЗИ

докторант, майор Зверев Н.Н.,
кандидат военных наук, доктор PhD,
ассоциированный профессор, старший
научный сотрудник Тойбазаров Д.О.
Национальный университет обороны РК,
город Астана, Республика Казахстан
магистр, начальник кафедры защиты
информации, полковник Гревцов А.В.
магистр технических наук, начальник
кафедры радиотехнических войск,
подполковник Калипанов М.М.
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи,
город Алматы, Республика Казахстан
директор департамента по НИОКР,
подполковник Кажыбаев К.С.
ТОО «R&D центр «Казахстан
инжиниринг»,
город Астана, Республика Казахстан

Аннотация. Предложен подход к интеллектуальному управлению пространственным положением БПЛА-ретранслятора УКВ диапазона по критерию доступности сети радиосвязи. Сформирована математическая модель, объединяющая оценку радиолиний, оптимизацию координат и возможность применения машинного обучения. Демонстрационный расчётный эксперимент показывает влияние высоты и горизонтального положения БПЛА-ретранслятора на минимальную индивидуальную доступность обслуживаемых радиолиний.

Ключевые слова: БПЛА; УКВ-ретранслятор; доступность сети; оптимизация положения; машинное обучение; радиосвязь.

Введение. Статья подготовлена и публикуется в рамках выполнения диссертационного исследования «Обоснование параметров и разработка малогабаритного ретранслятора УКВ диапазона для повышения доступности сети радиосвязи». Научные консультанты: Байсеитов Г.Н., Тойбазаров Д.О., Дюйсембеков О.А. Исследование также выполняется в рамках научной программы № ИРН АР261044/0224 «Разработка и создание аппаратуры передачи данных для беспилотного летательного аппарата лёгкого класса», руководитель Тойбазаров Д.О.

Использование беспилотных летательных аппаратов в качестве воздушных узлов связи позволяет оперативно изменять пространственную конфигурацию радиосети. В отличие от стационарного ретранслятора БПЛА имеет дополнительную управляемую степень свободы – его трехмерное положение. В фундаментальном обзоре Y. Zeng, Q. Wu и R. Zhang трехмерная мобильность рассматривается как одно из ключевых отличий организации связи с помощью БПЛА; при этом подчеркиваются особенности воздушно-наземных каналов, ограничения по массе, габаритам и энергопотреблению, а также необходимость совместного учета траектории и параметров связи [1].

Основная часть. Оптимизация положения воздушного узла стала самостоятельным направлением исследований. В обзоре I.A. Elnabty, Y. Fahmy и M. Kafafy проанализировано около 100 публикаций по оптимальному размещению БПЛА в сетях связи; авторы систематизируют целевые функции, модели воздушно-наземного канала, способы принятия решений, ограничения по энергии и взаимным помехам [2]. Это показывает, что положение БПЛА следует рассматривать не как заранее заданный параметр, а как переменную, непосредственно влияющую на характеристики сети.

Высота полёта БПЛА-ретранслятора является одним из основных параметров, влияющих на условия распространения радиосигнала и размеры зоны радиопокрытия. A. Al-Hourani, S. Kandeepan и S. Lardner исследовали влияние высоты низковысотной воздушной платформы на радиопокрытие и показали, что высота, обеспечивающая наибольшую зону радиопокрытия, зависит от допустимого уровня потерь сигнала и характеристик среды [3]. Следовательно, простое увеличение высоты БПЛА не всегда приводит к улучшению условий радиосвязи: с изменением высоты одновременно меняются вероятность прямой видимости и протяжённость трассы распространения радиосигнала.

Задача размещения БПЛА-ретранслятора обычно формулируется как задача оптимизации. Y. Hu, F. Zhang, T. Tian и D. Ma рассматривают размещение нескольких БПЛА ретрансляторов как нелинейную задачу с ограничениями; для определения числа и координат узлов используются минимальные охватывающие окружности и генетический алгоритм [4]. В их расчетном примере исследуется территория 40×40 км и показано, что положение ретрансляционных узлов существенно влияет как на покрытие наземных терминалов, так и на связность воздушной сети.

S.I. Han и J. Baek совместно рассматривают положение БПЛА ретрансляторов и распределение временного ресурса. Их модель направлена на повышение пропускной способности при одновременном обеспечении надежной передачи пользователям за пределами исходной зоны обслуживания наземной базовой станции [5]. Работа подтверждает, что задача позиционирования ретранслятора тесно связана с характеристиками отдельных радиолиний и распределением ресурсов.

H. Ren и соавторы совместно оптимизируют местоположение БПЛА и мощность передачи в системах ретрансляции с БПЛА с жесткими требованиями

по надежности и задержке, минимизируя вероятность ошибки декодирования [6]. Н. Shakhathreh рассматривает выбор пространственного положения одиночного воздушного ретранслятора с целью достижения максимальной суммарной пропускной способности сети. Для поиска оптимального положения применяется метод роя частиц с последующим распределением мощности [7]. Таким образом, результаты существующих исследований подтверждают обоснованность подхода, при котором пространственное положение БПЛА выбирается с учетом необходимости достижения наилучших показателей работы сети.

Следующий этап развития данного направления связан с применением методов машинного обучения. С. Liu и соавторы предложили подход к интеллектуальному управлению БПЛА-ретранслятором, при котором направление и величина его перемещения, а также мощность ретрансляции определяются с учетом качества радиоканала, уровня помех и текущего положения БПЛА. Для выбора управляющих решений авторами применены методы обучения с подкреплением Double Q-learning и Dueling DQN [8].

Zhang и соавторы исследуют применение БПЛА-ретранслятора для восстановления связи в аварийной ситуации и сравнивают традиционные методы оптимизации с алгоритмом глубокого обучения с подкреплением Soft Actor-Critic. Предложенный подход позволяет совместно определять траекторию движения БПЛА, порядок взаимодействия с пользователями и распределение мощности передачи. После предварительного обучения алгоритм способен оперативно формировать управляющие решения при изменении состояния сети и условий радиосвязи [9].

В опубликованной в 2026 году работе В. Li, J. Ding, Н. Li, J. Shi и X. Zuo положение БПЛА и распределение мощности представлены как марковский процесс принятия решений, а для их совместной адаптации применяется Soft Actor-Critic. Целевой функцией в этой работе является защищенная скорость двухсторонней ретрансляционной системы [10]. Это подтверждает актуальность перехода от разовых оптимизационных расчетов к адаптивной политике управления воздушным ретранслятором.

Вместе с тем перечисленные исследования преимущественно относятся к сотовым и широкополосным системам, а в качестве основных показателей рассматриваются пропускная способность, задержка передачи данных, вероятность ошибки, энергетическая эффективность и другие характеристики радиосвязи [2, 5-10]. В настоящей работе предлагается иной подход: применительно к малогабаритному БПЛА-ретранслятору УКВ диапазона основным критерием выбора его пространственного положения является доступность сети радиосвязи. Изменение координат и высоты полёта БПЛА рассматривается как способ улучшения условий связи с абонентами и повышения доступности сети в целом.

Рассматривается сеть из n наземных абонентов и одного БПЛА U , на котором установлен малогабаритный УКВ-ретранслятор. Бортовой комплекс включает ретрансляционное устройство, средства навигации, вычислительный

модуль и аппаратуру передачи данных легкого класса. Аппаратура передачи данных используется для получения телеметрии, обмена параметрами состояния системы и передачи команд управления, благодаря чему результаты научной программы ИРН AP261044/0224 естественно включаются в общую архитектуру интеллектуально управляемого ретранслятора.



Рисунок 1 – Функциональная архитектура интеллектуальной системы радиосвязи с применением БПЛА-ретранслятора

Для воздушно-наземной радиолинии в УКВ-диапазоне в качестве основного методического документа предлагается применять Рекомендацию ITU-R P.528-5. Она предназначена для прогнозирования основных потерь передачи для воздушной службы в диапазоне 100 МГц-30 ГГц; входными данными являются расстояние между антеннами, высоты терминалов, частота, поляризация и процент времени. Документ предусматривает расчеты для 1-99 % времени и отдельно указывает, что значения $L_b(95)$ могут использоваться для оценки зоны, в которой обслуживание обеспечивается в течение 95 % времени [11].

Для наземных участков сети и дополнительных контрольных расчетов применима ITU-R P.1546-6, предназначенная для прогнозирования распространения «точка-зона» в наземных службах в диапазоне 30-4000 МГц [12]. Таким образом, математическая модель будущих натурных исследований может быть построена на нормативных рекомендациях Международного союза электросвязи, а не на прямом переносе коэффициентов моделей, разработанных для других диапазонов.

Положение наземного абонента зададим: $S_i = (x_i, y_i, h_g)$, а положение БПЛА-ретранслятора: $U = (x, y, h)$.

Расстояние между БПЛА и i -м абонентом определяется как:

$$d_i(x, y, h) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (h - h_g)^2} \quad (1)$$

Для каждой радиолинии введём индивидуальную доступность

$$A_i(x, y, h) = P\{P_{r,i}(x, y, h) \geq P_{\min}\} \quad (2)$$

где: $P_{r,i}$ – уровень принимаемого сигнала, $P_{\min}$ – установленный проектный порог работоспособности радиолинии.

Для задачи оптимизации предлагается использовать робастный показатель:

$$P_{\text{дост}}(x, y, h) = \min_{i=1, \dots, n} A_i(x, y, h) \quad (3)$$

В данной формулировке $P_{\text{дост}}$ следует понимать как минимальную индивидуальную доступность среди обслуживаемых радиолиний, а не как вероятность одновременной независимой работоспособности всей совокупности каналов. Такой критерий специально ориентирует оптимизатор на наиболее неблагоприятного абонента и предотвращает ситуацию, когда высокий средний показатель достигается ценой ухудшения связи с одним из удаленных терминалов.

Тогда основная задача имеет вид

$$(x^*, y^*, h^*) = \arg \max_{(x, y, h) \in D} P_{\text{дост}}(x, y, h) \quad (4)$$

где D – множество допустимых положений БПЛА.

Множество D может учитывать ограничения: $x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$, $y_{\min} \leq y \leq y_{\max}$, $h_{\min} \leq h \leq h_{\max}$, $E_{\text{ост}} \geq E_{\text{рез}}$, а также зоны запрета, максимальное допустимое перемещение за один цикл управления и другие требования эксплуатации.

Если несколько точек обеспечивают практически одинаковое $P_{\text{дост}}$, целесообразно ввести дополнительный критерий, например минимизацию высоты или энергетической стоимости перемещения:

$$J = P_{\text{дост}} - \lambda_E C_E - \lambda_R C_R \quad (5)$$

где C_E и C_R – нормированные показатели энергетических затрат и требуемого перемещения соответственно;

λ_E и λ_R — весовые коэффициенты.

Практическая реализация таких расчетов возможна как на наземном пункте, так и на борту. В частности, официальные характеристики NVIDIA указывают для Jetson Nano 128 CUDA-ядер архитектуры Maxwell, 4 ГБ LPDDR4 и диапазон

мощности 5-10 Вт; современная Jetson Orin Nano 8GB обеспечивает до 67 TOPS при 8 ГБ LPDDR5 и диапазоне мощности 7-25 Вт. Raspberry Pi Compute Module 4 оснащается четырехъядерным Cortex-A72 1,5 ГГц и выпускается с 1-8 ГБ LPDDR4 [13-15].

Таблица 1 – Сравнительные характеристики вычислительных платформ для реализации интеллектуального управления БПЛА-ретранслятором

Платформа	Основные характеристики	Возможное применение
NVIDIA Jetson Nano	128 CUDA-ядер Maxwell, 4 ГБ LPDDR4, 5-10 Вт [13]	легкие нейронные сети, компьютерное зрение, прототипирование
NVIDIA Jetson Orin Nano 8GB	до 67 TOPS, 32 Tensor Cores, 8 ГБ LPDDR5, 7-25 Вт [14]	выполнение алгоритмов искусственного интеллекта на борту, более сложные модели, алгоритмы глубокого обучения с подкреплением
Raspberry Pi Compute Module 4	4× Cortex-A72 1,5 ГГц, 1-8 ГБ LPDDR4 [15]	управление, телеметрия, классические алгоритмы; для ресурсоёмких нейронных сетей целесообразно применение внешнего ускорителя

Предлагаемый алгоритм интеллектуального управления пространственным положением БПЛА-ретранслятора включает четыре последовательно выполняемых этапа (рисунок 2). На первом этапе осуществляется получение исходных данных, включающих координаты наземных абонентов, текущее положение БПЛА, параметры радиосредств, результаты оценки состояния радиолиний, а также сведения о состоянии БПЛА и располагаемом запасе энергии.

На втором этапе выполняется оптимизация пространственного положения БПЛА-ретранслятора. На основании исходных данных формируется допустимая область его размещения с учетом установленных ограничений. Для рассматриваемых положений БПЛА рассчитывается доступность радиосвязи с отдельными абонентами и определяется доступность сети в целом. По результатам расчетов выбираются координаты (x, y, h), обеспечивающие наибольшее значение доступности сети. Полученное решение проверяется с учетом ограничений безопасности полета и располагаемого запаса энергии. При относительно небольшом числе рассматриваемых положений может применяться их последовательный перебор, а при увеличении объема вычислений — генетический алгоритм, метод роя частиц или другие методы оптимизации. Подобные подходы ранее применялись при решении задач выбора пространственного положения БПЛА-ретрансляторов [4, 7].

На третьем этапе формируются управляющие команды для перемещения БПЛА в выбранное положение. На основании рассчитанных координат определяются необходимые параметры движения, включая направление, высоту и скорость, после чего соответствующие команды передаются системе управления БПЛА.

На четвертом этапе осуществляется перемещение БПЛА в заданное положение и повторная оценка состояния сети. После завершения перемещения

обновляются сведения о положении БПЛА, состоянии радиолиний и других параметрах сети. Если произошедшие изменения требуют нового выбора пространственного положения ретранслятора, цикл расчета повторяется. Таким образом, положение БПЛА-ретранслятора может адаптироваться к изменению конфигурации сети и условий радиосвязи, обеспечивая поддержание максимально возможного в текущих условиях уровня доступности сети.

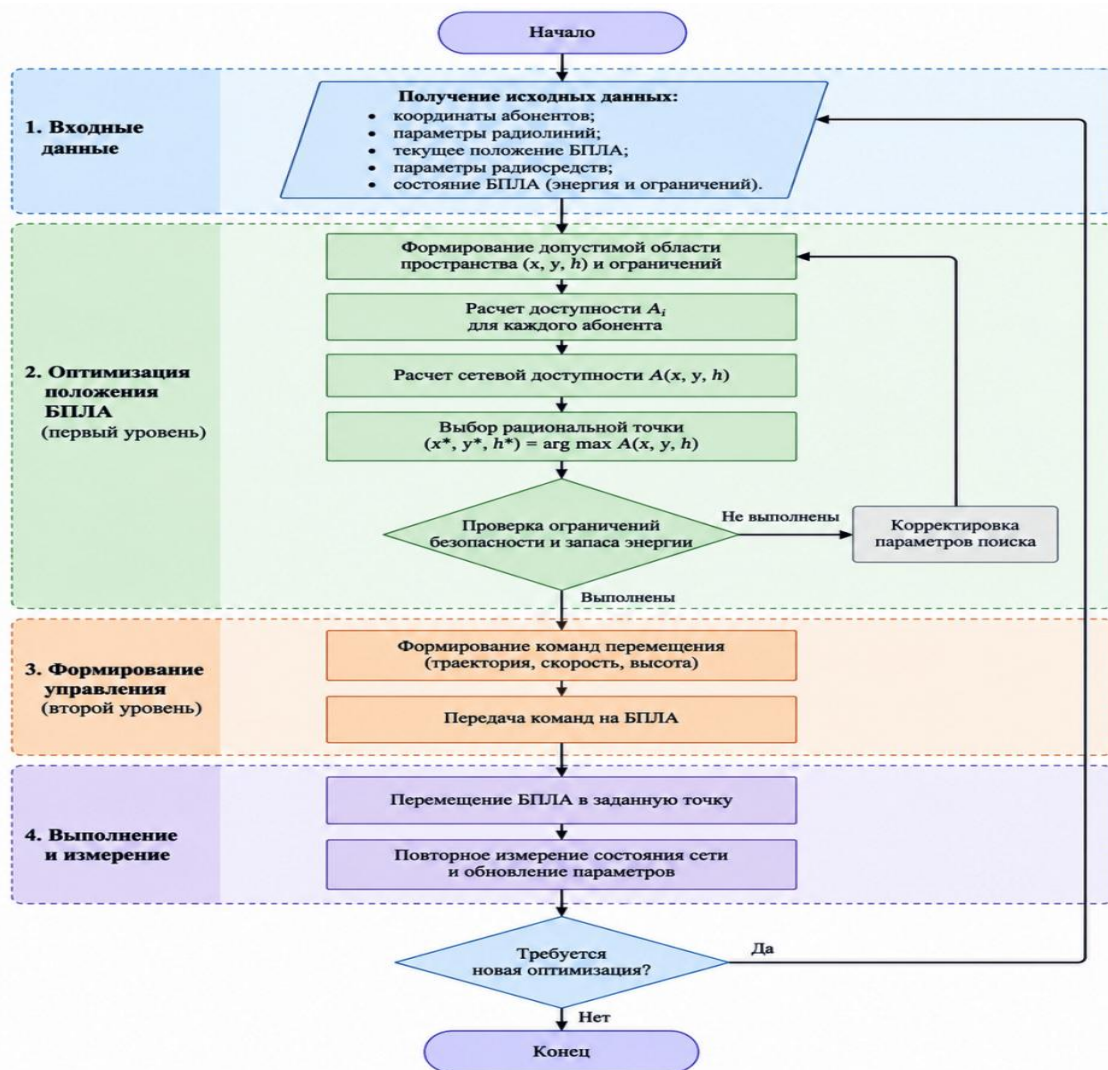


Рисунок 2 – Алгоритм интеллектуального управления пространственным положением БПЛА-ретранслятора

Дальнейшее развитие предлагаемого алгоритма связано с применением методов машинного обучения на этапе оптимизации пространственного положения БПЛА-ретранслятора. Результаты оптимизационных расчётов, а в дальнейшем и данные натурных испытаний могут использоваться для формирования обучающей выборки. Такой подход позволяет использовать результаты математического моделирования и экспериментальных исследований для последующего обучения модели, способной оперативно определять рациональное положение БПЛА при изменении конфигурации сети и условий радиосвязи.

Одним из вариантов применения машинного обучения в предлагаемой системе является обучение с учителем, при котором модель обучается на наборе расчётных примеров с заранее известными рациональными положениями БПЛА-ретранслятора. Для формирования такой обучающей выборки задаются различные конфигурации сети, после чего для каждой из них с использованием разработанной математической модели и алгоритма оптимизации определяется положение БПЛА (x^*, y^*, h^*) , обеспечивающее максимальное значение принятого критерия доступности. В результате каждому состоянию сети (S) ставится в соответствие рассчитанное рациональное положение БПЛА. На сформированной совокупности таких пар выполняется обучение модели, предназначенной для последующего оперативного определения рекомендуемых координат БПЛА без выполнения полного перебора допустимых положений:

$$(x^*, y^*, h^*) = F\theta(S), \quad (6)$$

где $F\theta$ – обученная модель;

S – совокупность данных о текущем состоянии сети и БПЛА;

x^*, y^*, h^* – рекомендуемые координаты БПЛА-ретранслятора. По мере проведения натурных испытаний обучающая выборка может дополняться экспериментальными данными, что позволит учитывать особенности реальных радиолиний.

При наличии подвижных абонентов и более динамичном изменении условий радиосвязи целесообразно применение обучения с подкреплением. В этом случае решение о перемещении БПЛА принимается последовательно с учетом текущего состояния сети и результатов ранее выполненных действий. Состояние системы s_t может включать координаты абонентов, измеряемые показатели качества радиолиний, текущее положение БПЛА и располагаемый запас энергии. Управляющее действие определяется изменением его пространственного положения:

$$a_t = (\Delta x_t, \Delta y_t, \Delta h_t). \quad (7)$$

При этом основным критерием принятия решения остается введенный ранее показатель доступности сети $P_{\text{дост}}$. Функцию вознаграждения целесообразно формировать таким образом, чтобы увеличение доступности сети повышало оценку принятого решения, а дополнительные энергетические затраты, значительные перемещения БПЛА и приближение к установленным ограничениям – снижали её:

$$R_t = P_{\text{дост},t} - \lambda E CE_t - \lambda R CR_t - \lambda C CC_t, \quad (8)$$

где $P_{\text{дост},t}$ – доступность сети после выполнения управляющего действия;

CE_t , CR_t и CC_t – нормированные показатели энергетических затрат, величины перемещения и приближения к установленным ограничениям соответственно;

λE , λR и λC – весовые коэффициенты.

Возможность применения обучения с подкреплением для управления БПЛА-ретрансляторами подтверждается результатами современных исследований. В работе Liu и соавторов при формировании управляющих решений учитываются показатели качества радиосвязи и положение БПЛА, а управляющие действия предусматривают изменение параметров его перемещения и мощности ретрансляции [8]. Zhang и соавторы применяют глубокое обучение с подкреплением для выбора траектории БПЛА-ретранслятора в изменяющихся условиях [9]. В работе Li и соавторов положение БПЛА и параметры передачи также рассматриваются как изменяемые характеристики системы, а для принятия последовательных управляющих решений применяется алгоритм обучения с подкреплением Soft Actor-Critic [10].

При этом применение методов машинного обучения не должно исключать предусмотренные алгоритмом ограничения безопасности полёта. Рекомендуемое моделью положение БПЛА должно находиться в пределах допустимой области D , введённой в выражении (4). Ограничения по высоте полёта, разрешённым районам перемещения, располагаемому запасу энергии и другим установленным условиям должны проверяться независимо от результата работы модели машинного обучения. При невыполнении хотя бы одного из ограничений сформированное решение отклоняется и выполняется повторный выбор допустимого положения БПЛА.

Таким образом, методы искусственного интеллекта в предлагаемой системе используются для повышения оперативности выбора пространственного положения БПЛА-ретранслятора по критерию доступности сети радиосвязи, тогда как непосредственное выполнение перемещения и контроль установленных ограничений осуществляются системой управления БПЛА.

Для оценки работоспособности предлагаемого подхода проведён демонстрационный расчётный эксперимент, позволяющий исследовать влияние пространственного положения БПЛА-ретранслятора на доступность сети УКВ-радиосвязи и проверить алгоритм выбора его координат. Расчёт не предназначен для определения предельной дальности конкретного образца ретранслятора и не заменяет последующие натурные испытания.

В качестве исходного сценария рассматривается условный район размером 80×80 км, в пределах которого расположены шесть наземных абонентов. Их координаты заданы исключительно для проведения модельных расчётов и не соответствуют реальному району или действующей сети радиосвязи. Рабочая частота принята равной 150 МГц, что соответствует области применения Рекомендации ITU-R P.528-5, используемой в настоящей работе в качестве методической основы расчёта воздушно-наземных радиолиний [11]. Основные исходные данные приведены в таблице 2.

Значения $L_{max} = 114$ дБ и $\sigma = 6$ дБ в данном эксперименте приняты в качестве сценарных параметров и не характеризуют конкретный образец разрабатываемого ретранслятора. Их использование необходимо для проверки работы предлагаемого алгоритма и исследования влияния пространственного положения БПЛА на расчётный показатель доступности. При переходе к экспериментальной проверке данные значения должны быть уточнены по результатам определения энергетического бюджета и статистических характеристик реальных радиолиний.

Таблица 2 – Исходные данные расчётного эксперимента

Параметр	Значение
Рабочая частота	150 МГц
Размер расчётного района	80 × 80 км
Число наземных абонентов	6
Координаты наземных абонентов	(5; 8), (10; 68), (18; 15), (25; 22), (62; 72), (77; 10)
Высота антенн наземных абонентов	2 м
Рассматриваемые высоты БПЛА	50, 75, 100, 150, 200 м
Максимально допустимые потери в радиолинии L_{max}	114 дБ
Стандартное отклонение σ , принятое для расчётного сценария	6 дБ
Шаг перебора горизонтальных координат БПЛА	0,5 км

Для формирования демонстрационной поверхности доступности используется сокращённая модель распространения радиосигнала. Потери в свободном пространстве определяются выражением:

$$LFS,i = 32,44 + 20 \lg f_{\text{МГц}} + 20 \lg di, \text{ км.} \quad (9)$$

где: $f_{\text{МГц}}$ – рабочая частота, МГц; $di, \text{ км}$ – пространственное расстояние между БПЛА и i – м наземным абонентом, определяемое по выражению (1).

Применение свободно-пространственной составляющей в демонстрационной модели соответствует общей физической логике расчёта трасс в пределах радиогоризонта. Вместе с тем Рекомендация ITU-R P.528-5 предусматривает существенно более сложную процедуру прогнозирования, учитывающую различные механизмы распространения радиоволн [11]. Поэтому выражение (9) используется только для демонстрации работы алгоритма и не рассматривается как замена полного расчёта по ITU-R P.528-5.

Для приближённой оценки границы радиогоризонта используется эффективный радиус Земли:

$$ae = 9257 \text{ км.} \quad (10)$$

При высотах антенн hg и h , выраженных в километрах, приближённое расстояние радиогоризонта определяется как:

$$dh = \sqrt{(2aehg)} + \sqrt{(2aeh)} \quad (11)$$

Для демонстрационного учёта ухудшения условий распространения при выходе трассы за радиогоризонт введена дополнительная расчётная составляющая

$$Lex,i = \alpha \max(0, d_{ground,i} - dh), \quad (12)$$

где $d_{ground,i}$ – горизонтальное расстояние от проекции БПЛА до i -го абонента;

$\alpha = 0,8$ дБ/км – условно принятый коэффициент демонстрационной модели.

Значение α не является параметром Рекомендации ITU-R P.528-5 и введено исключительно для формирования расчётной поверхности, содержащей переход между более и менее благоприятными условиями распространения. В последующих исследованиях выражение (12) должно быть заменено полным программным расчётом по ITU-R P.528-5.

Суммарные расчётные потери для i -й радиолинии определяются как:

$$Li = LFS,i + Lex,i. \quad (13)$$

Для моделирования изменчивости условий распространения вводится случайная составляющая:

$$\varepsilon i \sim N(0, \sigma^2), \quad (14)$$

а запас относительно максимально допустимых потерь определяется выражением

$$Mi = L_{max} - Li. \quad (15)$$

При принятом нормальном распределении случайной составляющей условие работоспособности радиолинии, заданное выражением (2), позволяет представить индивидуальную доступность в виде:

$$Ai = \Phi(Mi / \sigma), \quad (16)$$

где $\Phi(\cdot)$ – функция распределения стандартной нормальной случайной величины.

Таким образом, для каждой рассматриваемой точки (x, y, h) последовательно рассчитываются потери Li , индивидуальные значения

A_i , после чего по выражению (3) определяется $P_{\text{дост}}(x, y, h) = \min A_i(x, y, h)$. Перебор допустимых положений БПЛА с шагом 0,5 км позволяет определить координаты, соответствующие максимуму критерия (4).

В качестве примера рассмотрим высоту БПЛА $h = 75$ м. В результате перебора горизонтальных координат максимальное значение принятого критерия получено в точке $(x^*, y^*) = (40; 35)$ км.

Для шестого абонента с координатами (77; 10) км горизонтальное расстояние до проекции БПЛА составляет:

$$d_{\text{ground},6} = \sqrt{(77 - 40)^2 + (10 - 35)^2} = 44,65 \text{ км.}$$

При высоте антенны наземного абонента 2 м и высоте БПЛА 75 м расчётное расстояние радиогоризонта по выражению (11) составляет приблизительно $dh = 43,35$ км.

В рамках принятой сокращённой модели суммарные потери для данной радиолинии составляют $L_6 \approx 110,00$ дБ, а соответствующий запас относительно принятого порогового значения $M_6 = 114 - 110,00 = 4,00$ дБ.

Следовательно, $A_6 = \Phi(4,00 / 6) \approx 0,747$.

Поскольку в рассматриваемой точке шестая радиолиния имеет минимальное значение индивидуальной доступности среди шести абонентов, в соответствии с выражением (3) $P_{\text{дост}} \approx 0,747$. Результаты полного перебора сетки для рассматриваемых высот приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты оптимизации пространственного положения БПЛА-ретранслятора

Высота БПЛА, м	x^* , км	y^* , км	$P_{\text{дост}}^*$	Среднее A_i	$P_{\text{дост}}$ в геометрическом центре
50	40,0	35,0	0,403	0,609	0,146
75	40,0	35,0	0,747	0,831	0,444
100	40,0	35,0	0,800	0,853	0,735
150	40,0	35,0	0,800	0,853	0,755
200	40,0	35,0	0,800	0,853	0,755

Расчёт по формулам (9)-(16) показал, что оптимальная точка (40;35) км сохраняется для всех рассмотренных высот координаты оптимальной точки (40; 35) км для всех рассмотренных высот. При высоте 50 м выбор положения БПЛА по критерию (4) увеличивает минимальную индивидуальную доступность радиолиний с 0,146 для геометрического центра координат абонентов до 0,403 в найденной точке. При высоте 75 м соответствующее значение увеличивается с 0,444 до 0,747. При высоте 100 м различие уменьшается: 0,735 в геометрическом центре и 0,800 в найденной точке.

При высотах 100, 150 и 200 м максимальные значения ($P_{\text{дост}}$) после округления до трёх знаков совпадают и составляют 0,800; без округления получены соответственно 0,799588; 0,799587 и 0,799585. Незначительное снижение связано с увеличением пространственного расстояния после

исчезновения для критических радиолиний введённой в демонстрационной модели загоризонтной добавки.

Полученные значения относятся исключительно к рассматриваемому синтетическому сценарию и не являются характеристиками разработанного малогабаритного УКВ-ретранслятора.

Результаты демонстрационного расчёта показывают два характерных эффекта. При малой высоте БПЛА изменение его горизонтального положения существенно влияет на наиболее неблагоприятную радиолинию, вследствие чего размещение ретранслятора в геометрическом центре координат абонентов не обеспечивает максимального значения принятого критерия. При увеличении высоты с 50 до 100 м расчётная доступность возрастает, тогда как дальнейшее увеличение высоты до 150-200 м в принятой модели практически не изменяет максимальное значение $P_{\text{дост}}$.

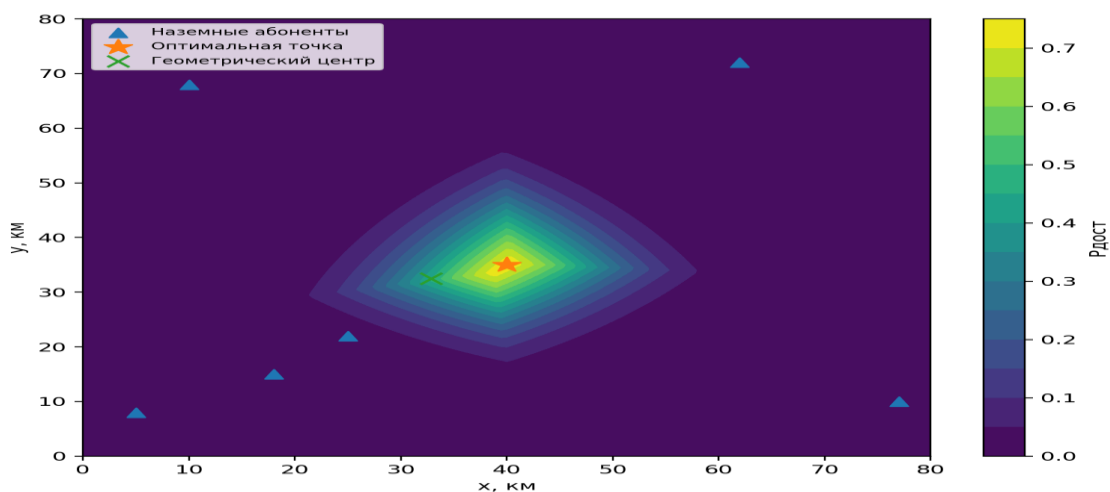


Рисунок 3 – Расчётное поле доступности сети $P_{\text{дост}}(x, y)$ при высоте БПЛА 75 м

На рисунке 3 треугольниками показаны наземные абоненты, звездой – найденное оптимальное положение БПЛА, крестом – геометрический центр координат абонентов.

Таким образом, выбор положения БПЛА-ретранслятора не должен сводиться к его подъёму на максимально возможную высоту. Более обоснованным является совместный выбор координат x, y и h по критерию доступности сети с последующим учётом энергетических затрат и величины требуемого перемещения в соответствии с выражением (5).

Полученный результат соответствует общему выводу рассмотренных ранее исследований о том, что рациональное пространственное положение воздушного ретранслятора определяется совокупностью геометрических параметров и характеристик радиоканала [3, 5, 7]. Вместе с тем используемые в этих работах модели распространения и критерии оптимизации не должны непосредственно переноситься на рассматриваемую УКВ-систему, что обуславливает необходимость последующего использования полного расчёта по ITU-R P.528-5 и экспериментальной проверки.

Основным ограничением проведённого расчётного эксперимента является использование сокращённой модели распространения радиосигнала. В настоящей работе она предназначена для проверки математической постановки задачи и алгоритма выбора пространственного положения БПЛА, а не для получения окончательных характеристик реальной радиосети. При дальнейших исследованиях сокращённая модель должна быть заменена полным расчётом воздушно-наземных радиолиний по ITU-R P.528-5 [11], а при необходимости оценки наземных участков сети - расчётами по ITU-R P.1546-6 [12-15].

Следующим этапом является экспериментальная проверка разработанного подхода. При проведении натурных испытаний необходимо одновременно фиксировать пространственные координаты и высоту БПЛА, измеряемые показатели состояния радиолиний, факт устойчивого установления радиосвязи, состояние канала передачи данных, а также энергетические параметры БПЛА. Полученные данные позволят уточнить параметры модели доступности, сопоставить расчётные и экспериментальные результаты и сформировать исходные данные для последующего применения методов машинного обучения.

Особое значение имеют сценарии с изменяющимся положением абонентов. В этом случае ранее выбранные координаты БПЛА могут перестать обеспечивать максимальное значение $R_{\text{дост}}$. Предлагаемый алгоритм предусматривает повторную оценку состояния сети и новый выбор положения БПЛА, что соответствует замкнутому циклу управления, представленному на рисунке 2. Применение обучения с подкреплением в дальнейшем может сократить время поиска рационального положения за счёт использования результатов предыдущих состояний и управляющих действий [8–10].

Заключение. В работе сформулирован подход к интеллектуальному управлению пространственным положением БПЛА-ретранслятора УКВ диапазона, в котором основным критерием выбора координат является доступность сети радиосвязи. В отличие от рассмотренных исследований, ориентированных преимущественно на пропускную способность, задержку передачи данных, вероятность ошибки и энергетическую эффективность, предлагаемая постановка непосредственно ориентирована на повышение минимальной индивидуальной доступности обслуживаемых радиолиний.

Разработанная математическая модель объединяет расчёт характеристик отдельных воздушно-наземных радиолиний, определение показателя $R_{\text{дост}}$, поиск рационального трёхмерного положения БПЛА и возможность последующего применения методов машинного обучения. Предлагаемый алгоритм реализует последовательный цикл получения исходных данных, оптимизации положения БПЛА, формирования управляющих команд, перемещения и повторной оценки состояния сети.

Проведённый демонстрационный расчёт подтверждает работоспособность предложенной логики выбора пространственного положения. Для рассмотренного синтетического сценария максимальное значение принятого критерия достигается в точке (40; 35) км. Увеличение высоты БПЛА от 50 до 100 м сопровождается существенным ростом расчётного значения доступности,

тогда как дальнейшее увеличение высоты до 150–200 м в принятой модели практически не изменяет максимальное значение $P_{\text{дост}}$. Полученные результаты относятся только к заданному расчётному сценарию и не рассматриваются как характеристики реального образца ретранслятора.

Дальнейшее развитие исследования предусматривает переход к полному программному расчёту по ITU-R P.528-5, уточнение энергетических и статистических параметров радиолиний по результатам натурных испытаний, учёт фактических характеристик разрабатываемого малогабаритного УКВ-ретранслятора и аппаратуры передачи данных, а также формирование на основе расчётных и экспериментальных данных обучающей выборки. Это позволит использовать методы искусственного интеллекта для оперативного выбора пространственного положения БПЛА при сохранении физически обоснованного расчёта доступности сети и независимого контроля ограничений безопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Zeng Y., Wu Q., Zhang R. Accessing From the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and Beyond // Proceedings of the IEEE – 2019. – Vol. 107, No. 12. – P. 2327-2375. – DOI: 10.1109/JPROC.2019.2952892.

2 Elnabty I.A., Fahmy Y., Kafafy M. A survey on UAV placement optimization for UAV-assisted communication in 5G and beyond networks // Physical Communication – 2022. – Vol. 51. Article 101564. – DOI: 10.1016/j.phycom.2021.101564

3 Al-Hourani A., Kandeepan S., Lardner S. Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage // IEEE Wireless Communications Letters – 2014. – Vol. 3, No. 6. – P. 569-572. – DOI: 10.1109/LWC.2014.2342736.

4 Hu Y., Zhang F., Tian T., Ma D. Placement optimisation method for multi-UAV relay communication // IET Communications – 2020. – Vol. 14, No. 6. – P. 1005-1015. – DOI: 10.1049/iet-com.2019.0518.

5 Han S.I., Baek J. Optimal UAV Deployment and Resource Management in UAV Relay Networks // Sensors – 2021. – Vol. 21, No. 20. Article 6878. – DOI: 10.3390/s21206878.

6 Ren H., Pan C., Wang K., Xu W., Elkashlan M., Nallanathan A. Joint Transmit Power and Placement Optimization for URLLC-enabled UAV Relay Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology – 2020. – Vol. 69, No. 7. – P. 8003-8007. – DOI: 10.1109/TVT.2020.2992736

7 Shakhathreh H. Efficient Placement of an Aerial Relay Drone for Throughput Maximization // Wireless Communications and Mobile Computing – 2021. – Article 5589605. DOI: 10.1155/2021/5589605.

8 Liu C., Zhang Y., Niu G., Jia L., Xiao L., Luan J. Towards reinforcement learning in UAV relay for anti-jamming maritime communications // Digital Communications and Networks – 2023. – Vol. 9, No. 6. – P.1477-1485. DOI: 10.1016/j.dcan.2022.08.009.

9 Zhang C., Li X., He C., Li X., Lin D. Trajectory optimization for UAV-enabled relaying with reinforcement learning // Digital Communications and Networks – 2025. – Vol. 11, No. 1. – P.200-209. DOI: 10.1016/j.dcan.2023.07.006.

10 Li B., Ding J., Li H., Shi J., Zuo X. Joint optimization of resource and position for UAV secure two-Way relay systems using reinforcement learning // Physical Communication – 2026. – Vol. 75. Article 103004. DOI: 10.1016/j.phycom.2026.103004.

11 ITU-R Recommendation P.528-5. A propagation prediction method for aeronautical mobile and radionavigation services using the VHF, UHF and SHF bands. Geneva: International Telecommunication Union [Электронный ресурс]. – 2021. – URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.528-5-202109-I> (дата обращения: 17.09.2026).

12 ITU-R Recommendation P.1546-6. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz. Geneva: International Telecommunication Union [Электронный ресурс]. – 2019. – URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1546-6-201908-I> (дата обращения: 17.09.2026).

13 NVIDIA. Jetson Nano - Technical Specifications. – URL: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano> (дата обращения: 17.09.2026).

14 NVIDIA. Jetson Orin - Technical Specifications. – URL: <https://www.nvidia.com/en-gb/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-orin/> (дата обращения: 17.09.2026).

15 Raspberry Pi Ltd. Compute Module 4 - Specification. – URL: <https://www.raspberrypi.com/products/compute-module-4/> (дата обращения: 17.09.2026).

РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОГО МЕТОДА К МОНИТОРИНГУ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

к.т.н., ассоц. профессор (доцент),
подполковник гражданской
защиты Захаров И.А.,
к.т.н., ассоц. профессор (доцент),
полковник гражданской защиты
Альменбаев М.М.,
к.т.н., ассоц. профессор (доцент),
полковник гражданской защиты
Кусаинов А.Б.
Академия гражданской защиты
им. М.Габдуллина МЧС РК,
г. Кокшетау, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассматривается применение беспилотных летательных аппаратов для оперативного обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Обоснована необходимость оптимизации маршрута БПЛА для сокращения времени прибытия в зону возгорания и повышения эффективности получения информации о распространении пожара. Представлен алгоритм построения оптимального маршрута БПЛА с учетом заданных условий полета и выбранного критерия оптимизации.

Ключевые слова: лесной пожар, мониторинг, прогнозирование, маршрут, беспилотный летательный аппарат,

Введение. Лесные пожары представляют собой серьезный природный риск, вызывающий экономические потери, гибель людей и значительный ущерб окружающей среде. Во всем мире проводятся исследования по разработке методов и устройств для обнаружения и последующего мониторинга лесных пожаров. Для решения этих задач наиболее распространенными являются системы дистанционного обнаружения и мониторинга пожаров как наземного (подвижные или стационарные), воздушного (беспилотные летательные аппараты, самолеты и вертолеты), так и спутникового базирования. Эти системы обладают высокой эффективностью сбора данных и обнаружения пожаров, но ограничены относительно небольшими территориями [1].

В реальности лесные пожары могут охватывать большие территории, в результате чего известные подходы мало пригодны для оптимального пространственного покрытия. Перспективным путем решения этой проблемы является использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оказавшихся эффективными благодаря своей маневренности, позволяющей

реализовать дистанционное получение информации в любом направлении, выбор стратегии построения маршрута полета и т.д. Таким образом, они представляют недорогую альтернативу известным подходам для обнаружения и мониторинга в реальном времени территории лесного пожара.

Основная часть. При применении БПЛА для мониторинга лесных пожаров одной из приоритетных задач является сокращение времени их прибытия к зоне возгорания и обеспечение оперативного получения информации о масштабах распространения пожара. Для этого требуется определить оптимальную траекторию движения БПЛА с учётом заданных условий полёта [2].

С целью решения поставленной задачи разработан алгоритм построения оптимального маршрута БПЛА (рисунок 1) [3-5]. Алгоритм позволяет определить наиболее эффективную последовательность перемещения БПЛА от исходной точки до заданной зоны мониторинга с учётом выбранного критерия оптимизации.

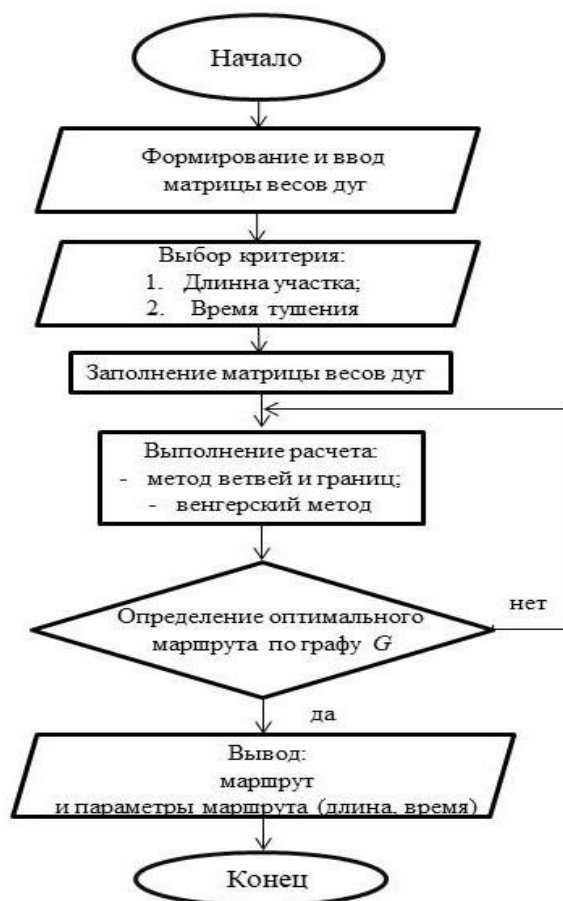


Рисунок 1 – Алгоритм определения оптимального маршрута полета БПЛА для мониторинга лесного пожара

На первом этапе осуществляется формирование графа исследуемой территории и ввод исходных данных. Территория, по которой планируется движение БПЛА, представляется в виде множества вершин и соединяющих их дуг. Вершины графа соответствуют возможным точкам нахождения БПЛА, а

дуги – допустимым участкам его перемещения между данными точками. При этом учитываются координаты стартовой позиции БПЛА и расположение зоны лесного пожара.

На втором этапе формируется матрица весов дуг. Для каждой пары взаимосвязанных вершин определяется стоимость перемещения между ними. В зависимости от поставленной задачи в качестве весового параметра может использоваться длина участка маршрута или время, необходимое для его прохождения. Таким образом, один и тот же граф может использоваться для решения различных вариантов задачи оптимизации маршрута.

На третьем этапе осуществляется выбор критерия оптимизации. В представленном алгоритме предусмотрены два основных критерия: минимизация общей длины маршрута и минимизация времени достижения зоны пожара. Выбор критерия зависит от целей мониторинга. Если основным требованием является сокращение расхода энергии аккумулятора, целесообразно использовать критерий минимальной длины маршрута. В случае необходимости максимально быстрого прибытия БПЛА к очагу пожара приоритетным становится критерий минимального времени полёта.

На четвёртом этапе выполняется заполнение матрицы весов дуг с учётом выбранного критерия. Каждому допустимому направлению движения присваивается соответствующее значение. Участки, прохождение которых невозможно или связано с недопустимыми условиями полёта, исключаются из дальнейшего рассмотрения либо получают соответствующий запретный вес.

После формирования исходных данных выполняется расчёт оптимального маршрута. Согласно представленному алгоритму, на данном этапе могут применяться методы ветвей и границ и венгерский метод. Использование алгоритмов оптимизации позволяет последовательно анализировать возможные варианты перемещения между вершинами графа и определять наиболее эффективную последовательность точек движения БПЛА.

Метод ветвей и границ позволяет сократить количество рассматриваемых вариантов за счёт исключения маршрутов, которые заведомо не могут обеспечить более оптимальное решение по сравнению с уже найденными вариантами. Это особенно важно при увеличении количества вершин графа, поскольку прямой перебор всех возможных маршрутов приводит к значительному увеличению вычислительных затрат.

Венгерский метод может применяться при соответствующей постановке задачи распределения или сопоставления участков маршрута между заданными точками. При использовании данного метода матрица весов последовательно преобразуется таким образом, чтобы определить наиболее выгодное соответствие между исходными и конечными точками.

После выполнения расчёта осуществляется проверка полученного решения. На данном этапе определяется, найден ли допустимый оптимальный маршрут по заданному графу. Если оптимальное решение не получено, выполняется возврат к этапу расчёта и повторная обработка исходных данных. Такой цикл

продолжается до получения допустимого маршрута, удовлетворяющего заданному критерию оптимальности.

При получении положительного результата выполняется вывод параметров маршрута. В результате работы алгоритма определяется последовательность вершин графа, через которые должен пройти БПЛА от исходной точки до района лесного пожара. Дополнительно рассчитываются основные характеристики полученного маршрута, в частности его общая длина и время прохождения.

Заключение. Полученный маршрут далее может быть преобразован в набор навигационных точек и передан в систему управления. БПЛА осуществляет движение по рассчитанной траектории до достижения зоны лесного пожара, после чего выполняет мониторинг заданной территории.

Предложенный алгоритм может использоваться не только для первоначального планирования полёта, а также при поступлении новой информации о распространении пожара, изменении погодных условий или возникновении препятствий матрица весов может быть обновлена, после чего выполняется повторный расчёт маршрута. Это позволяет реализовать динамическое изменение траектории БПЛА в процессе мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Захаров И.А., Альменбаев М.М., Кусаинов А.Б., Макишев Ж.К., Қайыргелді Н.Қ. Анализ лесных пожаров и подверженность к ним территории Республики Казахстан, математико-статистическое прогнозирование лесопожарной обстановки // Наука и образование в гражданской защите – 2025. – №2 (58). – С. 46-52.

2 И.А. Захаров, М.М. Альменбаев, А.Б. Кусаинов, Ж.К. Макишев Разработка алгоритма рационального выбора БПЛА для лесопожарного мониторинга // Научно-образовательный журнал «Вестник Академии Национальной гвардии Республики Казахстан» – 2025. – №3 (сентябрь) (57). – С.89-94.

3 Топольский, А.А.Атюкин, А.В.Мокшанцев [и др.]. Графовая модель оптимизации обследования объектов при предупреждении и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Труды 21-й Международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем». – Москва: РГГУ, 2013. – С. 112-115.

4 Кусаинов, А. Б. Управление лесопожарным риском : монография / А. Б. Кусаинов. – Кокшетау: Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан, 2024. – 138 с.

5 Богуш РП., Тычко Д.А. Алгоритм комплексного обнаружения дыма и пламени на основе анализа данных систем видеонаблюдения // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники –2015. – № 6 (92). – С. 63-71.

РАБОТА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ПО РАДИО И РАДИОРЕЛЕЙНЫМ И ЭЛЕКТРО - ПРОВОДНЫМ, КАНАЛАМ СВЯЗИ

начальник цикла, подполковник запаса
Истимесов М.Б.
Карагандинский технический
университет имени Абылкаса Сагинова,
город Караганда, Республика Казахстан

Аннотация. В условиях отсутствия покрытия мобильной сети и невозможности использования цифровых каналов связи по причине удаленности или технических ограничений возникает необходимость организации дистанционного управления технологическими процессами. Одним из решений является применение устройств, способных передавать команды по проводным, радио- и радиорелейным каналам связи с использованием тональных сигналов DTMF. Такая технология отличается простотой, надежностью и устойчивостью к внешним воздействиям.

Ключевые слова: передатчик сигнала, абоненты, оповещение населения, приемное устройство, каналы связи

Введение. Использование DTMF сигналов для передачи управляющих команд остаётся востребованным инструментом в гражданской и военной инфраструктуре. Простота реализации, устойчивость к перебоям связи и возможность применения в условиях ограниченной цифровой инфраструктуры делают такие решения актуальными как для коммунального хозяйства, так и для систем гражданской обороны.

Историческая справка:

– первые системы передачи управляющих сигналов по телефонным линиям появились в середине XX века. В 1960-е годы был разработан стандарт DTMF (Dual Tone Multi Frequency), позволивший управлять телефонными станциями и автоматизировать набор номеров;

– в 1970-е и 1980-е годы DTMF стал активно применяться в системах дистанционного управления – от банковских сервисов («телебанкинг») до управления охранными сигнализациями;

– в постсоветском пространстве аналоговые каналы связи долгое время оставались основным средством управления и оповещения, особенно в военной и коммунальной сферах;

– сегодня, несмотря на распространение цифровых технологий, DTMF сохраняет актуальность в условиях ограниченной инфраструктуры, где требуется простое и надежное решение.

Гражданские области применения:

- управление системами водоснабжения и насосными станциями в сельских районах;
- дистанционное включение систем оповещения населения при чрезвычайных ситуациях;
- управление дорожными табло и светофорами в местах с ограниченным доступом к цифровым сетям.
- контроль систем охраны и сигнализации на удалённых объектах.

Основная часть. Пример из практики: В случае стихийных бедствий или аварийных ситуаций оперативное оповещение населения и служб гражданской защиты может быть организовано через простые устройства, принимающие DTMF-сигналы и включающие световые табло, сирены или громкоговорители [1, 2].

Это позволяет сократить время реакции и обеспечить надежное доведение информации до ответственных лиц и подразделений. В качестве примера в виду того, что воинские части порой располагаются в местах недосягаемости мобильной сети связи можем организовать управление устройством оповещения, установленным в местах несения дежурства должностными лицами, отвечающих за оповещение личного состава по определенным сигналам.

В целях сокращения времени для организации оповещения подчиненных воинских частей и подразделений рассмотрим один из вариантов доведения сигналов на приведения части в повышенную степень боевой готовности, а именно дистанционное управления световыми табло, установленными у дежурных по частям, оперативных дежурных, начальников сокращенных боевых расчетов и в подразделениях.

За пример была взята организация системы оповещения, которая стояла на вооружении ВС СССР так называемая система «Шнур» П-161ОК, но с добавлением функций управления умными приспособлениями по типу умного дома.

Принцип работы системы оповещения основан на дистанционном управлении (выключении и включений) табло оповещений как по линиям связи, так и по каналу тональной частоты (рисунок 1).

Рассмотрим конкретный пример: у оперативного дежурного имеется громко говорящая связь с всеми дежурными по частям, подразделениям, начальниками дежурных расчетов, дежурными по подразделениям и как правило это обычные каналы, то есть оперативный дежурный может вызывать абонентов циркулярном режиме, наша система оповещения подключается к каналам где подключены аппараты громко говорящей связи параллельно, не оказывая никакого влияния на качество канала (соединения) и при срабатывания системы оповещения кроме визуального будет по каналом связи проходит звуковой сигнал (короткий «БИП»), пульт включения (шифратор сигнала) и один комплект приемного устройства управления (дешифратор сигнала) подключается у оперативного дежурного который выбирая любую из команд на пульте, выполняет её для всех

абонентов у которых подключены приемные устройства системы оповещения [3].

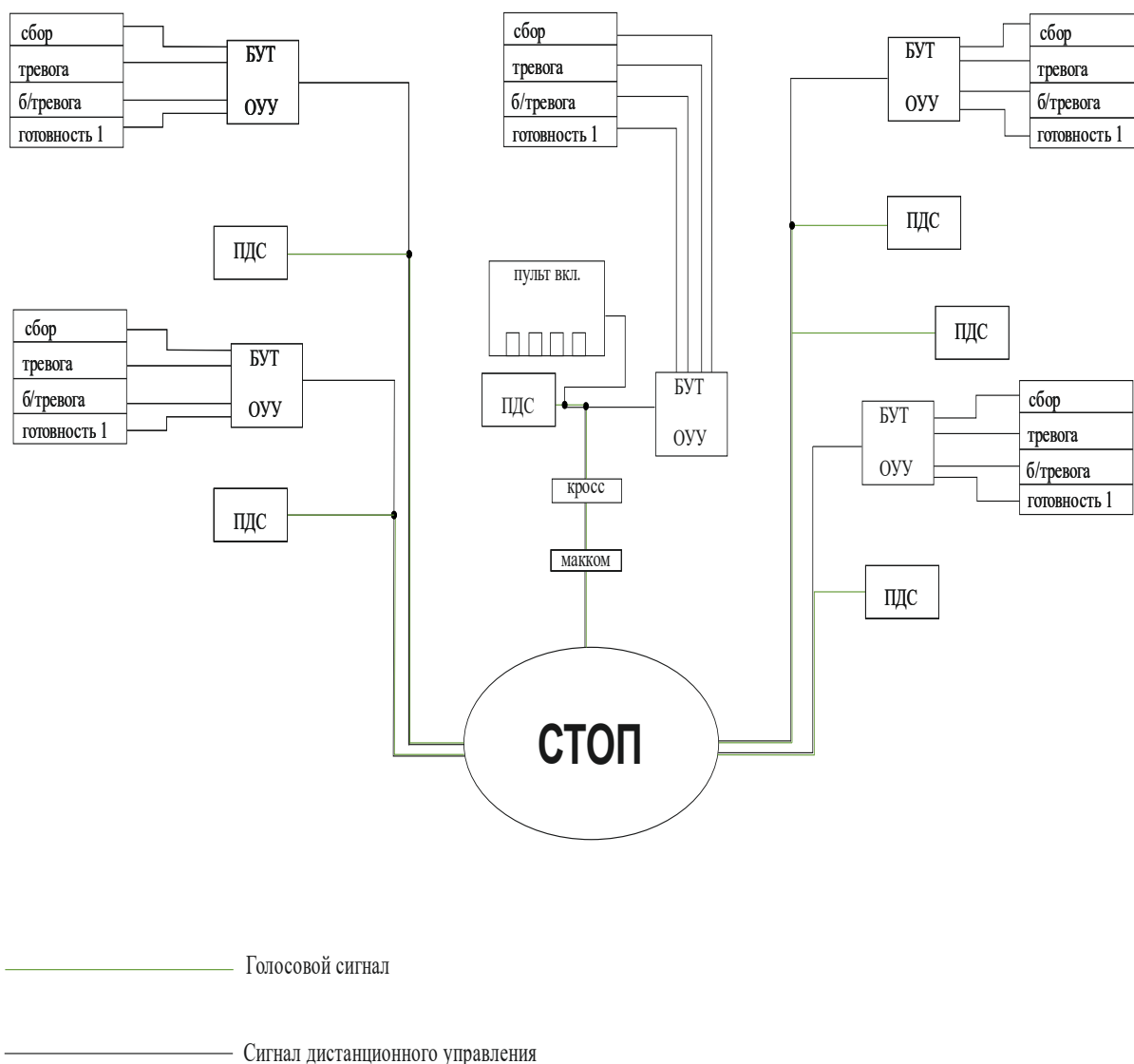


Рисунок 1– Структурная схема организации повешения подразделений дистанционным включением табло светового табло

В случае увеличения абонентов сети оповещения потребуется на объекте установить приемное устройство сигнала подключенных к сетевому табло отображения сигналов на приведения части повышенной степени боевой готовности.

Само приемное устройство управления табло подключается к каждому включателю параллельно на специально выведенные клеммы, это позволит производит включения как от включателя, так и от самой системы оповещения, что обеспечивает возможность включения световых табло оперативным дежурным дистанционно для всех войсковых частей (подразделений) так и

отработку вопроса тренировки подразделений индивидуально с включением табло подчиненным дежурным (рисунок 2).

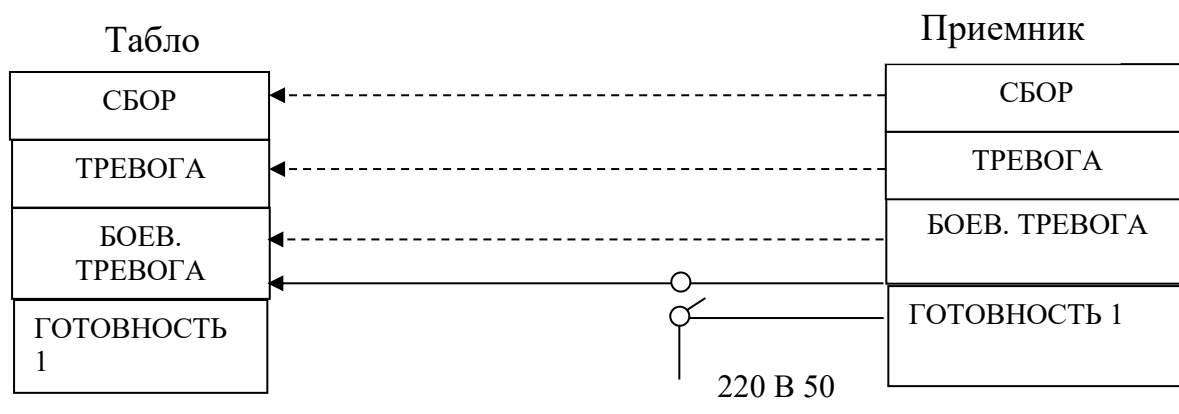


Рисунок 2 – Структурная схема подключения приемника DTMF к сетевому табло оповещения

В основу устройства оповещения положен принцип тонального набора номера в обыкновенном телефонном аппарате, так называется метод DTMF (двухтональный многочастотный аналоговый сигнал, используемый для набора телефонного номера), он основан на передаче каждого номера двумя фиксированными частями одновременно, что повышает уровень помехозащиты от любых воздействий в телефонном канале (линий) (таблица 1).

Таблица 1 – Деление частот в номеронабирателе телефонного аппарата (кнопочного)

частота	1209 Гц	1336 Гц	1477 Гц	1633 Гц
697 Гц	1	2	3	A
770 Гц	4	5	6	B
852 Гц	7	8	9	C
941 Гц	*	0	#	D

Конкретно для нашего устройства мы будем использовать цифры 1,2,3,4,5 где:

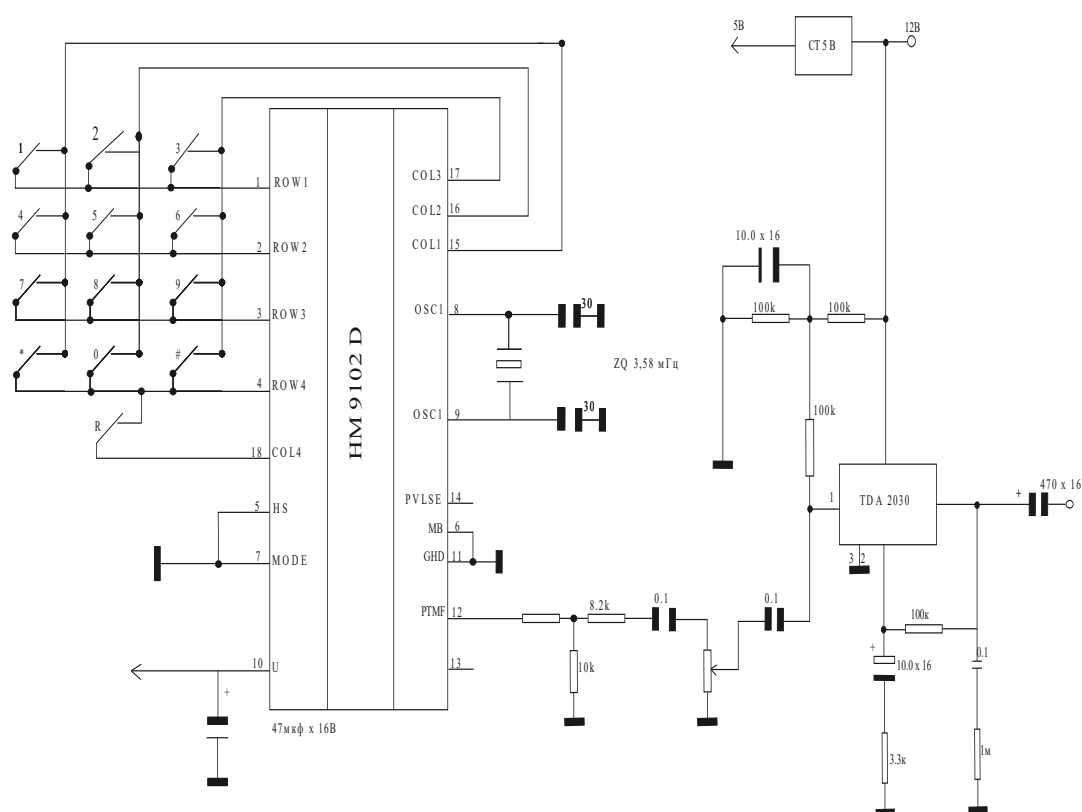
- 1 – Готовность № 1
- 2 – Сбор.
- 3 – Тревога.
- 4 – Боевая тревога.
- 5 – Сброс.

Как мы ранее уже говорилось само устройство собрано из двух составляющих это передатчик (шифратор) и приемник (дешифратор).

Рассмотрим работу передатчика, устанавливаемого у оперативного дежурного (рисунок 3).

Передатчик сигнала собран на микросхеме HM 9102D, в основе которой лежит формирования двухчастотных сигналов при нажатии определенных кнопок, затем сигнал усиливается на низкочастотном усилителе собранным на базе микросхемы TDA 2030 для подачи в линию сигнала с нулевым уровнем.

Принципиальная схема передатчика DTMF:



Принципиальная схема приемника DTMF:

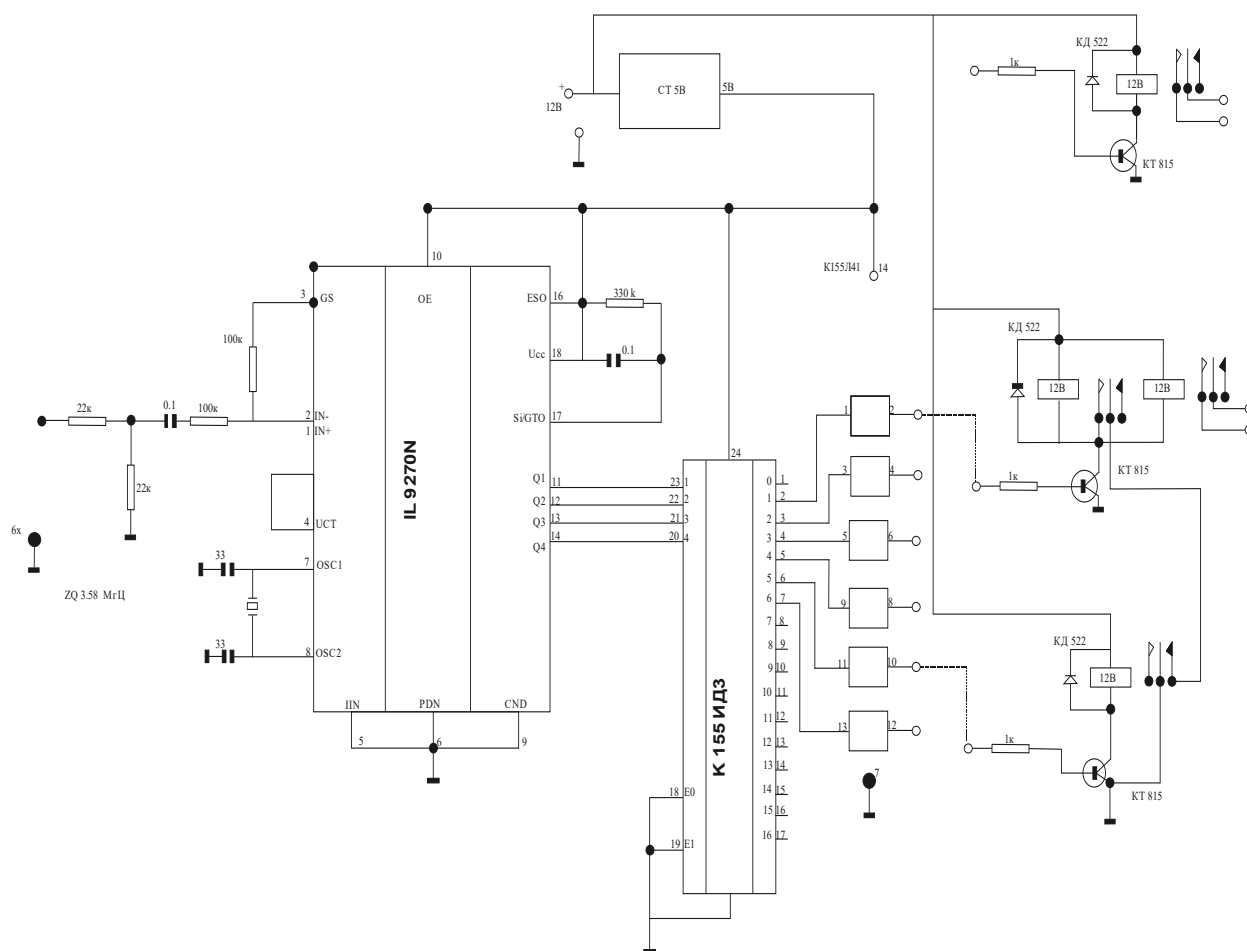


Рисунок 3 – Принципиальная схема передатчика DTMF

Уровень сигнала необходимого для передачи по каналу связи команды для срабатывания исполнительного устройства в приемнике. Передатчик подключается к каналу связи параллельно любому устройству громкоговорящей связи.

Рассмотрим работу приемника, установленного у абонентов дежурных по частям и подразделениям (рисунок 4).

Приемник сигнала собран на микросхеме КР 1008 ВЖ 18 и представляет собой декодер сигналов двух тональных частот. В двоичном коде полученный сигнал подается на дешифратор собранный на базе К155 ИДЗ.

На выходе микросхемы К155 ИДЗ после принятого сигнала от передатчика команды с нулевым уровнем сигнала, для того чтобы устройство срабатывало (срабатывали ключи) подающие команды для включения команды на табло, нам необходимо на вход транзистора КТ 815 подать высокий уровень сигнала для этого в схему была включена микросхема К155 ЛН1 которая является инвертором сигнала, то есть нулевой уровень полученный от микросхемы К155 ИДЗ переходит в высокий уровень сигнала.

Исполнительные устройства (ключи) собраны на базе транзисторов КТ815 с напряжением 12В на реле.

Закключение. Поскольку сигнал «Готовность № 1» может быть подан одновременно с любым другим сигналом на табло, исполнительное устройство этого сигнала (ключа) собрана с самоблокировкой другие же команды при переходе в другие степени боевой готовности сбрасываются при нажатии на передатчике следующей команды. Команда «Сброс» предназначена для сброса всех команд одновременно со всех табло.

Блок приемника так же, как и блок передатчика устанавливается параллельно устройству громкоговорящей связи [4].

Таким образом, данная технология отличается простотой, надежностью и устойчивостью к внешним воздействиям, что позволяет успешно применять её в качестве универсального решения для удаленного мониторинга и телеуправления территориально распределенными объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Винокуров В.М. Сети связи и системы коммутации : учебное пособие / В. М. Винокуров. – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2012. – 304 с.

2 Осипов, А.С. Устройство детектирования и декодирования DTMF-сигналов // Информационные технологии и системы 2023 (ИТС 2023): материалы Международной научной конференции, Минск, 22 ноября 2023 г. – Минск: БГУИР, 2023. – С. 109–110.

3 Гольденберг, Л. М. Цифровая обработка сигналов : учебное пособие для вузов / ЛМ. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва .: Радио и связь, 1990. – 256 с.

4 Промышленные технологические радиосети обмена данными / составитель А.В. Баранов. – Москва.: Линк, 2018. – 192 с.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА «БАРС-РОЙ» НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ РОЕВЫМ АТАКАМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

директор департамента по НИОКР,
подполковник Кажыбаев К.С.
ТОО «R&D центр «Казахстан инжиниринг»,
город Астана, Республика Казахстан
аспирант, Академия государственного
управления при Президенте КР
имени Ж. Абдрахманова,
город Бишкек, Республика Кыргызстан

Аннотация. В статье рассматривается проблема противодействия групповым (роевым) атакам беспилотных летательных аппаратов на основе технологий искусственного интеллекта. Актуальность темы обусловлена массовым применением ударных и разведывательных дронов в современных вооружённых конфликтах, прежде всего в ходе боевых действий на территории Украины, где обе стороны применяют беспилотники как одно из основных средств поражения и разведки. Целью работы является разработка концептуальной архитектуры программно-аппаратного комплекса «Барс-Рой», объединяющего многоканальное обнаружение целей, нейросетевую классификацию, анализ роевого поведения и эшелонированную систему поражения.

На основе анализа открытых данных о боевом применении украинских систем Sky Fortress, Bravel, Contra Drone и российских комплексов «Волнорез», «Кобра», а также зарубежных разработок NATO STO и рамочной модели DRONEWALLS, предложены пятиуровневая архитектура комплекса и алгоритм его функционирования. Показано, что применение искусственного интеллекта позволяет сократить время реакции системы и снизить стоимость перехвата одной цели. Рассмотрены организационно-правовые и этические ограничения применения автономных систем поражения, а также возможности использования подобных комплексов для охраны государственной границы и противодействия незаконному обороту наркотиков в Кыргызстане и Казахстане.

Ключевые слова: искусственный интеллект, беспилотные летательные аппараты, роевые атаки, противодроновые системы, радиоэлектронная борьба, сенсорное слияние, охрана государственной границы, специальная военная операция.

Введение. Статья подготовлена в рамках проекта программно-целевого финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан ИРН BR 249015/0224 «Создание инновационного

комплексного продукта в дроновой индустрии с использованием передовых технологий искусственного интеллекта».

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) за последние годы превратилось из вспомогательного средства разведки в самостоятельный вид вооружения, во многом определяющий ход современных боевых действий. Наиболее показательным примером такого превращения выступает вооружённый конфликт на территории Украины. По имеющимся оценкам, к 2025 году около 90 процентов ударов сил обороны Украины наносится с применением беспилотников, а производственные мощности украинской оборонной промышленности по выпуску дронов за три года выросли в десятки раз [1]. Аналогичная динамика наблюдается и со стороны Вооружённых сил Российской Федерации, которые массово применяют ударные FPV-дроны и барражирующие боеприпасы, а также развивают собственные средства противодействия беспилотникам противника, такие как комплекс радиоэлектронной борьбы «Волнорез» [2] и автоматизированные зенитно-пулёмётные установки с искусственным интеллектом [3].

Массовое применение недорогих беспилотников создаёт для обороняющейся стороны проблему, которую принято называть асимметрией издержек. Стоимость беспилотника типа Shahed-136 (в российской версии, «Герань-2») оценивается открытыми источниками примерно в 20-30 тысяч долларов США [4], тогда как стоимость ракеты современного зенитного ракетного комплекса, применяемой для перехвата одной такой цели, может достигать миллиона долларов [5]. Такое соотношение делает атаки массированными дешёвыми беспилотниками экономически выгодными для наступающей стороны и вынуждает обороняющуюся сторону искать более дешёвые способы обнаружения и поражения целей.

Ответом на эту проблему стало появление гибридных систем противодействия беспилотным летательным аппаратам (Counter-UAS), сочетающих недорогие сенсоры (акустические, радиочастотные, оптико-электронные) с алгоритмами искусственного интеллекта, способными автоматически обнаруживать, классифицировать и сопровождать цели без постоянного участия оператора. Украинская акустическая сеть Sky Fortress, объединяющая порядка 14 тысяч постов стоимостью от 400 до 1000 долларов за единицу, позволяет обнаруживать до 20 процентов воздушных целей по акустическому каналу, дополняя работу радиолокационных станций [6, 7]. Такое решение существенно снижает совокупную стоимость системы предупреждения по сравнению с традиционными радиолокационными комплексами [8].

Аналогичные вызовы актуальны и для государств Центральной Азии, включая Кыргызскую Республику и Республику Казахстан. Протяжённые и труднодоступные участки государственной границы, а также рост технической доступности коммерческих беспилотников создают риски их использования для контрабанды, в том числе для незаконного оборота наркотических средств, ведения несанкционированной разведки объектов критической инфраструктуры и иных противоправных целей. В этой связи изучение опыта применения

комплексов противодействия БПЛА в зоне боевых действий и адаптация подобных технических решений к задачам охраны границы и объектов критической инфраструктуры Кыргызстана и Казахстана представляет самостоятельный научный и практический интерес.

Несмотря на значительное число отдельных технических решений, в открытой литературе недостаточно представлены комплексные архитектурные модели, объединяющие в единый программно-аппаратный контур обнаружение, классификацию, анализ роевого поведения и разнородные средства поражения. Рамочная модель DRONEWALLS фиксирует фрагментарность существующих исследований: обнаружение, анализ и нейтрализация угроз чаще всего изучаются изолированно друг от друга [9]. Это определяет научный пробел (research gap), на восполнение которого направлено настоящее исследование.

Целью исследования является разработка концептуальной архитектуры программно-аппаратного комплекса на основе технологий искусственного интеллекта для противодействия одиночным и роевым атакам беспилотных летательных аппаратов, применимого как в условиях вооружённого конфликта, так и для охраны государственной границы и объектов критической инфраструктуры в мирное время.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) проанализировать открытые данные о боевом применении систем противодействия БПЛА обеими сторонами вооружённого конфликта на Украине, а также зарубежных (НАТО, ЕС) разработках в данной области;
- 2) выявить общие технические и организационные требования к перспективным комплексам противодействия роевым атакам;
- 3) разработать структурную архитектуру и алгоритм функционирования программно-аппаратного комплекса «Барс-Рой»;
- 4) провести сравнительную оценку ожидаемой эффективности предложенного решения относительно существующих аналогов;
- 5) определить правовые, этические и организационные ограничения применения автономных систем поражения, а также перспективы использования подобных комплексов в интересах безопасности Кыргызской Республики и Республики Казахстан.

Методологическую основу исследования составили сравнительный анализ и метод кейс-стади, применённые к открытым материалам о боевом применении систем противодействия БПЛА за период 2023-2026 годов. В качестве источников использовались публикации профильных изданий, сообщения официальных представителей министерств обороны Украины и Российской Федерации, аналитические доклады исследовательских центров (Center for European Policy Analysis, NATO Science and Technology Organization), а также материалы рецензируемых научных изданий по проблематике противодействия беспилотным системам (Counter-UAS).

Для разработки архитектуры комплекса применялся системный подход, предполагающий последовательную декомпозицию задачи противодействия БПЛА на уровни обнаружения, слияния данных, анализа, принятия решения и

поражения. При построении алгоритма функционирования использовалась модель управленческого цикла OODA (наблюдение, ориентация, решение, действие), адаптированная под задачи автоматизированного противодействия беспилотникам.

Оценка ожидаемой эффективности предложенного решения проводилась методом экспертного сравнения количественных показателей (дальность обнаружения, время реакции, ориентировочная стоимость перехвата), приводимых в открытых источниках для аналогичных систем, без проведения натурных испытаний. Это определяет предварительный, концептуальный характер полученных результатов. Такой подход соответствует практике описания проектных решений на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, когда количественные показатели формулируются как целевые, подлежащие последующей опытной проверке.

Основная часть. Анализ открытых источников позволяет выделить три группы технических решений в области противодействия беспилотным летательным аппаратам, применяемых участниками современных вооружённых конфликтов и союзными им организациями: решения украинской стороны, решения российской стороны и разработки государств НАТО и Европейского союза.

Опыт украинской стороны.

Одним из наиболее известных технических решений украинской стороны является акустическая сеть раннего предупреждения Sky Fortress, созданная инициативной группой инженеров в рамках оборонного кластера Brave1. Система строится на основе недорогих акустических датчиков, устанавливаемых на столбах на высоте около двух метров и обученных распознавать характерный звук двигателя беспилотников типа Shahed-136/«Герань-2» и крылатых ракет [6]. По данным открытых источников, сеть насчитывает порядка 14 тысяч постов, а стоимость одного поста составляет от 400 до 1000 долларов США [6, 7]. Акустический канал обеспечивает дальность обнаружения до 5-7 километров и, по имеющимся оценкам, позволяет отслеживать до 20 процентов целей, входящих в воздушное пространство Украины, что особенно важно в условиях, когда традиционные радиолокационные станции не всегда фиксируют низколетящие цели [7, 8].

Наряду с сетью акустического обнаружения украинская сторона развивает направление автономных турелей и дронов-перехватчиков с элементами искусственного интеллекта. Турели с автоматическим обнаружением, сопровождением и расчётом траектории вражеского БПЛА уже применяются для «малой» противовоздушной обороны на линии фронта в рамках инициативы Brave1 [10]. Демонстрационные испытания перехватчика P1-Sun, использующего искусственный интеллект для наведения на дроны типа «Шахед», показали способность системы автоматически обнаруживать, сопровождать и наводиться на цель, снижая нагрузку на оператора и ускоряя реакцию противовоздушной обороны [11]. Украинская компания Contra Drone представила комплексную архитектуру защиты, объединяющую более 20

отдельных решений, включая скоростной автономный перехватчик Pease Duck и наземную платформу радиоэлектронной борьбы Nuvexa, что подтверждает общий тренд на интеграцию разнородных средств в единый контур управления [12].

Опыт российской стороны.

Со стороны Вооружённых сил Российской Федерации основной акцент сделан на средствах радиоэлектронного подавления каналов управления и навигации беспилотников. Комплекс «Волнорез», испытания которого начались на форуме «Армия-2023», представляет собой модульную систему постановки радиопомех конусообразной формы с магнитным креплением к бронетехнике, рассчитанную на несколько частотных диапазонов одновременно [4]. По сообщениям профильных изданий, применение «Волнореза» позволило защитить тяжёлую огнётную систему ТОС-1А «Солнцепёк» от серии атак FPV-дронов [13]. Развитием данного направления стал комплекс «Кобра», предназначенный для обнаружения операторов вражеских FPV-дронов по излучению пульта управления [14].

Отдельное направление составляют автоматизированные зенитно-пулемётные установки с искусственным интеллектом и оптико-электронным прицелом, испытания которых проводились в октябре 2025 года. Такая установка, оснащённая баллистическим вычислителем, самостоятельно обнаруживает, сопровождает и поражает воздушные цели без непосредственного участия оператора в цикле наведения [3]. В совокупности перечисленные решения показывают, что обе стороны конфликта развивают технологически близкие по назначению средства (от пассивного обнаружения до автоматизированного поражения), что подтверждает общий, а не односторонний характер проблемы противодействия беспилотным системам.

Международный опыт (НАТО, Европейский союз) (таблица 1).

Зарубежные исследовательские организации также развивают концепции комплексного противодействия роевым атакам. Рамочная модель DRONEWALLS, опубликованная в рецензируемом издании ScienceDirect, структурирует задачу противодействия беспилотникам в три последовательных фазы: обнаружение (радиочастотный, радиолокационный и акустический каналы), анализ и принятие решения (слияние данных, вычисления на периферийных устройствах в реальном времени) и нейтрализация с учётом правовых и этических ограничений [9]. Организация НАТО по науке и технологиям (NATO STO) представила экспериментальную систему BlueSwarm, объединяющую наземный и воздушный сегменты для автоматического обнаружения, сопровождения и нейтрализации роя беспилотников с помощью группы дронов-перехватчиков; работоспособность системы подтверждена модельными и полевыми испытаниями [15].

Аналитический доклад Центра европейского политического анализа (СЕРА), посвящённый урокам вооружённого конфликта на Украине для НАТО, отмечает, что даже наиболее совершенные современные системы противовоздушной обороны не способны эффективно нейтрализовать крупные

рои беспилотников или залповые атаки барражирующих боеприпасов, что требует многоэшелонированного сочетания кинетических и некинетических средств поражения на всех рубежах, от переднего края до узлов управления в тылу [16]. В сентябре 2025 года Европейский союз инициировал программу создания единой системы противодействия беспилотникам вдоль восточной границы (инициатива «дроновая стена»), что подтверждает признание проблемы на общеевропейском политическом уровне [9].

Таблица 1 – Сравнительная характеристика существующих систем противодействия БПЛА

Комплекс	Сторона / организация	Принцип обнаружения	Роль искусственного интеллекта	Ориентировочная стоимость	Ключевое ограничение
Sky Fortress	Украина (Brave1)	Акустический (сеть постов)	Классификация звуковых сигнатур целей	400-1000 \$ за пост [6, 7]	Снижение дальности при сильном ветре и городском шуме
ИИ-турель Brave1	Украина (Brave1)	Опτικο-электронный + баллистика	Автосопровождение и расчёт траектории цели	Не раскрывает [10]	Ограничена дальностью прямой видимости
Contra Drone (Peace Duck и др.)	Украина (Fly Group)	Комплексный (более 20 решений)	Автономный перехват, РЭБ-подавление пультов	Не раскрывает [12]	Сложность интеграции разнородных подсистем
«Волнорез»	Российская Федерация	РЭБ (подавление частотных каналов)	Автоматическое обнаружение рабочего диапазона	Не раскрывает [2]	Не действует против автономных БПЛА без канала связи
«Кобра»	Российская Федерация	Радиопеленгация пульта оператора	Определение местоположения расчёта FPV	Не раскрывает [14]	Требуется активного излучения пульта управления
ЗПУ с ИИ («Калашников»)	Российская Федерация	Опτικο-электронный + баллистика	Автономное обнаружение, сопровождение, поражение	Не раскрывает [3]	Ограниченная дальность стрелкового вооружения
BlueSwarm	НАТО (STO)	Комплексный (наземный + воздушный сегмент)	Групповое управление роём перехватчиков	Экспериментальный образец [15]	Стадия испытаний, не развёрнута массово
DRONE WALLS / «дроновая стена»	НАТО / ЕС	Многоканальный (РЛС, РЧ, ЭО/ИК, акустика)	Периферийные вычисления, слияние данных	Программа в разработке с 2025 г. [9]	Требуется унификации протоколов между странами

Архитектура предлагаемого комплекса «БАРС-РОЙ»

На основе анализа существующих решений (раздел 4) предложена концептуальная архитектура программно-аппаратного комплекса «Барс-Рой»,

состоящая из пяти функциональных уровней: обнаружения, слияния данных, анализа средствами искусственного интеллекта, поддержки принятия решения и поражения (нейтрализации). Структурная схема комплекса представлена на рисунке 1.

Уровень обнаружения объединяет разнородные сенсоры, дополняющие друг друга по дальности и условиям применения: сеть акустических постов (по аналогии с Sky Fortress), радиолокационную станцию малой дальности, радиочастотные пеленгаторы для обнаружения каналов управления и навигации БПЛА, а также оптико-электронные и тепловизионные камеры для визуального подтверждения цели в тёмное время суток и при плохой видимости. Такое сочетание сенсоров соответствует подходу, описанному в модели DRONEWALLS, где устойчивость системы обеспечивается именно за счёт многоканальности обнаружения, а не за счёт одного самого совершенного датчика [9].

Уровень слияния данных (Data Fusion Engine) выполняет нормализацию сигналов различных сенсоров, их временную синхронизацию и геопривязку к единой системе координат. Данный модуль устраняет типичный недостаток разрозненных систем противодействия БПЛА, при котором каждый датчик работает независимо и требует отдельного оператора: объединение потоков данных в единое пространство целей позволяет сформировать общую картину воздушной обстановки в реальном времени.



Рисунок 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса «Барс-Рой» (составлено автором)

Уровень анализа искусственным интеллектом включает два взаимодополняющих модуля. Нейросетевой классификатор целей (на основе свёрточных нейронных сетей или трансформерной архитектуры) определяет тип

и предположительную модель воздушного объекта, его курс, скорость и вероятную боевую нагрузку, отличая, например, ударный барражирующий боеприпас от разведывательного квадрокоптера или гражданского объекта. Модуль анализа роевого поведения, построенный на графовых нейронных сетях (Graph Neural Network, GNN), обрабатывает связи между несколькими одновременно обнаруженными целями и прогнозирует траекторию и динамику роя в целом, а не отдельного аппарата. Необходимость подобного модуля обусловлена тем, что классические алгоритмы сопровождения одиночных целей теряют эффективность при одновременной атаке 10-20 беспилотников, запускаемых волнами, что фиксируется как типичная тактика обеих сторон конфликта на Украине.

Уровень поддержки принятия решения формирует приоритизированный список целей и рекомендации по распределению средств поражения, интегрируясь с автоматизированной системой управления войсками (АСУВ). Принципиальным элементом архитектуры является сохранение человека в контуре управления (human-in-the-loop) на этапе принятия решения о применении средств поражения, что обусловлено требованиями международного гуманитарного права и рассматривается подробно в настоящей статье.

Таблица 2 – Целевые технические характеристики комплекса «Барс-Рой» (расчётные значения)

Параметр	Целевое значение	Основание оценки
Дальность акустического обнаружения	до 5-7 км	по аналогии с Sky Fortress [8]
Дальность РЛС / РЧ-пеленгации	2-5 км	обобщённые данные по малогабаритным РЛС и РЧ-датчикам [17]
Дальность ЭО/ИК-сопровождения	1-2 км	зависит от оптики и условий освещённости [17]
Дальность кинетического перехвата	до 500 м	по аналогии с автономными перехватчиками типа Peace Duck [12]
Время реакции системы (обнаружение-целеуказание)	менее 10 секунд	расчётное значение при автоматизации уровней I-IV
Ориентировочная стоимость одного акустического поста	400-1000 \$	по данным Sky Fortress [6, 7]
Ориентировочная стоимость кинетического перехватчика	около 3 тыс. \$	оценка по аналогии с недорогими FPV-перехватчиками

Уровень поражения (нейтрализации) объединяет разнородные средства воздействия на цель: радиоэлектронное подавление каналов управления и навигации (по аналогии с комплексом «Волнорез» [4]), автономный кинетический дрон-перехватчик, зенитную установку с автоматическим

наведением (по аналогии с автоматизированной ЗПУ [5]), а также подсистему оповещения и целеуказания для расчётов, действующих в ручном режиме. Такой набор средств позволяет выбирать наиболее экономичный способ нейтрализации в зависимости от типа, стоимости и характера угрозы, снижая совокупную стоимость перехвата по сравнению с применением исключительно ракетных средств поражения ПВО.

Алгоритм функционирования комплекса.

Роевая атака определяется как скоординированное применение нескольких беспилотников, для которого характерны самоорганизация, распределённое принятие решений и способность продолжать выполнение задачи даже при потере части аппаратов [17]. Указанные свойства роя требуют, чтобы алгоритм противодействия работал не с одиночными целями по очереди, а с групповой картиной угрозы в целом (таблица 2). Для этого предложен алгоритм, построенный на основе управленческого цикла OODA и адаптированный к возможностям комплекса «Барс-Рой» (таблица 3).

Эшелонированная схема применения комплекса показана на рисунке 2. Она предусматривает четыре последовательных рубежа реагирования, каждый из которых использует наиболее подходящий по дальности и стоимости способ обнаружения или поражения цели, что позволяет применять дорогостоящие средства (кинетический перехват, зенитный огонь) только на ближних рубежах, а на дальних ограничиваться недорогим пассивным наблюдением.

На первом этапе (наблюдение) акустические и радиочастотные сенсоры фиксируют признаки приближающихся целей на дальности до 5-7 километров. На втором этапе (ориентация) данные поступают в модуль слияния и нейросетевой классификатор, который определяет тип целей и, при обнаружении нескольких одновременных треков, передаёт информацию в модуль анализа роевого поведения. На третьем этапе (решение) система формирует приоритизированный список целей с учётом их типа, траектории и близости к охраняемому объекту и предлагает оператору (или, при заранее заданных правилах применения, выбирает автоматически в некинетическом контуре) наиболее экономичное средство противодействия. На четвёртом этапе (действие) выбранное средство поражения или подавления применяется к цели, после чего система переходит к этапу оценки результата и, при необходимости, повторного целераспределения по оставшимся аппаратам роя.

Отдельного внимания требует случай, когда рой применяет тактику насыщения (одновременный запуск 10-20 аппаратов для перегрузки систем обнаружения и слежения). В этом случае модуль анализа роевого поведения на основе графовых нейронных сетей позволяет распределить ограниченные средства поражения таким образом, чтобы в первую очередь нейтрализовать цели, представляющие наибольшую угрозу для охраняемого объекта, а не обрабатывать все цели по порядку обнаружения. Аналогичный принцип группового управления средствами перехвата реализован в экспериментальной системе NATO STO BlueSwarm [15].

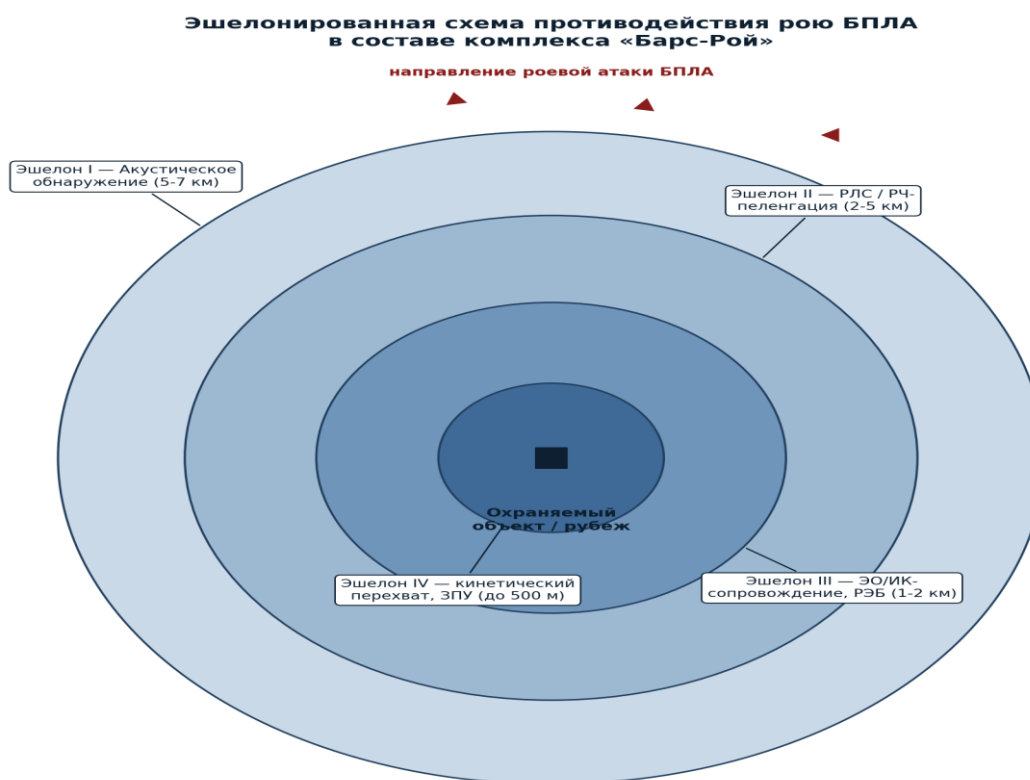


Рисунок 2 – Эшелонированная схема противодействия рою БПЛА в составе комплекса «Барс-Рой» (составлено автором)

Таблица 3 – Этапы алгоритма функционирования комплекса (адаптация цикла OODA)

Этап цикла	Входные данные	Выходные данные	Ориентировочное время
Наблюдение (Observe)	Сигналы акустических, РЧ-, радиолокационных и ЭО/ИК-сенсоров	Первичные треки воздушных объектов	до 2 секунд
Ориентация (Orient)	Первичные треки, данные слияния	Классификация цели (тип, курс, скорость), карта роя	2-4 секунды
Решение (Decide)	Классифицированные цели, приоритеты защиты объекта	Приоритизированный список целей и средств поражения	1-2 секунды
Действие (Act)	Команда на применение средства поражения	Подавление / поражение / оповещение расчёта	зависит от выбранного средства

Примеры применения технологий на театре военных действий (зона СВО)

Ниже приведены конкретные документированные в открытых источниках эпизоды применения средств противодействия БПЛА обеими сторонами конфликта, иллюстрирующие практическую применимость технических решений, заложенных в архитектуру комплекса «Барс-Рой».

Пример 1. Защита энергетической инфраструктуры Украины (2024-2026 гг.)

В условиях массированных ударов по объектам энергетики украинская сторона расширила применение сети акустического обнаружения Sky Fortress и турелей с искусственным интеллектом, о чём сообщил представитель Министерства обороны Украины. По его данным, новое поколение перехватчиков с искусственным интеллектом разрабатывается именно как ответ на удары по энергетической и гражданской инфраструктуре, обострившиеся в зимний период [3]. Данный пример подтверждает практическую значимость многоуровневого обнаружения (уровень I предлагаемой архитектуры) для защиты протяжённых и рассредоточенных по территории объектов.

Пример 2. Защита тяжёлой техники комплексом «Волнорез» (апрель 2024 г.)

По сообщению информационного агентства РИА Новости, комплекс радиоэлектронной борьбы «Волнорез» позволил защитить тяжёлую огнемётную систему ТОС-1А «Солнцепёк» от серии атак FPV-дронов [13]. Этот случай показывает эффективность точечного некинетического подавления каналов управления БПЛА (уровень V предлагаемой архитектуры) для защиты дорогостоящих образцов техники на переднем крае.

Пример 3. Комплексная демонстрация Contra Drone (2026 г.)

Украинская компания Fly Group Ukraine провела закрытое демонстрационное мероприятие Demo Day, на котором была представлена комплексная архитектура защиты Contra Drone, объединяющая более 20 отдельных решений: линейку ударных FPV-дронов, беспилотные крылья для применения в условиях отсутствия сигнала глобальной навигации, наземную платформу радиоэлектронной борьбы и устройство автоматического обнаружения пультов управления по протоколу ELRS [12]. По словам представителя компании, преимущество на поле боя обеспечивает именно способность быстро объединять разнородные технологии в единую систему анализа и реагирования на угрозу [12], что напрямую соответствует принципу многоуровневой интеграции, заложенному в архитектуру комплекса «Барс-Рой».

Пример 4. Испытания автоматизированной ЗПУ с искусственным интеллектом (октябрь 2025 г.)

Российская сторона провела испытания зенитно-пулемётной установки с искусственным интеллектом и оптико-электронным прицелом, которая самостоятельно обнаруживает, сопровождает и поражает воздушные цели [5]. Данный пример подтверждает техническую реализуемость автономного кинетического уровня поражения (уровень V), предусмотренного в предлагаемой архитектуре, при условии сохранения контроля оператора за окончательным решением об открытии огня.

Пример 5. Передача технологии Sky Fortress союзникам по НАТО (2026 г.)

Согласно открытым источникам, Литва планирует развернуть украинскую систему Sky Fortress в 2026 году, что стало первым прямым случаем передачи государству-члену НАТО технологии противодействия БПЛА, испытанной в реальных боевых условиях [18]. Этот пример подтверждает международную востребованность недорогих, доказавших эффективность в бою решений и обосновывает целесообразность изучения подобного опыта для целей охраны государственной границы Кыргызстана и Казахстана.

Оценка ожидаемой эффективности предложенного решения

Оценка эффективности комплекса «Барс-Рой» на данном этапе исследования носит расчётный (проектный) характер и основана на сопоставлении целевых показателей комплекса с открытыми данными об аналогичных системах, приведёнными в разделах 4 и 7. На рисунке 3 показано сравнение эффективной дальности обнаружения по типам сенсоров, а также иллюстрация асимметрии издержек между стоимостью атакующего беспилотника, стоимостью ракетного перехвата и ориентировочной стоимостью предлагаемого кинетического перехватчика.

Как видно из представленных данных, ни один из отдельно взятых каналов обнаружения не обеспечивает одновременно большую дальность и высокую точность классификации цели. Акустический канал обеспечивает наибольшую дальность (до 6-7 км), но чувствителен к погодным условиям и городскому шуму [8]. Радиолокационный канал обеспечивает более устойчивое обнаружение на средней дальности, но требует более высоких капитальных затрат. Оптико-электронный канал обеспечивает наиболее точную классификацию цели, но на ограниченной дальности. Именно поэтому архитектура комплекса «Барс-Рой» построена на принципе многоканального слияния данных, а не на выборе одного оптимального сенсора.

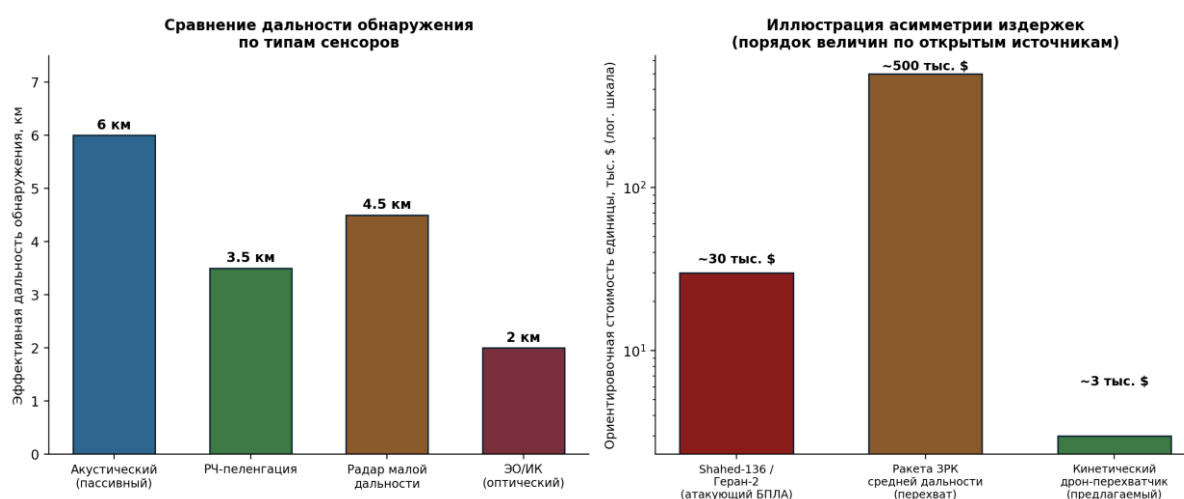


Рисунок 3 – Сравнение дальности обнаружения по типам сенсоров и иллюстрация асимметрии издержек (порядок величин по открытым источникам)

Расчётное соотношение издержек, показанное на рисунке 3, основано на порядке величин, приводимом в открытых источниках: стоимость барражирующего боеприпаса типа Shahed-136 оценивается примерно в 20-30

тысяч долларов [2], стоимость ракеты зенитного ракетного комплекса, применяемой для его перехвата, может достигать порядка 500 тысяч - 1 миллиона долларов [1], тогда как ориентировочная стоимость автономного кинетического дрона-перехватчика, аналогичного по классу украинским разработкам [12], оценивается на уровне нескольких тысяч долларов.

Таким образом, применение недорогого кинетического перехватчика в сочетании с системой раннего акустического обнаружения способно снизить стоимость нейтрализации одной цели на один-два порядка по сравнению с ракетным перехватом, что напрямую отвечает на проблему асимметрии издержек, обозначенную во введении к настоящей статье.

Таблица 4 – Сопоставление ожидаемых показателей комплекса «Барс-Рой» с существующими аналогами

Показатель	Отдельная система-аналог	Комплекс «Барс-Рой» (целевое значение)
Многоканальность обнаружения	как правило, один канал (акустика либо РЛС, либо РЭБ)	четыре канала одновременно с автоматическим слиянием данных
Анализ роевых атак	не предусмотрен в большинстве описанных решений	отдельный модуль на графовых нейронных сетях (GNN)
Время реакции на одиночную цель	секунды - десятки секунд (по открытым оценкам аналогов)	менее 10 секунд (расчётное значение)
Гибкость средств поражения	как правило, одно средство (РЭБ либо кинетика)	выбор между РЭБ, кинетическим перехватом и ЗПУ по критерию стоимости
Ориентировочная стоимость нейтрализации цели	сотни тысяч - около миллиона долларов (ракетный перехват) [1]	единицы тысяч долларов (кинетический перехватчик)

Обсуждение: ограничения, правовые и этические аспекты.

Предложенная архитектура имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при переходе от концептуальной модели к опытному образцу (таблица 4).

Во-первых, акустическое обнаружение существенно теряет эффективность при сильном ветре и в условиях городской застройки, а также уязвимо перед так называемыми «тихими» беспилотниками, использующими малошумные двигатели, что отмечается в специализированных обзорах по акустическому обнаружению дронов [17].

Во-вторых, радиочастотная пеленгация не обнаруживает полностью автономные аппараты, не использующие канал связи с оператором, что требует обязательного сохранения оптико-электронного и радиолокационного каналов в качестве резервных. В-третьих, устойчивая работа комплекса в условиях подавления навигационных сигналов (GPS-РЭБ со стороны противника) требует применения автономных систем навигации, не зависящих от глобальных навигационных спутниковых систем.

Отдельного рассмотрения требует вопрос допустимой степени автономности средств поражения. Принятая в предлагаемой архитектуре модель предполагает обязательное участие человека в контуре управления (human-in-the-loop) на этапе принятия решения о применении кинетических средств поражения, в то время как этап обнаружения, классификации и целераспределения может выполняться полностью автоматически.

Такой подход соответствует общему направлению международной дискуссии по автономным системам вооружений, ведущейся, в частности, в рамках Группы правительственных экспертов по автономным системам летального действия при Конвенции ООН о негуманном оружии, и позволяет снизить риск ошибочного поражения гражданских объектов при сохранении высокой скорости реакции системы на этапах, не связанных непосредственно с применением силы. Аналитики НАТО также подчёркивают, что многоэшелонированное сочетание кинетических и некинетических средств позволяет минимизировать зависимость от полностью автономного принятия решения о поражении цели [16].

Для государств Центральной Азии, включая Кыргызскую Республику и Республику Казахстан, применение технологий, апробированных в вооружённом конфликте, целесообразно рассматривать прежде всего в невоенном контексте: для охраны государственной границы, защиты объектов критической инфраструктуры (гидроэлектростанции, аэропорты, объекты топливно-энергетического комплекса) и противодействия использованию беспилотников в целях контрабанды и незаконного оборота наркотических средств.

В этом случае акцент архитектуры комплекса целесообразно смещать в сторону обнаружения и оповещения, а также некинетического подавления (постановка помех, принудительная посадка), с минимизацией применения кинетических средств поражения, что требует отдельной проработки нормативно-правовой базы применения подобных комплексов в мирное время, включая вопросы охраны воздушного пространства и защиты прав граждан.

Научная новизна исследования заключается в систематизации разрозненного опыта применения средств противодействия БПЛА обеими сторонами вооружённого конфликта на Украине и зарубежными организациями в рамках единой пятиуровневой архитектурной модели, а также в обосновании применения графовых нейронных сетей как самостоятельного модуля анализа именно роевого (группового), а не одиночного поведения целей, что отличает предложенное решение от большинства описанных в разделе 4 аналогов, ориентированных на работу с одиночными целями.

Практическая новизна состоит в том, что предложенная архитектура допускает поэтапное, модульное внедрение: отдельные уровни комплекса (например, сеть акустического обнаружения) могут быть развёрнуты и апробированы независимо от готовности остальных уровней, что снижает финансовые и организационные риски внедрения по сравнению с закупкой единого закрытого программно-аппаратного решения. Кроме того,

предложенная архитектура может быть адаптирована для решения задач, отличных от боевого применения, в частности для охраны государственной границы и объектов критической инфраструктуры Кыргызской Республики и Республики Казахстан, что расширяет область практического применения результатов исследования за пределы военной сферы.

Заключение. Проведённый анализ открытых источников о боевом применении систем противодействия беспилотным летательным аппаратам обеими сторонами вооружённого конфликта на Украине, а также разработок НАТО и Европейского союза, позволил выявить общую тенденцию к интеграции недорогих многоканальных сенсоров с алгоритмами искусственного интеллекта при сохранении человека в контуре принятия решения о применении силы.

На основе выявленных тенденций предложена концептуальная архитектура программно-аппаратного комплекса «Барс-Рой», включающая пять функциональных уровней (обнаружение, слияние данных, анализ искусственным интеллектом, поддержка принятия решения, поражение), и алгоритм его функционирования, построенный на основе управленческого цикла OODA с отдельным модулем анализа роевого поведения на графовых нейронных сетях.

Расчётная оценка показывает, что применение многоканального обнаружения и недорогих кинетических средств перехвата способно существенно снизить стоимость нейтрализации одной цели по сравнению с традиционным ракетным перехватом, что отвечает на проблему асимметрии издержек, характерную для современных конфликтов с массовым применением беспилотников.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на опытно-конструкторскую проработку отдельных модулей предложенной архитектуры (прежде всего модуля анализа роевого поведения на графовых нейронных сетях), а также на разработку нормативно-правовой базы применения подобных комплексов в невоенных целях, включая охрану государственной границы и противодействие незаконному обороту наркотических средств в Кыргызской Республике и Республике Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Украина вскоре развернёт новое поколение перехватчиков ПВО на базе искусственного интеллекта – WP [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://www.obozrevatel.com/politics-news/ukraina-vskore-razvernet-novoe-pokolenie-perehvatchikov-pvo-na-baze> (дата обращения: 15.09.2026).

2 Модульный и магнитный: что представляет собой российский комплекс РЭБ «Волнорез» [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://russian.rt.com/russia/article/1302676-reb-volnarez-razrabotchik> (дата обращения: 10.09.2026).

3 Украинским дронам будет противостоять искусственный интеллект [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/8161450> (дата обращения: 12.09.2026).

4 O'Donnell W. Sky Fortress is Ukraine's New Acoustic Air Defense Marvel [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://wesodonnell.medium.com/sky-fortress-is-ukraines-new-acoustic-air-defense-marvel-fd484c57871d> (дата обращения: 09.09.2026).

5 Рой из будущего: развитие дронов на базе искусственного интеллекта может навсегда лишить Россию преимуществ в вооружениях и живой силе, которые казались ранее неустрашимыми [Электронный ресурс]. – URL: <https://re-russia.net/analytics/0203/> (дата обращения: 15.09.2026).

6 Sky Fortress (drone defense system) [Электронный ресурс] // Wikipedia. – URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sky_Fortress_\(drone_defense_system\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sky_Fortress_(drone_defense_system)) (дата обращения: 12.09.2026).

7 Sky Fortress – Ukraine's Acoustic Detection System That Tracks Drones Cheap and Fast [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://united24media.com/war-in-ukraine/sky-fortress-ukraines-acoustic-detection-system-that-tracks-drones-cheap-and-fast-9451> (дата обращения: 15.09.2026).

8 Дёшево и сердито: система Sky Fortress как ответ на угрозу дронов [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://mlyn.by/28082025/deshevo-i-serdito-sistema-sky-fortress-kak-otvet-na-ugrozu-dronov/> (дата обращения: 15.09.2026).

9 On the construction of effective DRONEWALLS: Technologies and challenges for Counter-UAV systems [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2941198X25000375> (дата обращения: 14.09.2026).

10 Украина усилила «малую» ПВО: ИИ-турели уничтожают дроны [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://novosti-n.org/news/Ukrayna-usylyla-maluyu-PVO-YY-turely-unychtozhayut-droni-337761> (дата обращения: 15.09.2026).

11 «Дроны начнут сражаться с дронами»: NYT рассказал, как работают украинские перехватчики с ИИ [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://www.unian.net/weapons/p1-sun-i-skyfall-kak-rabotaet-perehvat-shahedov-v-ukraine-13413606.html> (дата обращения: 12.09.2026).

12 Мини-ПВО для сбивания FPV и перехватчик Peace Duck: в Украине показали новое противодействие БПЛА [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://www.rbc.ua/ukr/news/mini-ppo-zbittya-fpv-ta-perehoplyuvach-peace-1783060301.html/amp> (дата обращения: 14.09.2026).

13 Комплекс «Волнорез» не дал дронам ВСУ поразить систему «Солнцепёк» [Электронный ресурс]. – 2024. – URL: <https://ria.ru/20240419/volnorez-1940936554.html> (дата обращения: 15.09.2026).

14 Кобра (система борьбы с дронами) [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Кобра_\(система_борьбы_с_дронами\)](https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:Кобра_(система_борьбы_с_дронами)) (дата обращения: 15.09.2026).

15 A Novel Swarm Defense End-to-End System for Autonomous Drone Detection, Tracking, and Neutralization [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://www.sto.nato.int/document/a-novel-swarm-defense-end-to-end-system-for->

[autonomous-drone-detection-tracking-and-neutralization/](https://cepa.org/comprehensive-reports/an-urgent-matter-of-drones/) (дата обращения: 15.09.2026).

16 An Urgent Matter of Drones: Lessons for NATO from Ukraine [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://cepa.org/comprehensive-reports/an-urgent-matter-of-drones/> (дата обращения: 12.09.2026).

17 Drone Swarm [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://sentrycs.com/glossary/drone-swarm/> (дата обращения: 15.09.2026).

18 Counter-UAS 101 – Acoustic Drone Detection [Электронный ресурс]. – 2026. – URL: <https://drone-warfare.com/counter-uas/acoustic-detection/> (дата обращения: 15.09.2026).

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

сеньор-лектор Кутпанова З.А.
Astana IT University,
к.ф.-м.н., доцент Сагнаева С.К.,
Евразийский национальный
университет имени Л.Н.Гумилева,
город Астана, Республика Казахстан
сеньор-лектор Игнатъев Д.И.,
Cranfield University, Великобритания

Аннотация. В статье проведён сравнительный анализ современных методов управления группами беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрены классические методы траекторного управления, архитектура «ведущий-ведомые», методы предотвращения столкновений и алгоритмы обучения с подкреплением. Выявлены основные преимущества, ограничения и перспективы их применения для группового полёта в неструктурированной среде.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, групповое управление, ведущий-ведомый, предотвращение столкновений, обучение с подкреплением, DDQN, неструктурированная среда.

Введение. Анализ методов автоматического управления и траекторного движения БПЛА. Автоматическое управление траекторным движением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) предусматривает формирование управляющих воздействий, обеспечивающих движение по заданной траектории с учётом динамических характеристик аппарата. Точность выполнения полётного задания зависит от способности системы управления поддерживать требуемые параметры движения и компенсировать отклонения от заданного состояния. В рассмотренных исследованиях представлены подходы, основанные на классическом регулировании, адаптивном и оптимальном управлении, а также управлении с прогнозированием движения.

Одним из распространённых подходов к стабилизации БПЛА является пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) регулирование. Управляющее воздействие формируется на основе текущей ошибки, её накопленного значения и скорости изменения. Применение ПИД-регулятора для стабилизации полёта исследовано с использованием аппаратной модели БПЛА [1]. При этом стабилизация аппарата и отслеживание пространственной траектории представляют собой разные задачи: поддержание заданных параметров полёта само по себе не определяет порядок формирования и

изменения маршрута. Использование ПИД-регулятора характеризуется простотой метода, известными исследованиями к настоящему времени, возможностью работы в реальном времени и устойчивостью к небольшим возмущениям. Слабостью данного подхода является сложность настройки коэффициентов для нелинейных и изменяющихся режимов. Практически не применим к рюю дронов, поскольку для группового движения требуется внешний координатор.

Для управления БПЛА с изменяющимися динамическими характеристиками рассматриваются адаптивные регуляторы. Их применение направлено на компенсацию ошибок, возникающих при изменении параметров модели аппарата. В исследовании адаптивного управления каналом тангажа рассмотрена возможность коррекции управления при изменении динамики БПЛА [2]. Данный подход относится к обеспечению требуемого движения аппарата и не решает самостоятельно задачу построения пространственной траектории. Преимуществом использования адаптивных регуляторов является их способность подстраиваться под изменение массы, аэродинамики, отказы приводов; повышение робастности в неопределённых условиях. Слабость подхода проявляется в сложности синтеза и доказательства устойчивости, возможные автоколебания при быстрой адаптации, необходимость оценки параметров, высокие вычислительные затраты. Возможно применение к рюю дронов, каждый из которых может адаптироваться под свои условия, но для согласованного движения роя требуется дополнительный протокол обмена данными и координации.

Основная часть. Для построения траектории с заданными начальными и конечными условиями применяются методы оптимального управления. Один из таких подходов предусматривает разделение пространственной траектории БПЛА на последовательные участки, каждый из которых аппроксимируется полиномом пятой степени. Коэффициенты полиномов определяются по граничным условиям положения, скорости и ускорения, а управляющее воздействие рассчитывается путём минимизации квадратичного функционала, учитывающего точность достижения заданных точек и затраты на управление. Аналитическое решение позволяет определять оптимальное управление для каждого участка без выполнения итерационной оптимизации во время полёта. Проверка метода в MATLAB/Simulink показала возможность точного и устойчивого отслеживания заданной траектории одиночным БПЛА [3]. Методы оптимального управления учитывают граничные условия, минимизацию энергозатрат, решения для отдельных участков с высокой точностью на гладких траекториях. При этом отмечаются такие слабые стороны как необходимость достаточно точной модели, плохая масштабируемость на большое число аппаратов, не учитываются изменяющиеся внешние возмущения и препятствия в реальном времени. При управлении движением роя дронов могут быть использованы на этапе планирования маршрутов для каждого дрона.

В задачах, требующих учёта ограничений движения на протяжении последующих участков траектории, применяется управление с прогнозирующей

моделью (Model Predictive Control, MPC). В отличие от регуляторов, рассчитывающих воздействие преимущественно по текущему отклонению, MPC использует модель динамики для прогнозирования будущего состояния аппарата и определения управляющих воздействий на заданном временном горизонте. После получения новых данных о состоянии БПЛА расчёт повторяется.

В рассмотренном исследовании автономной воздушной стыковки нелинейное прогнозирующее управление использовано совместно с ПД-регулированием и оценкой положения по данным спутниковой навигации и технического зрения. По результатам моделирования введение штрафа за скорость в критерий управления способствовало повышению плавности траектории и уменьшению перерегулирования [4].

Точность траекторного движения зависит не только от способа расчёта управляющего воздействия, но и от достоверности модели БПЛА. Моделирование динамики квадрокоптера в MATLAB/Simscare позволяет исследовать движение аппарата и проверять алгоритмы управления в имитационной среде до их применения на физической платформе [5]. При этом результаты моделирования необходимо отличать от результатов натурных испытаний, поскольку условия имитационной среды определяются принятыми в модели допущениями.

Управление с прогнозирующей моделью (MPC) обладает такими явными преимуществами как явный учёт ограничений, прогнозирование будущего движения, возможность оптимизации по нескольким критериям, хорошая работа при наличии препятствий и динамических целей. Но при этом управлению MPC свойственна высокая вычислительная сложность, необходимость точной модели, трудности при нелинейной динамике и больших горизонтах прогноза, чувствительность к задержкам. Метод потенциально применим к слою дронов, особенно при распределённом MPC, когда каждый дрон учитывает состояния соседей. Однако для больших роев требуется декомпозиция и ограничение вычислительной нагрузки.

Анализ методов группового управления БПЛА на основе архитектуры «ведущий - ведомый».

Групповое управление БПЛА предусматривает согласование движения нескольких аппаратов при выполнении общего полётного задания. В отличие от одиночного БПЛА, необходимо учитывать не только траекторию каждого аппарата, но и его положение относительно других участников группы. Одним из распространённых подходов является архитектура «ведущий - ведомый» (leader-follower), в которой движение ведущего используется для формирования заданного движения ведомых.

Ведущий БПЛА задаёт опорное движение, а ведомые корректируют своё положение относительно него или соседних аппаратов. Для группы из трёх БПЛА возможна последовательная схема, в которой второй аппарат следует за первым, а третий – за вторым. Такая организация упрощает описание группового движения, однако создаёт зависимость от точности последовательной передачи информации.

Различают непосредственное следование за ведущим и следование за ближайшим предшествующим аппаратом. В первом случае каждый ведомый получает состояние ведущего, во втором используется локальный обмен между соседними БПЛА. Для последовательной группы из трёх аппаратов существенным параметром становится точность передачи данных от первого БПЛА ко второму и далее к третьему.

Поддержание построения может осуществляться на основе относительных измерений. В исследовании мобильных роботов архитектура «ведущий - ведомый» реализована без использования абсолютных координат ведущего. При заданном расстоянии 0,5 м среднеквадратическая ошибка относительного положения составляла около 0,004 м [6]. Несмотря на отличие динамики мобильных роботов от БПЛА, результат подтверждает возможность организации следования по относительным измерениям.

Для согласования движения нескольких БПЛА применяются распределённые методы, при которых каждый аппарат рассчитывает управляющее воздействие на основе информации о соседних участниках. В исследовании группы из трёх БПЛА использован распределённый регулятор на основе теории консенсуса и графового представления связей. Ведущий задавался виртуальной моделью, а обмен состояниями обеспечивал согласование положения и скорости. Моделирование показало поддержание треугольного построения и уменьшение ошибок согласования [7].

Практическая реализация группового управления существенно зависит от организации межаппаратной связи. В исследовании группы из шести БПЛА, включавшей двух ведущих и четырёх ведомых, распределённое управление реализовано с использованием ROS и протокола MAVLink [8]. Данная конфигурация отличается от последовательной схемы с одним ведущим и двумя ведомыми и представляет более общую распределённую архитектуру.

Устойчивость группового движения также определяется способностью системы сохранять построение при отказах отдельных участников. Для группы из шести БПЛА исследована архитектура с координатором и переключением связей при отказах узлов. Моделирование показало возможность сохранения построения после изменения конфигурации управления [9]. Для последовательной группы из трёх аппаратов потеря данных от предшествующего БПЛА особенно критична, поскольку третий аппарат может зависеть от информации, передаваемой через второй.

Дополнительным фактором является доступность относительных измерений. В исследовании пяти БПЛА при прямой видимости среднеквадратическая ошибка относительного позиционирования составляла около 0,5 м, тогда как нарушение прямой видимости ухудшало качество определения положения [10]. Это показывает зависимость группового управления от условий получения информации о взаимном положении аппаратов.

Анализ методов предотвращения столкновений и движения БПЛА в неструктурированной среде.

Движение БПЛА в неструктурированной среде характеризуется неполной априорной информацией и возможным появлением препятствий, не учтённых при первоначальном построении маршрута. Для группы БПЛА задача усложняется тем, что источниками столкновения являются как внешние объекты, так и сами аппараты. Поэтому система управления должна учитывать положение препятствий, взаимное положение БПЛА и минимально допустимую дистанцию.

Одним из распространённых методов локального предотвращения столкновений является искусственное потенциальное поле (Artificial Potential Field, далее -APF), в котором цель формирует притягивающее воздействие, а препятствия - отталкивающее. Для группового движения аналогичный принцип может применяться к другим БПЛА, рассматриваемым как динамические препятствия.

Для предотвращения взаимных столкновений вокруг каждого аппарата формируется область безопасности. При опасном сближении активируется отталкивающее воздействие, увеличивающее расстояние между БПЛА. При моделировании движения трёх аппаратов после нарушения безопасной дистанции расстояние восстанавливалось и стабилизировалось [11]. Ограничением работы является отсутствие внешних статических препятствий, поскольку исследование ориентировано главным образом на предотвращение столкновений внутри группы.

Для формализации условия безопасности расстояние между двумя аппаратами i и j может быть представлено как

$$d_{ij} = \|p_i - p_j\|, \quad (1)$$

Где p_i и p_j – пространственные координаты соответствующих БПЛА.

Условие безопасного движения определяется ограничением

$$d_{ij} \geq d_{\text{safe}}, \quad (2)$$

где d_{safe} – минимально допустимое расстояние между аппаратами.

При нарушении установленной границы система управления должна сформировать корректирующее воздействие, предотвращающее дальнейшее сближение. Для внешнего препятствия аналогичное условие может быть задано через расстояние d_{io} между БПЛА и ближайшей точкой препятствия. Такое представление позволяет рассматривать предотвращение межаппаратных и внешних столкновений в едином пространстве ограничений.

Преимуществом APF является сравнительно простая вычислительная структура и возможность использования локальной информации. Основной недостаток заключается в вероятности попадания в локальный минимум, особенно в сложных и частично замкнутых конфигурациях препятствий. Кроме того, параметры потенциального поля непосредственно влияют на форму и безопасность обходной траектории.

Для устранения части указанных ограничений применяются комбинированные методы. Сочетание Theta* и APF разделяет глобальное построение маршрута и локальную коррекцию при приближении к препятствиям. В трёхмерных сценариях такой подход обеспечил сокращение времени поиска примерно на 60 % и длины траектории примерно на 10 % относительно методов сравнения [12]. При этом глобальное планирование требует информации о пространстве, что ограничивает его применение при появлении заранее неизвестных препятствий.

Другим направлением является распределённое построение траекторий, при котором каждый аппарат самостоятельно рассчитывает движение на основе локальной информации. В одном из исследований задача была реализована с использованием Particle Swarm Optimization (PSO), выполняемого независимо на каждом БПЛА с учётом группового движения, отслеживания цели и предотвращения столкновений. Подход прошёл экспериментальную проверку на группе квадрокоптеров [13]. Его ограничением являются вычислительные затраты, возрастающие при увеличении числа объектов и ограничений.

Для уменьшения проблемы локальных минимумов APF предложен гибридный алгоритм DSA-AAPF, объединяющий адаптивное потенциальное поле с модифицированным алгоритмом имитации отжига. Изменение коэффициента притяжения и механизм направленного отклонения позволяют корректировать движение в сложных конфигурациях препятствий. Результаты показали возможность уменьшения влияния локальных минимумов, однако проверка проводилась преимущественно в имитационной среде [14].

В неструктурированной среде необходимо учитывать различия между статическими и динамическими препятствиями. Координаты статического объекта после обнаружения могут быть включены в локальную карту, тогда как для динамического объекта дополнительно требуется учитывать направление и скорость его движения. Аналогичная задача возникает при групповом полёте, поскольку каждый БПЛА одновременно является управляемым агентом и динамическим препятствием для других участников.

Рассмотренные подходы различаются принципом формирования движения и используемой информацией, что представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов предотвращения столкновений и движения БПЛА в среде с препятствиями

Метод	Принцип	Условия	Преимущество	Ограничение
APF [11]	Локальное отталкивание	Взаимное положение БПЛА	Простая локальная реакция	Локальные минимумы; внешние препятствия не рассмотрены
Theta*-APF [12]	Глобальный поиск и локальная коррекция	3D-среда	Совмещение двух уровней планирования	Требуется информация о среде
PSO [13]	Распределённая онлайн-оптимизация	Групповое движение	Независимый расчёт траекторий	Высокие вычислительные затраты

DSA-AAPF [14]	Адаптивное поле и выход из локального минимума	Сложные препятствия	Снижение проблемы локальных минимумов	Преимущественно моделирование
------------------	---	------------------------	--	----------------------------------

Проведённый анализ показывает, что часть методов ориентирована преимущественно на предотвращение взаимных столкновений БПЛА, тогда как другие предназначены для обхода внешних препятствий.

Анализ интеллектуальных методов группового управления БПЛА.

Групповое управление БПЛА в неструктурированной среде требует одновременного учёта параметров движения аппаратов, их взаимного положения, изменений окружающей среды и ограничений миссии. Для решения таких задач применяются интеллектуальные методы, включая нечёткую логику, эволюционные и биоинспирированные алгоритмы, роевой интеллект, нейронные сети, машинное обучение и гибридные подходы. Анализ более 100 публикаций по планированию движения нескольких БПЛА за 2017-2024 гг. показывает отсутствие универсального алгоритма, одинаково эффективного для различных конфигураций среды и группы, поэтому перспективным направлением является сочетание методов оптимизации и интеллектуального принятия решений [15]. Нечёткое управление позволяет формировать решения на основе системы правил и относительных измерений, однако остаётся зависимым от заранее заданной базы правил [16].

Роевые, эволюционные и метаэвристические методы обеспечивают адаптацию коллективного поведения и поиск решений с учётом нескольких критериев, включая безопасность, энергозатраты и параметры миссии. В частности, применение адаптивных роевых стратегий позволило сократить продолжительность миссии и увеличить количество обнаруженных целей, однако эффективность таких подходов также определяется заранее заданными механизмами взаимодействия и процедурой оптимизации [17]. Повышение автономности групп БПЛА требует формирования зависимости между наблюдаемым состоянием системы и принимаемым решением на основе накопленного опыта, что определяет особый интерес к методам машинного обучения и, прежде всего, к обучению с подкреплением. Для данной системы состояние может включать параметры движения отдельных аппаратов, относительное положение соседних БПЛА, расстояния до препятствий и параметры выполняемой миссии.

Математически задача представляется марковским процессом принятия решений:

$$M = \langle S, A, P, R, \gamma \rangle \quad (3)$$

где S – множество состояний;

A – множество действий;

$P(s_{t+1} | s_t, a_t)$ – вероятность перехода в следующее состояние;

$R(s_t, a_t)$ – функция вознаграждения;

$\gamma \in [0,1]$ – коэффициент дисконтирования.

Для группы из N БПЛА состояние системы может быть представлено вектором:

$$s_t = [p_i(t), v_i(t), \Delta p_{ij}(t), d_{i,obs}(t), g_i(t)], i = 1, \dots, N \quad (4)$$

Где $p_i(t)$ и $v_i(t)$ – положение и скорость i -го БПЛА;

$\Delta p_{ij}(t)$ – относительное положение аппаратов;

$d_{i,obs}(t)$ – расстояние до ближайшего препятствия;

$g_i(t)$ – параметры миссии.

Относительное положение двух аппаратов определяется как:

$$\Delta p_{ij}(t) = p_j(t) - p_i(t) \quad (5)$$

При высокоуровневом управлении пространство действий может задаваться конечным набором манёвров:

$$A = \{a_{forward}, a_{left}, a_{right}, a_{up}, a_{down}, a_{velocity}\} \quad (6)$$

При непосредственном формировании скорости, ускорения или управляющих воздействий пространство действий является непрерывным.

Цель обучения заключается в максимизации накопленного дисконтированного вознаграждения:

$$G_t = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r_{t+k+1} \quad (7)$$

где G_t – накопленное дисконтированное вознаграждение, начиная с момента времени t ;

$\gamma \in [0,1]$ – коэффициент дисконтирования, определяющий вклад будущих вознаграждений;

r_{t+k+1} – вознаграждение, получаемое через k шагов после текущего состояния;

k – индекс временного шага.

Оптимальная политика определяется как:

$$\pi = \arg \max_{\pi} E_{\pi}[G_t] \quad (8)$$

где π – политика управления, задающая правило выбора действия в зависимости от текущего состояния системы;

π^* – оптимальная политика;

$E_{\pi}[\cdot]$ – математическое ожидание при следовании политике π ;

G_t – накопленное дисконтированное вознаграждение.

Таким образом, задача обучения состоит в нахождении политики, максимизирующей ожидаемое суммарное вознаграждение.

Для группового управления функция вознаграждения может учитывать точность траекторного движения, сохранение групповой конфигурации и безопасность:

$$r_t = -w_1 e_{\text{traj}(t)} - w_2 e_{\text{form}(t)} - w_3 P_{\text{obs}(t)} - w_4 P_{\text{uav}(t)} + w_5 R_{\text{goal}(t)} \quad (9)$$

где $e_{\text{traj}(t)}$ – ошибка отслеживания траектории;
 $e_{\text{form}(t)}$ – ошибка поддержания групповой конфигурации;
 $P_{\text{obs}(t)}$ – штраф за опасное сближение с внешним препятствием;
 $P_{\text{uav}(t)}$ – штраф за опасное сближение с другим БПЛА;
 $R_{\text{goal}(t)}$ – вознаграждение за достижение цели;
 $w_1, \dots, w_5$ – весовые коэффициенты.

Deep Q-Network (DQN) представляет собой метод обучения, в котором нейронная сеть оценивает ожидаемую ценность каждого допустимого действия и выбирает действие с наибольшим ожидаемым вознаграждением; для конфигурации из одного ведущего и двух ведомых БПЛА DQN показал возможность поддержания безопасного расстояния порядка 40-60 м без столкновений, однако результаты были получены в имитационной среде [18]. Double Deep Q-Network (DDQN) является модификацией DQN, в которой выбор действия и оценка его ценности выполняются разными сетями, что уменьшает переоценивание Q-значений; в моделируемых средах Manhattan32 и Urban50 DQN и DDQN обеспечивали выполнение доставки примерно в 88 % случаев и успешное возвращение до 99,38 % [19]. Proximal Policy Optimization (PPO) относится к методам непосредственной оптимизации политики: алгоритм не выбирает действие через максимизацию Q-функции, а обучает стратегию поведения, ограничивая слишком резкие изменения между последовательными обновлениями; PPO может работать как с дискретными, так и с непрерывными действиями, а при переносе обученной политики на физическую платформу была выявлена чувствительность к вычислительным и коммуникационным задержкам порядка 1,3 с [20]. Soft Actor-Critic (SAC) представляет собой actor-critic подход, в котором один компонент формирует действие, а другой оценивает его полезность; дополнительно алгоритм максимизирует энтропию политики, что способствует более разнообразному исследованию возможных действий. Сочетание SAC с Hindsight Experience Replay повысило успешность выполнения задания и эффективность обучения [21], а интеграция SAC с информацией искусственного потенциального поля позволила ускорить сходимость и улучшить планирование маршрута в изменяющейся среде (таблица 2) [22].

Таблица 2 – Сравнительная характеристика DQN, DDQN, PPO и SAC при управлении БПЛА

Метод	Принцип формирования решения	Тип обучения	Пространство действий	Replay buffer	Особенности применения
DQN	Оценка Q-функции	Off-policy	Дискретное	Да	Возможна переоценка Q-значений
DDQN	Раздельный выбор и оценка действия	Off-policy	Дискретное	Да	Снижение переоценивания Q-значений
PPO	Оптимизация политики	On-policy	Дискретное и непрерывное	Нет	Ограничение изменения политики
SAC	Actor-critic с максимизацией энтропии	Off-policy	Преимущественно непрерывное	Да	Повторное использование опыта

Сопоставление алгоритмов показывает, что DQN и DDQN ориентированы преимущественно на дискретное пространство действий, тогда как PPO и SAC позволяют работать с непрерывными управляющими воздействиями. Для группового управления существенным является разделение высокоуровневого интеллектуального принятия решений и низкоуровневого траекторного управления.

Иерархическая структура управления может быть математически представлена следующим образом:

$$a_t^H = \pi\theta(s_t) \quad (10)$$

$$u_t = f_ctrl(a_t^H, x_t) \quad (11)$$

где a_t^H – высокоуровневый манёвр, выбранный интеллектуальным алгоритмом;

u_t – низкоуровневое управляющее воздействие;

x_t – текущее состояние динамической системы БПЛА.

Для рассматриваемой группы из трёх БПЛА множество высокоуровневых решений может быть задано как:

$$A^H = \{a_{continue}, a_{left}, a_{right}, a_{up}, a_{down}, a_{velocity}\} \quad (12)$$

С этой точки зрения DDQN представляет интерес для построения интеллектуального уровня группового управления при дискретном выборе манёвра. Алгоритм позволяет разделить выбор и оценку действия, повторно использовать накопленный опыт и сохранить непосредственное управление динамикой БПЛА за классическим контуром.

Заключение. Современные методы управления БПЛА обеспечивают решение отдельных задач стабилизации и траекторного движения, поддержания групповой конфигурации, планирования маршрута и предотвращения столкновений. Вместе с тем существующие подходы преимущественно

рассматривают данные задачи отдельно, что ограничивает их применение при движении группы БПЛА в неструктурированной среде. Особую сложность представляет необходимость одновременно сохранять согласованное движение группы, учитывать взаимное положение аппаратов и формировать безопасный манёвр при появлении заранее неизвестных препятствий.

Анализ интеллектуальных методов подтвердил перспективность применения обучения с подкреплением для адаптивного принятия решений. Рассмотренные алгоритмы DQN, DDQN, PPO и SAC различаются типом пространства действий, способом обновления политики и возможностью повторного использования накопленного опыта. Для рассматриваемой архитектуры «ведущий-ведомые» обосновано применение DDQN как алгоритма высокоуровневого выбора дискретных манёвров при сохранении классического контура низкоуровневого траекторного управления.

На основании выявленных ограничений существующих исследований сформулирована научная задача разработки метода группового управления тремя БПЛА, обеспечивающего согласованное траекторное движение и адаптивное предотвращение столкновений с внешними препятствиями и участниками группы. Предлагаемый подход основан на иерархической интеграции классических методов управления и обучения с подкреплением, что позволяет разделить функции устойчивого выполнения манёвра и интеллектуального выбора управляющего решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Ермилов Г.С. Системы стабилизации беспилотных летательных аппаратов //Colloquium-journal. Голопристанський міськрайонний центр зайнятості. – 2020. – №. 11 (63). – С. 12-19.

2 Архипов А. В., Тимошенко С. П. Применение адаптивных регуляторов в системах управления беспилотными летательными аппаратами // Известия высших учебных заведений. Электроника. – 2022. – Т. 27. – №5. – С. 652-663.

3 Kutpanova Z. et al. Segmented UAV Trajectory Optimization via Fifth-Order Polynomial Approximation and Analytical Optimal Control // Engineering, Technology & Applied Science Research – 2026. – Т. 16, №1. – P. 32696-32703.

4 Zheng T., Richardson T. S., Meier K. Design of an Autonomous Airborne Recovery System: A Fixed-Wing UAV-Quadrotor Platform Using Improved NMPC and Vision-Based Control //Drones – 2026. –Т. 10, №3. – P. 212.

5 Zhu Y.Q. Model of Control System for Unmanned Aerial Vehicles (Quadcopters) // Computing, Telecommunications and Control – 2022. – Vol. 15, №3. – P. 49-61.

6 Белоконь С. А. и др. Управление мобильными роботами в составе группы лидер-ведомые //Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17. – №3. – С. 166-172.

- 7 Yang Q. et al. Position-Based Cooperative Formation Control for Multi-UAV Systems Using a Leader-Follower Strategy //IFAC-PapersOnLine – 2025. – Т. 59, № 20. – P. 592-597.
- 8 Adoni W. Y. H. et al. Intelligent swarm: Concept, design and validation of self-organized UAVs based on leader-followers paradigm for autonomous mission planning //Drones – 2024. – Т. 8, № 10. – P. 575.
- 9 Wang X. et al. Bearing-and Relative Distance-Based Fault-Tolerant UAV Formation Control: Leader-First-Follower Redundancy //2025 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS) – IEEE – 2025. – P. 644-649.
- 10 Choi J. et al. NLOS-avoiding and obstacle-adaptive formation control by sharing obstacle information of a leader UAV in multi-UAV system //2023 20th International Conference on Ubiquitous Robots (UR). – IEEE, 2023. – P. 566-570.
- 11 Казанин Д. К. Защита от взаимных столкновений при формировании строя беспилотных летательных аппаратов //Управление большими системами: сборник трудов. – 2017. – № 69. – С. 102-123.
- 12 Zhao W. et al. Research on a global path-planning algorithm for unmanned arial vehicle swarm in three-dimensional space based on theta*–artificial potential field method //Drones – 2024. – Т. 8, №4. – P. 125.
- 13 Belkadi A. et al. Distributed path planning for controlling a fleet of UAVs: Application to a team of quadrotors //IFAC-PapersOnLine. – 2017. – Т. 50, №1. – P.15983-15989.
- 14 Ma B., Ji Y., Fang L. A multi-UAV formation obstacle avoidance method combined with improved simulated annealing and an adaptive artificial potential field //Drones. – 2025. – Т. 9, №6. – P. 390.
- 15 Rahman M., Sarkar N.I., Lutui R. A Survey on Multi-UAV Path Planning: Classification, Algorithms, Open Research Problems, and Future Directions // Drones – 2025. Vol. 9(4), – P.1-32.
- 16 Yedilkhan D. et al. Intelligent obstacle avoidance algorithm for safe urban monitoring with autonomous mobile drones //Journal of Electronic Science and Technology – 2024. – Т.22, №4. – P. 100277.
- 17 Monaco M. et al. Using artificial immune system to prioritize swarm strategies for environmental monitoring //2022 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA). – IEEE, 2022. – P. 104-110.
- 18 Liu Z. et al. Leader–follower UAVs formation control based on a deep Q-network collaborative framework //Scientific Reports – 2024. – Т. 14, №1. – P. 4674.
- 19 Kutpanova Z. et al. multi-UAV path planning for multiple emergency payloads delivery in natural disaster scenarios //Journal of Electronic Science and Technology – 2025. – Т. 23, №2. – P. 100303.
- 20 Kathrein R. et al. Leader-Follower Coordination in UAV Swarms for Autonomous 3D Exploration via Reinforcement Learning //ICINCO (1). – 2025. – P.176-183.

21 Lee M. H., Moon J. Deep reinforcement learning-based model-free path planning and collision avoidance for UAVs: A soft actor–critic with hindsight experience replay approach //Ict Express. – 2023. – T. 9, №3. – P. 403-408.

22 Zhou Y. et al. Real-time route planning of unmanned aerial vehicles based on improved soft actor-critic algorithm //Frontiers in Neurorobotics – 2022. – T.16. – P.1025817.

23 Haider Z. et al. Indoor autonomous multi-uavs: A review of current research, enabling technologies and open challenges //IEEE Access – 2025. – T. 13. – P. 212231-212265.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ГЕОРАДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ НАЗЕМНЫХ МИН С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

ст.преподаватель Мырзабеков К.М.,
преподаватель Ораз Ф.Б.,
преподаватель Кеңес Д.Н.,
доктор философии (PhD),
ассоц. профессор Фазылова А.Р.
НАО «Алматинский университет
энергетики и связи им. Г. Даукеева»,
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Обнаружение противопехотных мин остаётся актуальной задачей военных и гуманитарных технологий. Георадар способен обнаруживать металлические и пластиковые мины, однако высокая частота ложных срабатываний ограничивает его применение. В работе исследуется автоматическая классификация подповерхностных объектов по данным георадара. Разработана модель GPR-сигнала на основе вейвлета Рикера и датасет из 1200 В-сканов пяти классов объектов в трёх типах грунта. Извлечены 17 геометрических, амплитудно-спектральных и текстурных признаков. Сравнение SVM, Random Forest и k-NN показало преимущество Random Forest (AUC = 0.851; Pfa = 0.097). Металлические объекты классифицируются с точностью 95-100%, пластиковые мины – около 40%, что подтверждает необходимость мультисенсорного подхода.

Ключевые слова: георадар, обнаружение мин, разминирование, классификация сигналов, машинное обучение, случайный лес, противопехотные мины, В-скан.

Введение. Наземные мины являются одной из наиболее разрушительных технологий современных вооружённых конфликтов, а их последствия ощущаются ещё десятилетиями после окончания боевых действий. По данным международного мониторинга [1], на территории более чем 60 государств в грунте остаётся свыше 110 миллионов необезвреженных мин, ежегодно уносящих жизни тысяч человек, большинство из которых - мирные жители, включая детей.

С военной точки зрения, надёжное обнаружение заминированных участков критически важно для обеспечения мобильности войск, прохода техники и проведения инженерных работ в зоне боевых действий. С гуманитарной - для возврата сельскохозяйственных земель в оборот и восстановления инфраструктуры в постконфликтных районах. Существующие методы ручного

разминирования крайне медленны (до 20 м² в сутки на одного оператора) и сопряжены с высоким риском для персонала [2].

Традиционный индукционный металлодетектор эффективен лишь против мин с металлическим корпусом. Современные же противопехотные мины (ПМН-2, ПФМ-1, VS-50, РМА-3 и др.) изготавливаются преимущественно из пластика с минимальным содержанием металла, что делает их практически невидимыми для металлодетекторов.

Георадар (Ground Penetrating Radar, GPR) принципиально отличается по физическому принципу: он регистрирует отражение электромагнитной волны от любой границы раздела сред с различной диэлектрической проницаемостью — вне зависимости от наличия металла.

Это делает GPR единственным дистанционным методом, способным обнаруживать пластиковые мины [3, 4]. Однако основной проблемой является высокий уровень ложных срабатываний: камни, корни деревьев, металлический мусор и воздушные полости создают отклики, визуально схожие с сигнатурами мин [5, 6].

В последние годы для решения данной проблемы активно применяются методы машинного обучения, от классических классификаторов до современных свёрточных нейронных сетей [7, 8]. Однако сравнительный анализ таких методов с учётом различных типов грунта и полного спектра ложных целей остаётся недостаточно освещённым в литературе.

Цель настоящей работы - разработать и сравнить алгоритмы автоматической классификации сигналов георадара, позволяющие надёжно отличить наземную мину от ложных целей в различных типах грунта, а также количественно оценить ограничения GPR-детекции пластиковых мин.

Основная часть. Модель GPR-сигнала. В связи с ограниченной доступностью реальных GPR-данных с верифицированной разметкой, в работе использовалась аналитическая модель В-скана, основанная на суперпозиции импульсов Рикера [9] с параметрами, определяемыми физическими свойствами объекта и среды. Зондирующий импульс моделировался вейвлетом Рикера с центральной частотой $f_c = 1.5$ ГГц, частотой дискретизации $f_s = 20$ ГГц. Число трейсов в одном В-скане - 120 с шагом сканирования $dx = 5$ мм. Коэффициент отражения на границе сред рассчитывался по формуле Френеля: $R = (\sqrt{\varepsilon_1} - \sqrt{\varepsilon_2}) / (\sqrt{\varepsilon_1} + \sqrt{\varepsilon_2})$. Для металлических объектов $R = -1$. Затухание в грунте моделировалось экспоненциальным законом с учётом проводимости σ [10].

Сгенерирован датасет из 1200 В-сканов: пять классов объектов в трёх типах грунта по 80 реализаций каждый. Для каждого класса варьировались глубина залегания, размер и ориентация объекта в физически обоснованных диапазонах. Модель включала прямую волну от поверхности, случайный клаттер (3-8 неоднородностей) и аддитивный гауссов шум. Параметры типов грунта приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры моделируемых типов грунта

Грунт	ϵ_r	σ , S/m	v , 10^8 м/с
Сухой песок	4	0.001	1.50
Влажн. суглинок	12	0.05	0.87
Глина	20	0.1	0.67

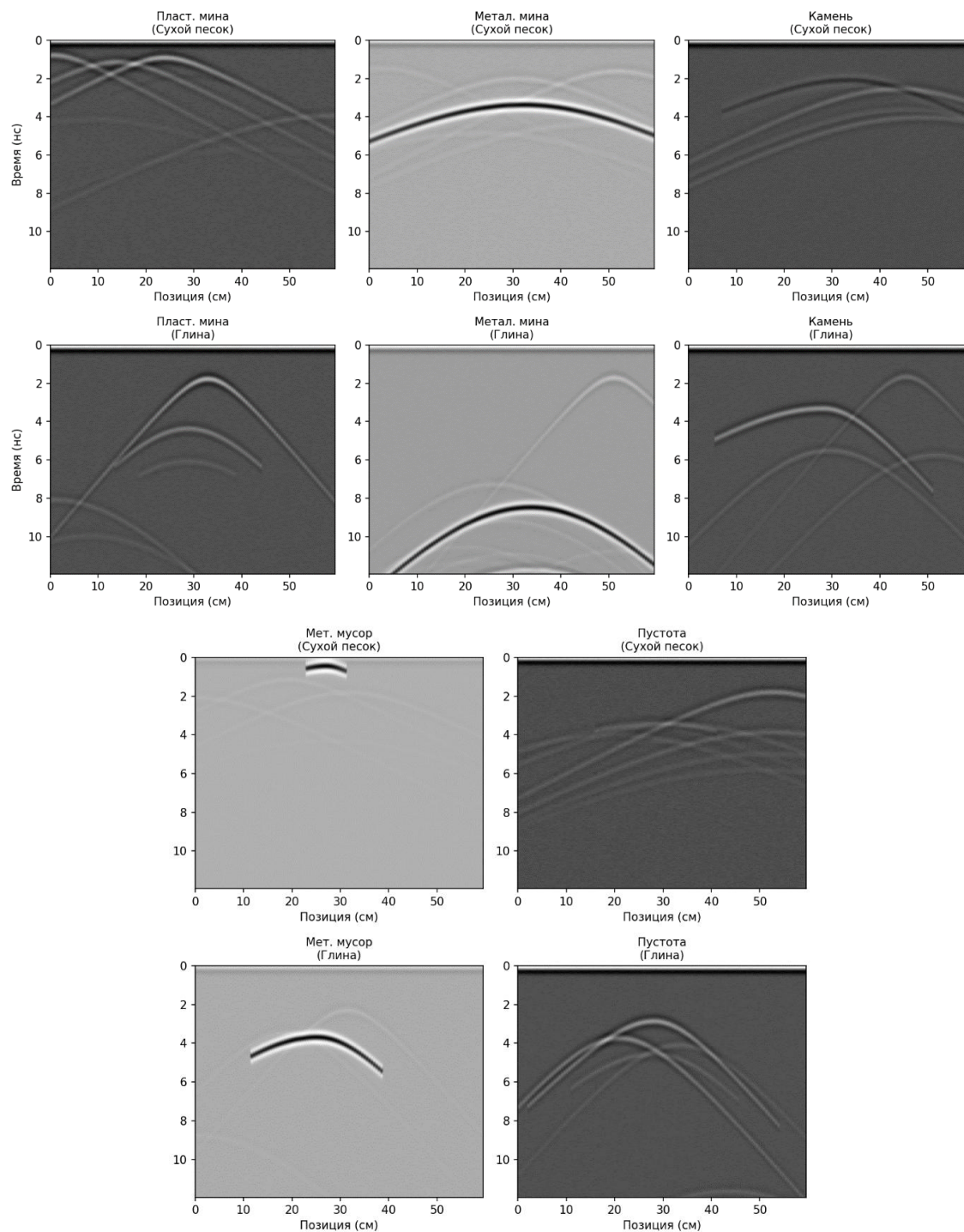


Рисунок 1 – Примеры синтетических В-сканов для пяти классов объектов в сухом песке (верх) и глине (низ)

На рисунке 1 видны ключевые различия: металлические объекты дают

интенсивные отклики, пластиковая мина – слабый сигнал, камень – асимметричную гиперболу. В глине все отклики ослабевают и размываются вследствие повышенной проводимости.

Предобработка сигналов

Каждый В-скан проходил четырёхэтапный конвейер предобработки. На первом этапе выполнялось удаление прямой волны путём вычитания среднего трейса. На втором – полосовая фильтрация фильтром Баттерворта 4-го порядка с полосой 200 МГц-3 ГГц. На третьем – компенсация затухания (TGC) линейным усилением по времени с коэффициентом от 1 до 5. На четвёртом – нормализация к единичному максимуму.

Детектор областей интереса

Для автоматического определения областей интереса (ROI) применялся энергетический детектор со скользящим окном. Зона прямой волны (первые 10% по временной оси) маскировалась. Точка с максимальной локальной энергией принималась за центр ROI, после чего вырезался фрагмент размером 64×64 пикселя.

Извлечение признаков

Из каждого ROI извлекалось 17 признаков, разделённых на три группы:

Группа А – геометрические (5 признаков): ширина отклика по уровню – 6 дБ; симметрия (отношение энергии левой и правой половин ROI); вертикальный размер отклика; наличие двойного отклика; расстояние между пиками двойного отклика. Эти признаки отражают форму и размер объекта.

Группа В – амплитудно-спектральные (5 признаков): пиковая амплитуда; полная энергия ROI; нормализованная центральная частота спектра; ширина полосы по уровню – 3 дБ; логарифм отношения энергии в низкочастотной и высокочастотной полосах.

Группа С – текстурные (7 признаков): спектральная энтропия; четыре признака матрицы совместной встречаемости (GLCM) – контраст, корреляция, энергия, однородность [11,12]; асимметрия (skewness) и эксцесс (kurtosis) распределения амплитуд.

Алгоритмы классификации

Сравнивались три классификатора. Метод опорных векторов (SVM) с радиальной базисной функцией и параметром $C = 10$. Random Forest [13] с 200 деревьями и минимальным размером листа 5. Метод k ближайших соседей (k-NN) с $k = 7$ и евклидовой метрикой.

Признаки нормализовались методом z-score. Данные разделялись в пропорции 70/30 (840 обучающих и 360 тестовых образцов) со стратификацией по классам. Классификация выполнялась в двух постановках: бинарной («мина»/«не мина») и мультиклассовой (5 классов).

Результаты

Бинарная классификация

Результаты бинарной классификации представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты бинарной классификации

Метод	AUC	P_d	P_{fa}	F1
SVM (RBF)	0.837	0.660	0.130	0.712
Random Forest	0.851	0.625	0.097	0.706
$k - NN$	0.808	0.625	0.148	0.677

Наилучшее значение AUC показал Random Forest – 0.851, с наименьшей вероятностью ложной тревоги $P_{fa} = 0.097$. Однако вероятность обнаружения $P_d = 0.625$ остаётся существенно ниже требуемого уровня 0.95, что указывает на пропуск около 37% мин.

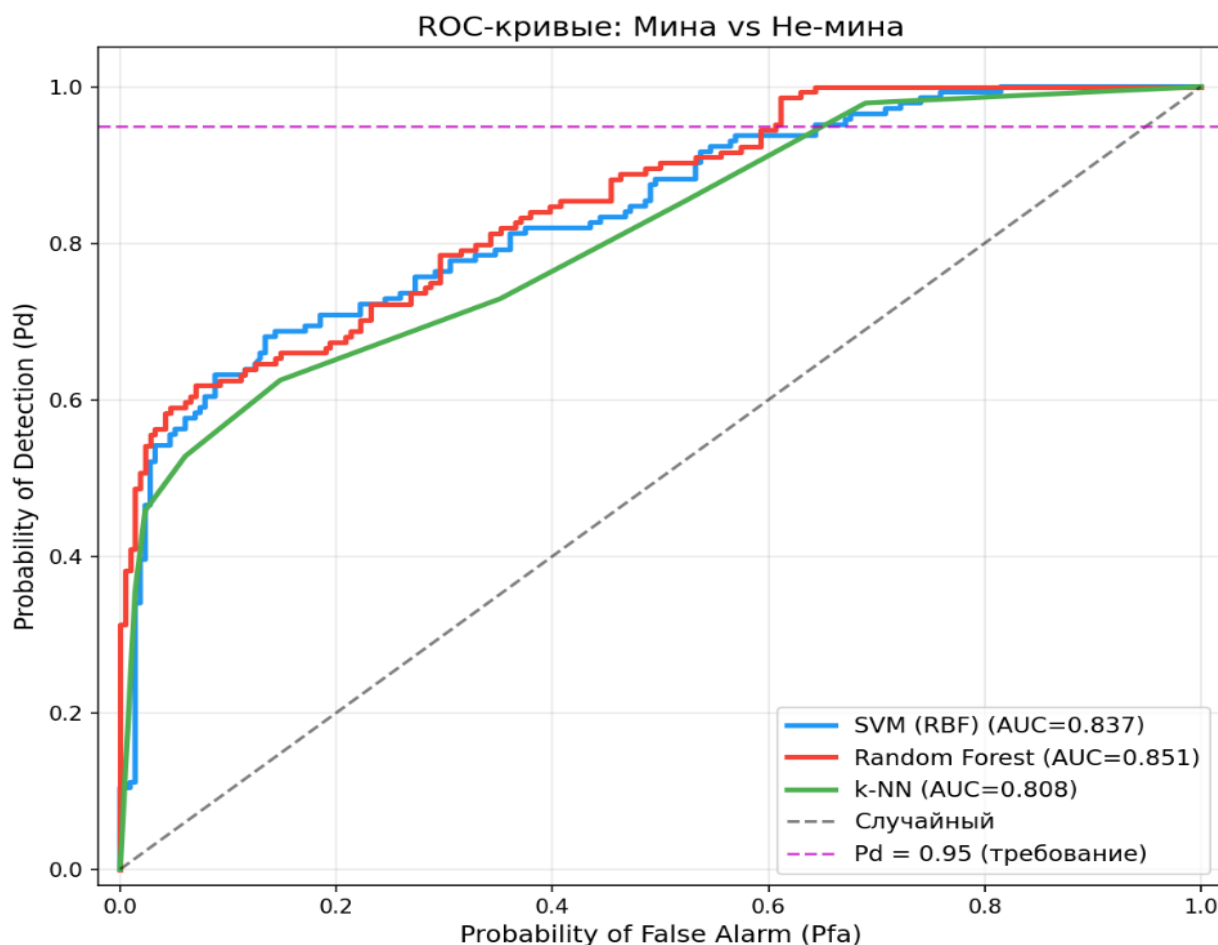


Рисунок 2 – ROC-кривые трёх классификаторов

ROC-кривые (рисунок 2) показывают, что для достижения $P_d = 0.95$ необходимо повысить чувствительность, что увеличит P_{fa} до 40-50%. Матрицы ошибок (рисунок 3) подтверждают: Random Forest имеет наилучший баланс между правильно классифицированными минами и не-минами.

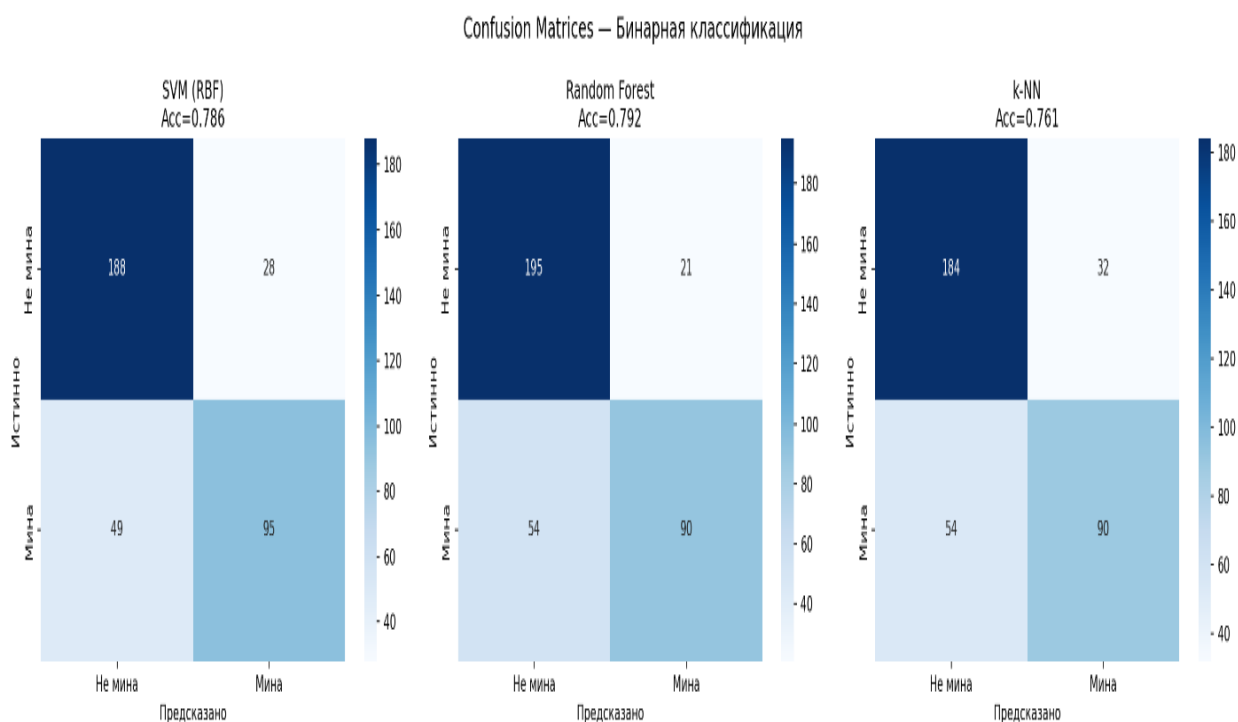


Рисунок 3 – Матрицы ошибок бинарной классификации

Мультиклассовая классификация

Классификация по пяти классам выявила резкое расслоение объектов по сложности (таблица 3).

Таблица 3 – Точность по классам (Random Forest)

Класс	Precision	Recall	F1
Пласт. мина	0.41	0.40	0.41
Метал. мина	0.95	1.00	0.97
Камень	0.33	0.38	0.35
Мет. мусор	0.99	0.95	0.97
Пустота	0.48	0.42	0.45

Металлические объекты (мина и мусор) классифицируются с точностью 95-100%. Сильный отклик от проводящей поверхности и различие в геометрии (мина – крупная и симметричная, мусор – мелкий и асимметричный) обеспечивают их надёжное разделение [14].

Неметаллические объекты (пластиковая мина, камень, пустота) классифицируются с точностью лишь 35-45%. Критическая проблема – пластиковая мина путается с камнем в 38.9% случаев и с пустотой в 20.8% случаев. Причина – близость диэлектрических проницаемостей ($\epsilon = 3.5-7$ для мины против $\epsilon = 5-9$ для камня).

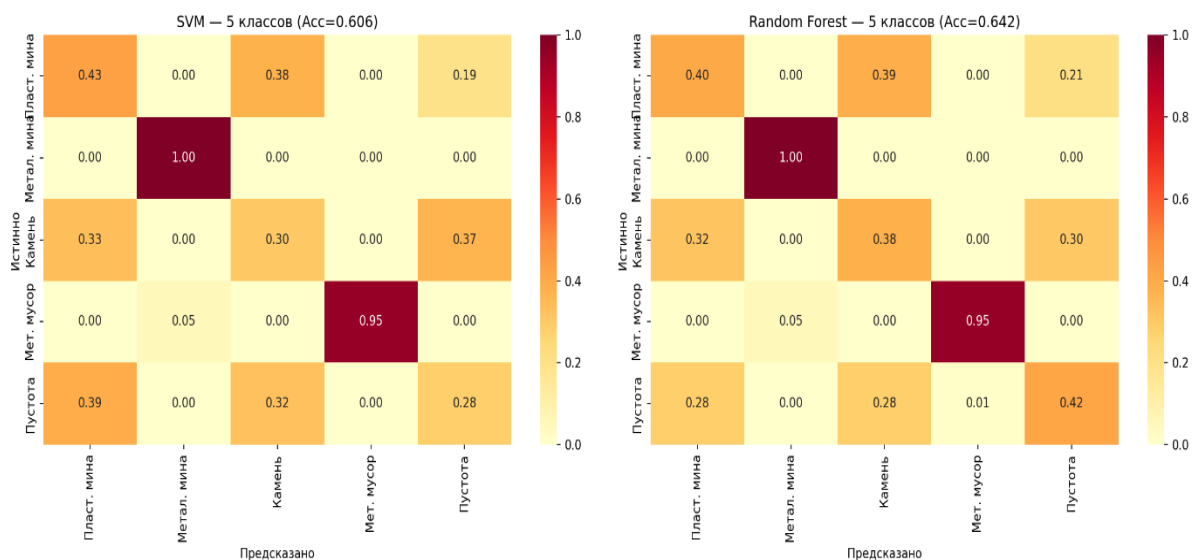


Рисунок 4 – Матрицы ошибок мультиклассовой классификации

Важность признаков

Анализ важности признаков методом permutation importance из Random Forest представлен на рисунке 5.

Наиболее информативными оказались: вертикальный размер отклика (0.109), асимметрия распределения амплитуд (0.099), полная энергия ROI (0.097), однородность GLCM (0.093) и симметрия гиперболы (0.088).

Влияние типа грунта (таблица 4).

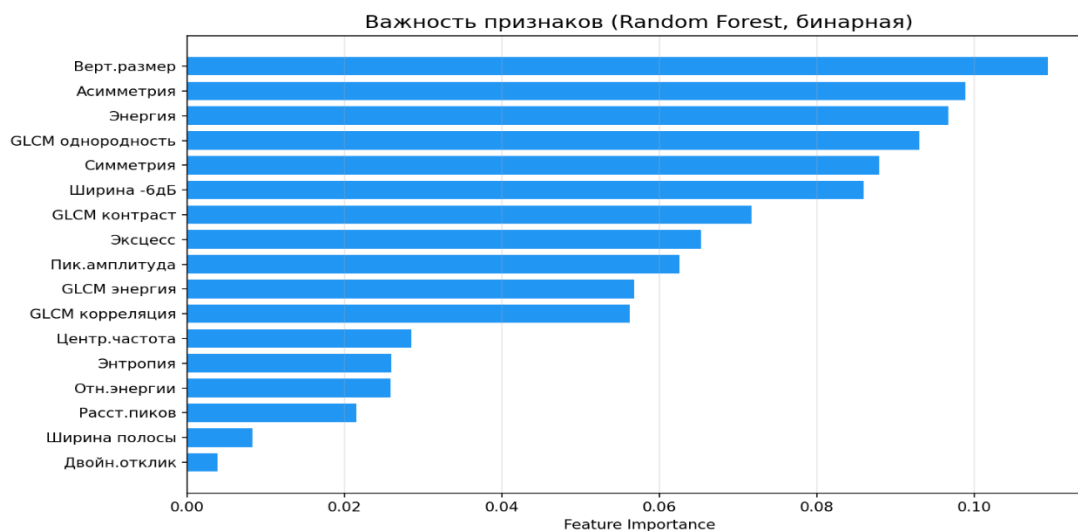


Рисунок 5 – Важность признаков (Random Forest)

Таблица 4 –Результаты по типам грунта (Random Forest)

Грунт	P_d	P_{fa}	AUC
Сухой песок	0.500	0.015	0.844
Влажн. суглинок	0.542	0.081	0.814
Глина	0.820	0.182	0.909

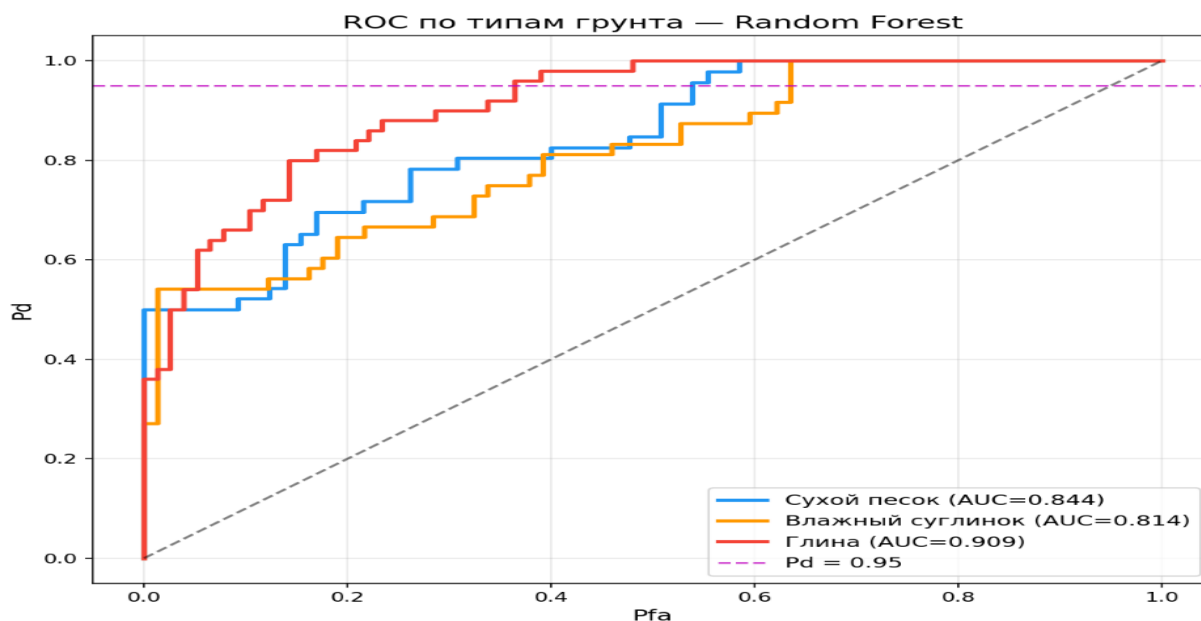


Рисунок 6 – ROC-кривые по типам грунта

Установлена нетривиальная зависимость: наивысший AUC (0.909) достигается в глине, а наименьший (0.814) – во влажном суглинке. Это сопровождается ростом P_{fa} в глине до 0.182. Сильное затухание в глине подавляет как клаттер, так и слабые отклики, что улучшает разделимость оставшихся сигналов ценой потери части полезной информации.

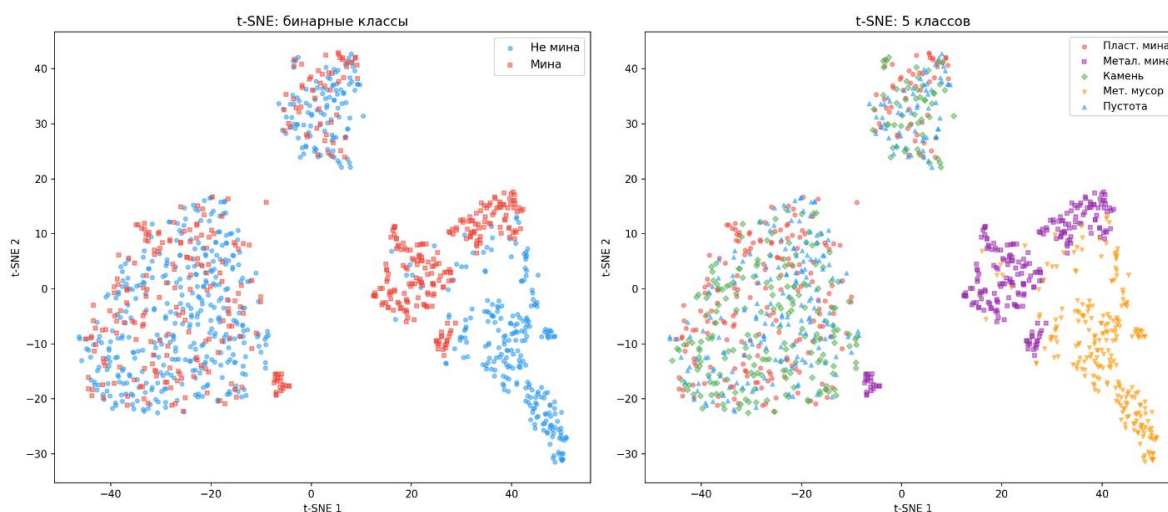


Рисунок 7 – t-SNE визуализация пространства признаков

Визуализация t-SNE (рисунок 7) подтверждает количественные выводы: на правом графике чётко обособлены кластеры металлической мины и металлического мусора, тогда как пластиковая мина, камень и пустота образуют сильно перемешанную область.

Полученные результаты качественно согласуются с данными литературы по GPR-детекции мин. Ключевой вывод: металлические объекты надёжно обнаруживаются одним только GPR, тогда как пластиковые мины представляют

фундаментальную физическую проблему – их диэлектрическая проницаемость близка к свойствам естественных подповерхностных объектов, что минимизирует контраст отражения. Это ограничение принципиально не может быть полностью преодолено алгоритмическими средствами.

С практической точки зрения результаты имеют двойственное значение. С одной стороны, для военных задач, связанных с обнаружением противотанковых мин (в подавляющем большинстве металлических), предложенный подход даёт высокую точность (до 100%). С другой – для гуманитарного разминирования пластиковых противопехотных мин одного GPR недостаточно.

Рекомендуемая архитектура комплексной системы обнаружения должна включать: (1) GPR для обнаружения аномалий и классификации металлических объектов; (2) инфракрасный сенсор для выявления температурных контрастов над недавно установленными минами; (3) металлодетектор как независимый подтверждающий канал; (4) алгоритм data fusion для объединения показаний сенсоров.

Ограничения работы. Во-первых, использовалась аналитическая модель GPR, не учитывающая дифракцию на краях объектов и многократные переотражения; полноволновое моделирование средствами gprMax даст более реалистичные данные. Во-вторых, исследован лишь один объект на В-скан при однородном грунте; реальные сценарии предполагают множественные цели и слоистость. В-третьих, не исследованы свёрточные нейронные сети, способные извлекать более сложные пространственные признаки.

Заключение. В работе проведено исследование автоматической классификации сигналов георадара для обнаружения наземных мин. Сгенерирован датасет из 1200 В-сканов для пяти классов подповерхностных объектов в трёх типах грунта. Реализован конвейер предобработки и извлечения 17 признаков. Проведён сравнительный анализ трёх классификаторов.

Основные результаты:

- Random Forest обеспечивает наилучшее соотношение качества ($AUC = 0.851$, $P_{fa} = 0.097$);
- металлические объекты классифицируются с точностью 95-100%;
- пластиковые мины классифицируются с точностью лишь 40%, главным образом путаясь с камнями;
- наиболее информативными признаками являются вертикальный размер отклика, симметрия гиперболы и энергия ROI;
- тип грунта существенно влияет на P_{fa} : от 0.015 в сухом песке до 0.182 в глине.

Результаты количественно подтверждают необходимость мультисенсорного подхода к обнаружению современных пластиковых мин и могут быть использованы при проектировании комплексных систем разминирования военного и гуманитарного назначения.

Направления дальнейших исследований: применение свёрточных нейронных сетей, переход на полноволновое моделирование (gprMax),

валидация на реальных данных (датасет MIRA от JRC Ispra), разработка алгоритмов мультисенсорной fusion.

Благодарность. Статья подготовлена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (BR27195331 «Разработать многофункциональную роботизированную систему военного назначения с возможностью поиска и обезвреживания мин, боеприпасов и самодельных устройств»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 International Campaign to Ban Landmines. – URL:<https://www.the-monitor.org/en-gb/reports/2023/> (дата обращения 01.09.2026).

2 GICHD. A Guide to Landmine Action. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. – URL:https://www-gichd-org.translate.goog/publications-resources/2014/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr (дата обращения 03.09.2026).

3 Daniels D.J. Ground Penetrating Radar. – London.: Institution of Engineering and Technology, 2004. – 752p. – DOI: 10.1049/PBRA015E.

4 Sato M., Takahashi K., Kawakami T. The development of the hand-held dual-sensor ALIS // Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XII. – SPIE, 2007. – Vol. 6553. – DOI: 10.1117/12.719602.

5 Feng, X., & Sato, M. (2012). Landmine detection by a 2D GPR system. In 2012 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR) // IEEE – 1973. – P.871-875 – DOI: 10.1109/ICGPR.2012.6254962.

6 Ho K.C., Collins L.M., Huettel L.G., Gader P.D. Discrimination mode processing for landmine detection using ground penetrating radar. In Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets IX // SPIE. – 2004. – Vol. 5415. – P. 394-405. – DOI:10.1117/12.540860.

7 Torbati A. H., Witte L. C. Feature extraction and classification of buried objects using ground penetrating radar. In 2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting // IEEE. – 2015. – P. 1736-1737. – DOI:10.1109/APS.2015.7305163.

8 Lameri S. Buried object detection through the analysis of B-scan GPR data. 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR) // IEEE. – 2017. – P. 1-5. – doi: 10.1109/IWAGPR.2017.7980635.

9 Nobes D. C. Ground penetrating radar response from voids: A demonstration using a simple model // NDT & E International. – 2017. – Vol.91. – P.47-53. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2017.05.007.

10 Grimm R. E., Heggy E., Clifford S., Dinwiddie C., McGinnis R., Farrell D. Absorption and scattering in ground-penetrating radar: Analysis of the Bishop Tuff // Journal of Geophysical Research – 2006. – Vol.111 (E6). – P.1-15. – DOI:10.1029/2005je002619.

11 Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – 1973. – Vol. SMC-3(6), P. 610–621. – DOI:10.1109/TSMC.1973.4309314.

12 Pasolli E., Melgani F., Donelli M. Automatic Classification of Landmine Detection from GPR Data Using SVM //IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium – 2006. – P. 1361-1364. – DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423.

13 Breiman L. Random Forests // Machine Learning – 2001. – Vol.45 (1). – P.1-15. – DOI:10.1029/2005je002619.

14 Šimić M., Ambruš, D., Bilas V. Landmine Identification from Pulse Induction Metal Detector Data Using Machine Learning// IEEE Sensors Letters – 2023. – Vol. 7(9). – P 1-4. – doi:10.1109/lsens.2023.3307091

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В КАЧЕСТВЕ РЕТРАНСЛЯТОРОВ СВЯЗИ: ОБЗОР И ПЕРСПЕКТИВЫ

полковник Мырзагалиев К.Т.
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи,
г. Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Статья посвящена исследованию применения беспилотных летательных аппаратов в качестве ретрансляторов связи. Автором доказано актуальность данного исследования. Раскрыты преимущества использования беспилотных летательных аппаратов в качестве ретрансляторов связи. Приведены технические аспекты их использования. Описаны выводы из анализа применения беспилотников в зоне проведения специальной войсковой операции.

Полученные результаты и выводы представляют собой важный вклад в область применения беспилотных авиационных систем отечественного производства.

По мнению автора в перспективе технологии ретрансляции с использованием беспилотников могут стать ключевым элементом инфраструктуры связи будущего, обеспечивая надежную и доступную связь в любой точке земного шара.

Исследование проведено в рамках программно-целевого финансирования ИРН BR 249005/0224 «Разработка инновационных конструкций по изготовлению и совершенствованию беспилотных авиационных систем специального назначения на основе технологической инфраструктуры высшего военного учебного заведения» (Источник финансирования: Комитет науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, ретранслятор связи, дрон, организация связи, радиоэлектронная борьба, алгоритм, специальная войсковая операция.

Беспилотные летательные аппараты (далее – БПЛА) активно используются в качестве ретрансляторов связи, особенно в условиях, где традиционные методы передачи данных недоступны или неэффективны. Их гибкость, мобильность и возможность быстрого развертывания делают их идеальными для обеспечения связи в чрезвычайных ситуациях, военных операциях и удаленных регионах.

Преимущества использования БПЛА в качестве ретрансляторов [1]:

– гибкость и мобильность: БПЛА могут быстро адаптироваться к изменяющимся условиям, что особенно важно в зонах стихийных бедствий или военных конфликтов;

– эффективность в сложных условиях: в отличие от наземных ретрансляторов, БПЛА обеспечивают связь в условиях, где препятствия, такие как здания или рельеф местности, затрудняют передачу сигнала;

– быстрое развертывание: БПЛА могут быть оперативно развернуты для обеспечения связи в зонах, где инфраструктура разрушена или отсутствует.

Организация связи с применением беспилотных летательных аппаратов в качестве ретрансляторов связи в различных условиях является несомненно актуальным.

Технические аспекты использования БПЛА [1]:

– оптимизация траектории и позиционирования: для повышения эффективности связи используются алгоритмы, такие как Grey Wolf Optimization (GWO) и Particle Swarm Optimization (PSO), которые позволяют определить оптимальные координаты для размещения ретрансляторов;

– иерархическая кластеризация: в случае использования нескольких БПЛА применяются методы иерархической кластеризации для определения оптимальных позиций, что повышает пропускную способность сети;

– адаптивные антенные системы: для компенсации пространственной нестабильности БПЛА используются фазированные антенные решетки (ФАР), которые обеспечивают устойчивую связь даже при отклонении аппарата от заданной траектории.

Примеры применения:

– чрезвычайные ситуации: БПЛА используются для организации связи в зонах стихийных бедствий, где традиционная инфраструктура разрушена. Например, в статье [2], авторами описан способ организации связи с использованием группы БПЛА-ретрансляторов малой дальности;

– военные операции: в условиях противодействия противника БПЛА обеспечивают устойчивую связь, что критически важно для координации действий;

– удаленные регионы: БПЛА могут использоваться для обеспечения связи в применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве ретрансляторов связи стало ключевым элементом современных военных операций, обеспечивая устойчивость коммуникаций, расширение радиуса действия других дронов и преодоление ограничений, связанных с рельефом местности или радиоэлектронной борьбой (РЭБ).

Ниже представлены основные аспекты их использования.

06 февраля 2024 года в России представили новый дрон-конвертоплан для ретрансляции сигнала [3].

Специалисты Обуховского завода создали новый дрон-конвертоплан «Настасья», опытный образец которого представлен на Национальной выставке и форуме инфраструктуры гражданской авиации NAIS 2024 в Москве. Основное назначение беспилотника – ретрансляция сигнала в радиусе 100 км. По словам экспертов, разработка может применяться как для выполнения задач в гражданской сфере, так и для военных целей. В частности, «Настасья» сможет существенно увеличить радиус применения ударных и разведывательных БПЛА.

По словам разработчика, дрон может нести полезную нагрузку до 3 кг различного назначения. Максимальная скорость полёта аппарата, оборудованного пятью двигателями, достигает 100 км/ч.

Эксперты отметили, что дроны-ретрансляторы могут использоваться: для картографирования, мониторинга протяжённых объектов, например трубопроводов, железных и автомобильных дорог. Также их можно применять в военных целях, в частности для разведки на больших расстояниях.

7 ноября 2023 года специалисты Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра РАН представили беспилотник «Ворон», способный оперативно с воздуха расширить зону покрытия связи определенной территории, которая не охвачена мобильной или спутниковой связи [4]. Он может находиться в воздухе до 30 минут (у других подобных дронов этот показатель не превышает 20 минут) и способен нести 1,5-2 кг полезной нагрузки. Беспилотник может использоваться в местности, удалённой от основной телекоммуникационной инфраструктуры, в том числе для проведения спасательных и поисковых работ.

Данный дрон может использоваться для решения различных задач в сложной или труднодоступной местности. «Ворон» может оперативно увеличить зону покрытия беспроводной связи. Затем так же быстро можно вернуть дрон на базу или переместить на другую территорию, где требуется обеспечить связь.

БПЛА «Ворон» поставляется в зону СВО как дроны-ретрансляторы, которые в автономном режиме обеспечивают передачу сигналов управления и функционирование видеоканала для разведчиков с камерой и FPV-аппаратов.

Также он может применяться для картографирования местности и построек.

Также, осенью 2023-го в зоне проведения специальной военной операции завершились испытания комплекса «Воробей», который использует ретранслятор «Облачко» [5]. Дальность полёта дрона достигает 5 км, полезная нагрузка – 2,6 кг. При этом для поддержания связи между оператором и БПЛА используются нестандартные частоты.

Данное устройство крайне полезно на фронте, так как позволяет поддерживать управление дронами вдалеке от точки запуска. Таким образом, увеличивается дистанция их применения, повышается вероятность успешной разведки или поражения целей.

Ретранслятор «Облачко» уже входит в арсенал военнослужащих ВС РФ в зоне СВО.

В сентябре 2023 года стало известно о беспилотнике для ретрансляции сигнала от специалистов Хабаровского радиотехнического завода [6]. Эта модель была разработана для работы в условиях спецоперации. БПЛА — разведчик-ретранслятор сигнала и несколько видов ударных коптеров готовят к отправке в зону проведения СВО.

Российские военные уже успешно применяют в зоне спецоперации многофункциональные беспилотные летательные аппараты Zala. Разработанные концерном «Калашников» дроны оснащены мощным бортовым компьютером, что позволяет передавать большой объём информации во время полёта. В их

базовой комплектации также присутствует ретранслятор, увеличивающий радиус применения комплекса более чем до 100 км.

По данным Минобороны РФ, российские военнослужащие используют эти беспилотники для осуществления полётов на тактическую глубину для разведки, поиска целей и дальнейшей корректировки огня различных видов вооружения. Также при помощи Zala ведётся видеофиксация огневого поражения объектов, живой силы и техники противника.

Автором приведены выводы из анализа применения вышеназванных беспилотников:

1. Увеличение дальности действия ударных и разведывательных БПЛА:

- ретрансляторы на дронах-носителях позволяют управлять FPV-камикадзе и разведывательными аппаратами на расстоянии до 100 км. Например, российский дрон-конвертоплан «Настасья» обеспечивает ретрансляцию сигнала в радиусе 100 км, что критически важно для операций в глубоком тылу противника;

- Российские разработки, такие как система «Облачко», увеличивают дистанцию управления БПЛА до 5 км даже в условиях активного применения РЭБ;

- Российские дроны-матки (например, «Крыло») несут FPV-дроны, которые после отстыковки управляются через ретранслятор, расширяя зону поражения до 20-25 км [7].

2. Преодоление радиоэлектронных помех:

- устойчивые системы связи, такие как российские устройства спецсвязи «Гермес» и «Радуга» для дронов, обеспечивают стабильный канал управления даже в условиях активного РЭБ, так как работают на нестандартных диапазонах частот с возможностью их оперативной смены [7]. Эти системы компенсируют прерывание видеосвязи на финальном участке атаки, передавая управление автономному модулю;

- Российские инженеры внедряют оптическую одометрию, позволяющую дронам ориентироваться без GPS, что снижает зависимость от спутниковых сигналов и повышает устойчивость к глушению;

- использование оптоволоконных каналов в FPV-дронах делает их практически неуязвимыми для традиционных средств РЭБ, хотя такие аппараты менее маневренны и медлительны.

3. Тактические преимущества в условиях сложного рельефа:

- в горной местности или зонах плотной застройки дроны-ретрансляторы создают многоуровневые сети связи. Например, украинские системы, испытанные кластером Brave1, позволяют получать данные из тыла противника, обеспечивая тактическое превосходство;

- Российские комплексы Zala с ретрансляторами используются для корректировки артиллерийского огня на расстоянии более 100 км, что особенно важно при работе с высокоподвижными целями.

Преимущества применения БПЛА как ретранслятора связи:

1) мобильность и гибкость: БПЛА могут быть быстро и оперативно развернуты в различных местах в кризисных ситуациях, обеспечивая временное или постоянное покрытие;

2) стоимость: использование БПЛА может быть дешевле и быстрее, чем установка стационарных вышек связи;

3) высота: БПЛА могут работать на больших высотах, что позволяет обеспечивать более широкое покрытие, чем традиционные ретрансляторы.

Проблемы при применении БПЛА как ретранслятора связи:

1) батареи и продолжительность полета: ограничение по времени полета и мощности аккумуляторов остаются значительным препятствием для длительных операций.

2) безопасность и управления: для эффективной работы таких сетей необходимо обеспечить высокий уровень безопасности и защиты от вмешательства, в том числе от атак на беспилотники.

3) качество связи: в некоторых условиях (например: в плохую погоду или при сильных ветрах) связь может быть нестабильной.

Одним из плюсов СВО стал импульс, который повлиял на развитие отечественных разработок в сфере беспилотной авиации.

Выводы. Таким образом, применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в качестве ретрансляторов связи стало ключевым элементом современных военных операций, обеспечивая устойчивость коммуникаций, расширение радиуса действия других дронов и преодоление ограничений, связанных с рельефом местности или радиоэлектронной борьбой (РЭБ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Каштанов В.В., Немтинов В.А. Беспилотные авиационные системы ретрансляторы современные решения: <https://cyberleninka.ru/article/n/bespilotnye-aviatsionnye-sistemy-retranslyatory-sovremennye-resheniya/viewer> (дата обращения 19.02.2025);

2 Каштанов В.В., Немтинов В.А. Анализ организации связи с применением беспилотных летательных аппаратов малой дальности: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-organizatsii-svyazi-s-primeneniem-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения 19.02.2025);

3 Биятов Е. В России представили новый дрон-конвертоплан для ретрансляции сигнала: <https://dzen.ru/ru/press-center/news/5064/> (Дата обращения 19.02.2025);

4 Ворон_(дрон-рентраслятор): <https://tadviser.ru/index.php/> Produkt: Voron (dron-retranslyator) (Дата обращения 19.02.2025);

5 Бабаев Л. Новосибирское «Облачко» обеспечит стратегическое преимущество РФ в зоне СВО: <https://4s-info.ruturbopages.org/4s-info/ru/s/2023/09/12/article/n/novosibirskoe-oblachko-obespechit-strategicheskoe-preimushhestvo-rf-v-zone-svo/> (дата обращения 19.02.2025);

6 Электронный ресурс: Уникальный российский беспилотник-рентранслятор запущен в серию: <https://tvzvezda.ru/news/201706201330-98gh.htm> (Дата обращения 19.02.2025);

7 Леонова Ю., Федоров А. Прочная связь: дроны получили помехоустойчивый канал управления: [https://iz-ru.turbopages.org/turbo/is.ru/s/1797816/ulia-leonova-andrei-fedorov/procnaa-svaz-drony-polucili-pomehoustoicivyi-kanal-upravlenia](https://iz.ru.turbopages.org/turbo/is.ru/s/1797816/ulia-leonova-andrei-fedorov/procnaa-svaz-drony-polucili-pomehoustoicivyi-kanal-upravlenia) (дата обращения 19.02.2025).

РОЛЬ ВЕСТИБУЛЯРНОГО АППАРАТА В ПОДГОТОВКЕ ОПЕРАТОРОВ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

магистрант Мустафаев М.Н.
Академия гражданской авиации
г. Алматы, Республика Казахстан
доктор философии (PhD),
старший научный сотрудник,
полковник Чистяков Н.Ф.
Пограничная академия КНБ РК,
г. Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассматривается роль вестибулярного аппарата в процессе дистанционного управления беспилотными авиационными системами. Актуальность исследования обусловлена стремительным ростом применения беспилотных авиационных систем в различных сферах экономики Республики Казахстан и сопутствующим увеличением требований к надёжности и безопасности их эксплуатации, где человеческий фактор остаётся ключевым звеном.

Ключевые слова: вестибулярный аппарат, беспилотные авиационные системы, человеческий фактор, пространственная дезориентация, VR-тренажеры, сенсорный конфликт, биомониторинг.

Введение. Динамичное внедрение беспилотных авиационных систем (БАС) в гражданский сектор Республики Казахстан – от мониторинга сельскохозяйственных угодий и объектов инфраструктуры до задач картографирования и экологического контроля – выдвигает на первый план вопросы безопасности и эффективности их применения. В отличие от пилотируемой авиации, где пилот физически находится в кабине и его вестибулярный аппарат напрямую участвует в восприятии пространственного положения летательного аппарата, оператор БАС дистанционно управляет техникой, опираясь преимущественно на визуальную информацию с камер и телеметрические данные [1, 2].

Эта принципиальная разница порождает скрытую, но системно значимую проблему: влияние физиологических особенностей человека, в частности состояния и функционирования вестибулярного аппарата, на качество принятия решений и точность моторных действий оператора. В условиях сенсорного конфликта, когда зрительная система передаёт информацию о движении, а вестибулярная – нет (или наоборот, как при использовании VR-очков), у оператора может возникать пространственная дезориентация, объективно повышающая риск авиационных инцидентов [3].

Целью данной статьи является комплексный анализ роли вестибулярного аппарата в процессе управления БАС, оценка связанных с этим физиологических рисков и формулировка практических рекомендаций для системы подготовки операторов в Казахстане. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) рассмотреть физиологические основы работы вестибулярной системы в контексте дистанционного управления;
- 2) проанализировать особенности восприятия пространства оператором БАС, обусловленные сенсорной депривацией;
- 3) выявить основные виды иллюзий и вестибулярных нагрузок, связанных с вестибулярным аппаратом;
- 4) изучить современные методы тренировки устойчивости операторов и технические решения для снижения негативного влияния сенсорного конфликта.

Методы исследования включали системный анализ и синтез данных из современных источников по авиационной медицине, эргономике человеко-машинного взаимодействия, научных публикаций, посвящённых подготовке операторов БАС, а также обзор опыта международных организаций (ИКАО, NASA) и национальных исследований.

Для глубокого понимания механизмов, лежащих в основе указанных проблем, необходимо, прежде всего, обратиться к физиологическим основам работы вестибулярной системы, что и составляет содержание первой задачи исследования.

Основная часть. Вестибулярный аппарат, расположенный во внутреннем ухе, является ключевым сенсорным органом, отвечающим за поддержание равновесия, восприятие положения головы и тела в пространстве, а также регистрацию линейных и угловых ускорений. Он состоит из системы полукружных каналов, реагирующих на повороты, и отолитовых органов, чувствительных к гравитации и прямолинейным движениям [4]. В обычных условиях информация от вестибулярной, зрительной и проприоцептивной систем интегрируется в центральной нервной системе, формируя целостное представление о положении тела.

Для оператора БАС, лишённого прямой физической связи с управляемым аппаратом, значение вестибулярного аппарата приобретает опосредованный, но критически важный характер. Восприятие движения и ориентации БАС происходит исключительно через зрительные каналы (изображение с камер, карты, данные приборов). Однако при интенсивной визуальной нагрузке, особенно с использованием иммерсивных технологий (VR-очки, симуляторы с широким полем обзора), может возникать так называемый сенсорный конфликт. Мозг получает от зрения мощный сигнал о движении и изменении пространственного положения, в то время как вестибулярный аппарат регистрирует отсутствие соответствующих ускорений у самого оператора. Этот диссонанс является основной причиной киберболезни (cybersickness), симптомами которой выступают головокружение, дезориентация, тошнота и повышенная утомляемость, боли в глазах и голове [5].



Рисунок 1 – Последствия сенсорного конфликта

Таким образом, понимание принципов работы вестибулярной системы и природы сенсорного конфликта закладывает необходимую основу для анализа того, как эти физиологические ограничения проявляются в специфических условиях дистанционного управления БАС. Перейдём к рассмотрению особенностей восприятия пространства оператором, работающим вне кабины летательного аппарата.

Особенности управления БАС и сенсорные ограничения. Управление БАС кардинально отличается от пилотирования традиционных летательных аппаратов. Оператор находится вне кабины, что исключает прямое воздействие аэродинамических сил на его вестибулярный аппарат.

Основными каналами получения информации становятся зрение (основной), слух (звуковые оповещения, шум двигателей на аудиоканале) и тактильные ощущения (вибрация пульта). Отсутствие прямой вестибулярной стимуляции создаёт уникальную ситуацию: для поддержания пространственного восприятия мозг вынужден полагаться на менее естественные и более затратные когнитивные процессы визуальной интерпретации данных.

Эта когнитивная нагрузка усугубляется в сложных условиях: при плохой видимости, выполнении маневров с высокой угловой скоростью, длительных полётах. В такие моменты риск пространственной иллюзии максимален. Например, при наблюдении за креном БАС через камеру, особенно если горизонт не виден, у оператора может сформироваться ложное ощущение собственного наклона, что провоцирует ошибочные корректирующие действия. Описанные сенсорные ограничения и повышенная когнитивная нагрузка не являются нейтральными факторами. Они закономерно приводят к конкретным негативным эффектам, влияющим на функциональное состояние и надёжность оператора. Рассмотрим подробнее, какие именно иллюзии и физиологические

нагрузки возникают в результате воздействия на вестибулярную систему при дистанционном управлении.

Влияние вестибулярного аппарата на функциональное состояние оператора. Нагрузка на вестибулярную систему оператора БАС проявляется в двух основных аспектах: возникновении иллюзий и общем физиологическом стрессе.

Иллюзии и ошибки восприятия. Наиболее опасным феноменом является пространственная дезориентация (ПД). В авиационной медицине выделяют три её типа: эгоцентрическая, аллоцентрическая и топографическая. Для операторов БАС наиболее характерен эгоцентрический тип, когда оператор не осознаёт расхождения между воспринимаемым и реальным положением аппарата. Конфликт между зрительной и вестибулярной информацией может приводить к специфическим иллюзиям, таким как иллюзия «соматогирического» поворота, когда кажущийся поворот БАС воспринимается как поворот собственного тела [6].

Физиологические нагрузки. Длительная работа в условиях сенсорного конфликта приводит к повышенной утомляемости, снижению концентрации внимания и росту уровня стресса. Могут проявляться вегетативные симптомы: головокружение, головная боль, потливость, тошнота. Эти факторы напрямую снижают профессиональную надёжность оператора, увеличивая вероятность принятия ошибочных решений, особенно в нештатных или аварийных ситуациях. Выявленные риски, связанные с вестибулярным аппаратом, указывают на острую необходимость разработки и внедрения специальных методов подготовки, а также технических решений, направленных на минимизацию данных негативных эффектов. Этим практическим аспектам посвящено изучение следующей задачи.

Практические аспекты подготовки операторов и технические решения. Учёт физиологических особенностей, связанных с вестибулярным аппаратом, должен быть заложен в основу подготовки операторов БАС в Казахстане.

Подготовка и тренировка. Ключевым инструментом являются тренажеры и симуляторы, особенно с элементами виртуальной реальности. Их задача – не только отработать навыки пилотирования, но и целенаправленно развивать устойчивость к сенсорным конфликтам.

Программы должны включать постепенное увеличение сложности визуальных сценариев, провоцирующих дезориентацию, что позволит выработать у операторов когнитивные стратегии компенсации. Важным элементом является послетренировочный анализ действий с акцентом на моменты потенциальной пространственной иллюзии. Примером такого подхода может служить российский тренажер «Виарус», заявляющий об укреплении вестибулярного аппарата оператора [7], чей опыт требует изучения и возможной адаптации. Наряду с тренировочными программами, значительный потенциал для снижения нагрузки на оператора и профилактики дезориентации заложен в совершенствовании самих средств управления. Ключевым направлением здесь является эргономика интерфейсов.

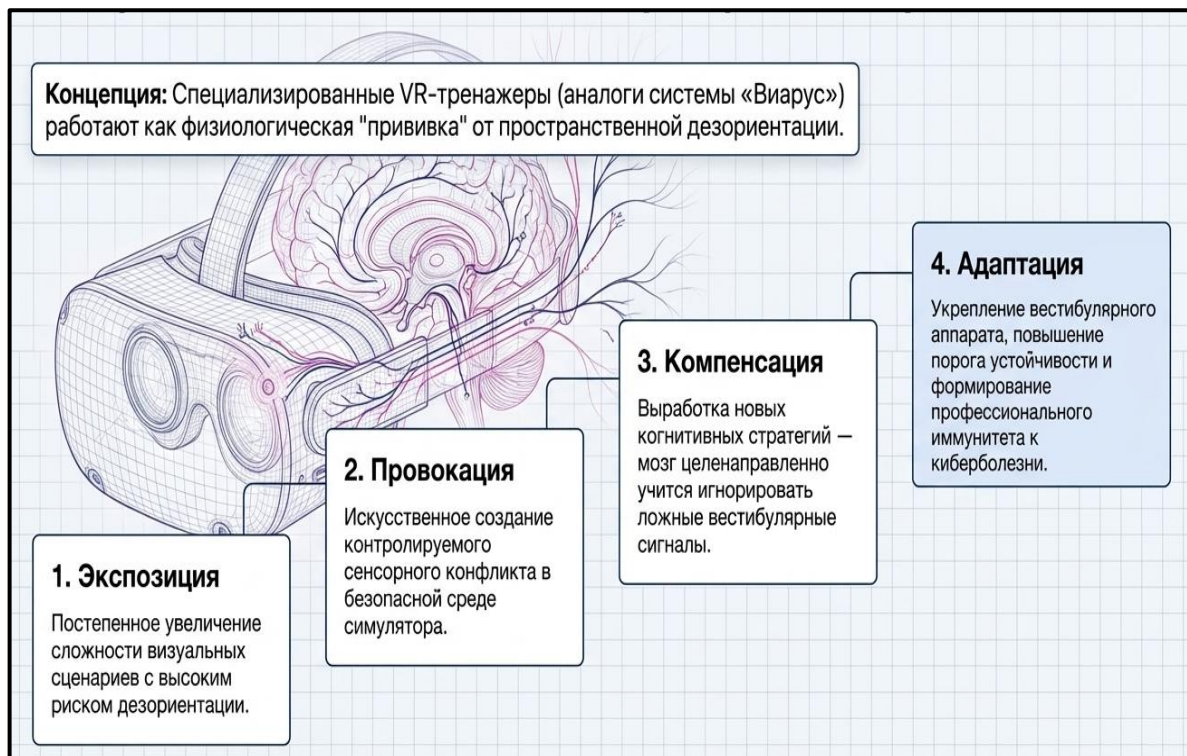


Рисунок 2 – Порядок ввода усложнений

Технические решения. Снижению нагрузки на оператора способствует эргономика интерфейсов управления. Это включает:

- оптимизацию визуального отображения информации (чёткий искусственный горизонт, интуитивные пиктограммы пространственного положения).

- внедрение мультимодальной обратной связи: тактильной (вибрация пульта при приближении к ограничениям) и звуковой.

- биомониторинг состояния оператора в реальном времени. Контроль параметров, таких как частота сердечных сокращений, кожно-гальваническая реакция, движения глаз, может позволить системе оценивать уровень стресса и утомления, выдавая предупреждения или упрощая интерфейс в критические моменты [8]. Разработка национальной системы подготовки операторов БАС не может осуществляться в отрыве от мирового опыта. Поэтому обратимся к анализу подходов ведущих международных организаций и исследовательских центров, а также оценим потенциал казахстанской научной школы, который позволит сформировать комплексное видение дальнейшего развития данного направления.

Международный опыт и казахстанский контекст. Проблема человеческого фактора, включая физиологические аспекты, давно находится в фокусе внимания международных организаций. ICAO и NASA накопили значительный опыт исследований в области авиационной медицины и эргономики кабин, часть которого применима и к дистанционному управлению [9]. В Казахстане имеется собственная научная школа в области авиационной и космической медицины, чьи наработки могут быть успешно экстраполированы на сферу БАС.

Актуальной задачей является инициирование целевых исследований на базе казахстанских медицинских и технических университетов, направленных на изучение специфики вестибулярных нагрузок у операторов БАС в условиях, характерных для республики (например, при длительном мониторинге обширных равнинных или горных территорий).



Рисунок 3 – Интеграция международного опыта в казахстанскую систему подготовки операторов БАС

Перспективным направлением является интеграция данных физиологического мониторинга в программы подготовки и сертификации операторов, что соответствует общемировому тренду на персонализацию и повышение безопасности тренировочного процесса.

Заключение. Проведённый анализ позволяет утверждать, что вестибулярный аппарат играет косвенную, но значимую роль, которая должна учитываться в процессе подготовки операторов БАС. Его основное влияние проявляется не в прямом восприятии полёта, а в формировании сенсорных конфликтов при работе с современными интерфейсами, что является источником пространственных иллюзий, повышенной утомляемости и повышения риска авиационных происшествий.

Для Республики Казахстан, активно развивающей отрасль беспилотной авиации, учёт человеческого фактора, в том числе физиологических основ восприятия, становится обязательным условием для построения эффективной и безопасной системы применения БАС.

Внедрение специализированных программ подготовки с использованием VR-тренажеров, направленных на развитие устойчивости к дезориентации, разработка эргономичных интерфейсов управления и внедрение систем биомониторинга – вот ключевые шаги, которые позволят не только повысить качество подготовки кадров, но и минимизировать риски, связанные с человеческим фактором, обеспечивая технологический суверенитет и безопасность воздушного пространства страны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Анализ размера и доли рынка беспилотных летательных аппаратов – тенденции роста и прогнозы (2023–2028 гг.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/drones-market> (дата обращения: 15.03.2025).

2 Благодарящев, И.В. Topical issues of personnel training in the field of unmanned aircraft systems / И.В. Благодарящев, М.А. Киселев, Р.С. Наумов, В.С. Шапкин // Научный Вестник МГТУ ГА. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 8-19. – DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-4-8-19.

3 Stanney, K. Identifying causes of and solutions for cybersickness in immersive technology / K. Stanney, et al. // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. – 2021. – Vol. 27, No. 11. – P.4234-4244. – DOI: 10.1109/TVCG.2021.3101567.

4 Зинченко, Ю.П. Психофизиологические основы профессиональной надежности операторов беспилотных авиационных систем / Ю.П. Зинченко, В.В. Львов // Национальный психологический журнал. – 2022. – № 1(45). – С. 3-12. – DOI: 10.11621/npj.2022.0101.

5 Stanney, K. Virtual reality-induced symptoms and effects (VRISE) / K. Stanney, et al. // Presence: Teleoperators and Virtual Environments. – 2020. – Vol. 29. – P.1-20. – DOI: 10.1162/pres_a_00365.

6 ICAO. Annex 1 to the Convention on International Civil Aviation. Personnel Licensing. – 13th ed. – Montreal: International Civil Aviation Organization, 2023. – 168 p.

7 АО «РТ-Техприемка». Инновационный VR-тренажер для операторов БПЛА «Виарус» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rt-techpriemka.ru> (дата обращения: 15.03.2025).

8 Fairclough, S.H. Fundamentals of physiological computing / S.H. Fairclough // Interacting with Computers. – 2021. – Vol. 33, No. 3. – P.215-233. – DOI: 10.1093/iwc/iwab034.

9 NASA. Human Systems Integration (HSI) Practitioner's Guide. – Washington, D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 2021. – 120 p.

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН: АНАЛИЗ ПРОБЕЛОВ И АДАПТАЦИЯ СТАНДАРТОВ НАТО

магистрант Мустафаев М.Н.
Академия гражданской авиации,
г. Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Статья подготовлена по результатам исследования, посвященного проблемам интеграции специфических беспилотных авиационных систем в гражданское воздушное пространство Республики Казахстан. В работе анализируется нормативный вакуум, сложившийся в отношении аппаратов с максимальной взлетной массой более 750 кг. Сравнительный анализ с международным стандартом выявил ключевые пробелы в национальном законодательстве. Автором предложена многокритериальная классификация, адаптирован риск-ориентированный подход с количественными критериями безопасности, а также разработаны рекомендации по внедрению требований к каналам связи и наземным станциям управления.

Ключевые слова: беспилотные авиационные системы, техническое регулирование, риск-ориентированный подход, летная годность, Республика Казахстан, сертификация.

Введение. Современный этап развития гражданской авиации характеризуется стремительной интеграцией беспилотных авиационных систем (далее – БАС) в коммерческий сектор. 19 мая 2026 года впервые в Казахстане состоялся полет электрического вертикально-взлетающего аппарата китайской компании AutoFlight массой 2000 кг. Это событие обозначило необходимость комплексной оценки готовности национальной системы технического регулирования к интеграции беспилотных авиационных систем (БАС) нового поколения. В то время как для аппаратов массой до 750 кг в стране уже сформирована определенная нормативная база, в отношении систем большей массы детальные требования к летной годности в казахстанском законодательстве на сегодняшний день полностью отсутствуют [1]. Данная ситуация создает парадокс: экономика готова к внедрению технологий, а регуляторная среда – нет, что тормозит развитие логистики, мониторинга инфраструктуры и сельского хозяйства в стране [2].

Основной проблемой является нормативный вакуум для «специфических» БАС (с максимальной взлетной массой более 750 кг). Действующая нормативно-правовая база, регламентированная Правилами использования беспилотных авиационных систем, ограничивает свое действие аппаратами до 750 кг. Для более тяжелых систем отсутствуют:

– требования к конструкции и системам;

- количественные критерии безопасности (вероятностные оценки отказов);
- требования к каналам связи (Command and Control Link) и наземным станциям управления (GCS). В результате легальная эксплуатация тяжелых БАС в Казахстане невозможна, что препятствует привлечению инвестиций и внедрению передовых технологий [3].

Вопросы технического регулирования БАС активно разрабатываются в международной практике. Базовые принципы эквивалентности безопасности заложены в документах ИКАО (Циркуляр 328) [4]. Наиболее проработанным стандартом для тяжелых систем является АЕР-4671 (STANAG 4671) НАТО, устанавливающий требования к летной годности для аппаратов массой от 150 до 20 000 кг [5]. В Европейском Союзе действует трехуровневая классификация (Регламенты 2019/945 и 2019/947) с методологией оценки рисков SORA [6]. В США используется гибкая система разрешений (FAA Part 107), а Китай и Россия применяют STANAG-4671, как основу для национальных стандартов [7, 8].

В казахстанской науке проблематика технического регулирования тяжелых БАС ранее не была предметом комплексного исследования. Отдельные аспекты применения беспилотных систем рассматривались в работе Бердымуратова Д.Б. и других авторов [9-10], однако системный анализ нормативно-правовых пробелов применительно к аппаратам массой более 750 кг до настоящего времени не проводился. В диссертационном исследовании Кошманова В.А. рассматриваются вопросы подготовки внешних пилотов, что косвенно связано с проблематикой регулирования, однако технические аспекты сертификации остаются за рамками его работы [11]. Таким образом, сохраняется необходимость в исследовании, посвященном адаптации международных стандартов летной годности к условиям Республики Казахстан.

Цель исследования – на основе анализа международного стандарта АЕР-4671 выявить пробелы в казахстанском законодательстве и разработать научно обоснованные рекомендации по совершенствованию технического регулирования «специфических» БАС с учетом национальной специфики.

Методы исследования. Методологическую основу составили системный подход, сравнительно-правовой анализ, а также риск-ориентированная методология, адаптированная из требований USAR.1309 АЕР-4671. В работе проведен контент-анализ нормативных документов РК и международных стандартов. Эмпирической базой послужили данные о демонстрационных полетах в РК, а также материалы Комитета гражданской авиации и зарубежных регуляторов (EASA, FAA, CAAC).

Основная часть. Анализ национальной нормативной базы и ее сопоставление с международными требованиями позволяет реконструировать системные недостатки казахстанского регулирования. Процесс выявления пробелов был выстроен как последовательное сравнение с эталонным стандартом АЕР-4671, что позволило выделить критические зоны.

Первый аспект – отсутствие требований к летной годности. В Казахстане Приказ № 706 регламентирует лишь аппараты до 750 кг, тогда как АЕР-4671 устанавливает детальные требования для диапазона 150-20000 кг, охватывая

конструкцию (Subpart C, D), силовую установку (Subpart E) и оборудование (Subpart F) [5]. Это создает ситуацию, когда даже при наличии технической возможности легальная эксплуатация тяжелых дронов невозможна. Как справедливо отмечается в монографии Мосова С.П., «отсутствие детального регулирования для тяжелых беспилотных систем является серьезным барьером для развития отрасли» [2, с. 45-47].

Второй аспект – отсутствие количественных критериев безопасности. В отличие от казахстанских норм, где требования сформулированы качественно («должны быть надежными»), АЕР-4671 в параграфе USAR.1309 вводит строгую классификацию отказов по степени тяжести (Catastrophic, Hazardous, Major, Minor) с вероятностными критериями (менее 1×10^{-9} для катастрофических отказов) [5]. Отсутствие таких критериев в РК не позволяет объективно оценивать риски сложных систем. Кошманов В.А. в своем исследовании подчеркивает, что «оценка профессиональной готовности внешнего пилота должна включать не только технические, но и когнитивные и психологические показатели» [11, с. 135], что также требует количественных критериев для систем в целом.

Третий аспект – пробел в требованиях к каналу управления (C2) и наземной станции (GCS). АЕР-4671 содержит уникальные подчасти (Subpart H и I), регламентирующие задержки передачи данных (латенси), стратегию потери связи, эргономику рабочих мест и отображение информации. В казахстанских нормах эти разделы полностью отсутствуют, что ограничивает возможность выполнения полетов за пределами прямой видимости (BVLOS), наиболее перспективных для Казахстана [3]. Как отмечается в диссертации Кошманова, «управление дистанционно пилотируемой авиационной системой требует особого внимания к качеству каналов связи и человеко-машинному интерфейсу» [11, с. 57].

Четвертый аспект – отсутствие требований к аварийному восстановлению. Стандарт НАТО (USAR.U1412) требует встроенной системы аварийного восстановления (прекращение полета или автоматическая процедура). В Казахстане такие требования не установлены, что создает риски потери управления в нештатных ситуациях.

Пятый аспект – коллизия между нормами для пилотируемой и беспилотной авиации. Действующие Нормы летной годности (Приказ № 367) разработаны для пилотируемых судов и не учитывают специфику БАС (отсутствие пилота, зависимость от каналов связи). Как подчеркивается в исследованиях, «применение норм, разработанных для пилотируемой авиации, к беспилотным системам требует внесения существенных изменений и дополнений» [2, с. 112].

Шестой аспект – отсутствие требований к защите от электромагнитных полей (HIRF) и молниезащите. АЕР-4671 (USAR.1308) предписывает устойчивость систем к внешним электромагнитным воздействиям. В Казахстане такие нормы отсутствуют, что ограничивает эксплуатацию в зонах с интенсивным радиоэлектронным излучением (вблизи аэропортов, военных

объектов, крупных радиотехнических центров) и повышает риски отказов бортового оборудования при воздействии мощных электромагнитных полей.

Седьмой аспект – недостаточные требования к подготовке персонала. Для систем более 750 кг необходима глубокая подготовка операторов (включая психологическую и тренажерную), однако в РК минимальные часы обучения установлены лишь для категорий до 750 кг [12]. Кошманов В.А. в своем исследовании обосновывает, что «подготовка внешних пилотов должна быть модульной и включать отработку нештатных ситуаций на VR-тренажерах» [11, с. 89–92].

Для устранения выявленных пробелов предлагается комплекс мер, основанный на адаптации передового опыта.

Во-первых, предложена новая многокритериальная классификация «специфических» БАС, учитывающая не только массу, но и тип операции (VLOS, EVLOS, BVLOS) и район полета (населенная/ненаселенная территория). Выделены три категории:

- «Ограниченного риска» (750-1500 кг, полеты над ненаселенной территорией в VLOS);
- «Повышенного риска» (1500-5700 кг, BVLOS над территорией с ограниченным риском);
- «Высокого риска» (более 5700 кг, полеты над населенной территорией и перевозка опасных грузов).

Данный подход гармонизирует казахстанскую систему с трехуровневой моделью EASA и принципом соразмерности [6].

Во-вторых, внедрение риск-ориентированного подхода. Предлагается адаптировать методологию USAR.1309: ввести классификацию отказов, установить количественные вероятностные требования (дифференцированные по массе и району эксплуатации) и разработать методику оценки рисков (аналог SORA) для каждой категории. Это позволит объективно оценивать безопасность и принимать обоснованные решения о сертификации. Как отмечается в исследовании корейских ученых, «STANAG-4671 требует одинакового уровня безопасности безотносительно к максимальной взлетной массе, что может быть избыточным для легких и средних систем» [13]. Поэтому в Казахстане целесообразно введение дифференцированных требований.

В-третьих, адаптация требований АЕР-4671 к казахстанским условиям. Рекомендуются дополнить Нормы летной годности разделами, регламентирующими:

- канал управления (задержки, потеря связи, резервирование);
- наземную станцию (эргономика, отображение информации);
- аварийное восстановление (автоматические и ручные процедуры);
- защиту от HIRF и молний.

При этом необходимо учитывать климатические особенности Казахстана (низкие температуры, запыленность, горные районы), что потребует корректировки требований к материалам и системам.

В-четвертых, институциональные меры. Для реализации предлагаемых изменений целесообразно создать в Комитете гражданской авиации специализированный центр компетенций по сертификации БАС, а также запустить пилотный проект по интеграции U-space на базе аэропорта Алматы, с постепенным масштабированием на всю территорию страны.

Заключение. Проведенный анализ наглядно демонстрирует, что технологический прогресс в области беспилотной авиации опережает развитие нормативной базы в Казахстане. Выявленные пробелы – отсутствие требований к летной годности, количественных критериев безопасности, регламентов для каналов связи и наземных станций – создают барьеры для внедрения тяжелых БАС, которые могли бы принести значительный экономический эффект в мониторинге инфраструктуры, логистике и сельском хозяйстве.

Ключевым выводом является необходимость гармонизации казахстанского регулирования с международным стандартом АЕР-4671 (STANAG 4671). Однако адаптация не должна сводиться к простому копированию: предложенная многокритериальная классификация и дифференцированные вероятностные требования учитывают национальную специфику – обширную территорию, низкую плотность населения и климатические условия.

Практическая значимость работы заключается в конкретных рекомендациях для Комитета гражданской авиации: внесение изменений в Приказ № 706, дополнение Норм летной годности разделами по каналам управления и риск-ориентированным подходом, а также создание институциональной инфраструктуры (центр компетенций, пилотный проект U-space).

Реализация предложенных мер позволит:

- повысить уровень безопасности полетов за счет объективной оценки рисков;
- создать предсказуемую регуляторную среду для привлечения инвестиций;
- обеспечить экономический рост через использование БАС в труднодоступных районах.
- интегрировать Казахстан в мировую авиационную систему через взаимное признание сертификатов.

В конечном счете, лидерство в области гражданской беспилотной авиации будет определяться не только техническими прорывами, но и способностью государства создавать гибкую, адаптивную систему регулирования.

Предложенные в статье решения являются шагом в этом направлении и могут быть использованы как основа для модернизации национального законодательства. Разделяя позицию В. А. Кошманова, отметим: интеграция передовых технологий в систему регулирования и подготовки выступает обязательным фактором обеспечения безопасности и продуктивности беспилотных авиационных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Об утверждении Правил использования беспилотных авиационных систем в воздушном пространстве Республики Казахстан: приказ и.о. Министра индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан от 31 декабря 2020 года № 706: зарегистр. в Министерстве юстиции Респ. Казахстан 5 января 2021 г., № 22200: с изм. и доп. по сост. на 12 мая 2023 г. № 340 // ИПС «Әділет»: сайт. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2100022200> (дата обращения: 08.07.2026).

2 Унифицированная базовая модель системы беспилотной авиации (на примере сил обеспечения национальной безопасности) / С.П. Мосов, Р.М. Алтынбеков, С.М. Салий [и др.]; под общ. ред. С.П. Мосова. – Алматы.: Пограничная академия КНБ РК, 2024. – 248 с.

3 Об утверждении норм летной годности гражданских воздушных судов Республики Казахстан: приказ и.о. Министра по инвестициям и развитию Республики Казахстан от 27 марта 2015 года № 367. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011306> (дата обращения: 08.07.2026).

4 ICAO Circular 328. Unmanned Aircraft Systems (UAS). – Montreal: ICAO, 2011. – 72 p.

5 NATO AEP-4671 (STANAG 4671). UAV Systems Airworthiness Requirements (USAR). Edition B Version 1. – Brussels: NATO, 2019.

6 Regulation (EU) 2019/947 on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft. – Brussels: European Commission, 2019. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32019R0947> (дата обращения: 08.07.2026).

7 Federal Aviation Administration. Part 107 – Small Unmanned Aircraft Systems. – Washington: FAA, 2016. – URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/part_107 (дата обращения: 08.07.2026).

8 Об утверждении Федеральных авиационных правил «Форма и порядок оформления сертификата летной годности беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлетной массой более 30 килограммов на основании акта оценки беспилотного гражданского воздушного судна на его соответствие применимым требованиям к летной годности и требованиям в области охраны окружающей среды от воздействия деятельности в области авиации. Порядок приостановления действия и аннулирования сертификата летной годности беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлетной массой более 30 килограммов»: Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 28 февраля 2023 г. № 61 [КонсультантПлюс] / Министерство транспорта Российской Федерации. – Москва, 2023. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_443668/ (дата обращения: 08.07.2026).

9 Бердымуратов Д.Б. Анализ систем идентификации и формирования базы данных беспилотных летательных аппаратов // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. – 2024. – № 10 (127). – С. 4-8.

10 Салий С.М. Беспилотная авиация: современное состояние и перспективы развития: монография. – Алматы: Пограничная академия КНБ РК, 2023. – 132 с.

11 Кошманов В.А. Исследование и разработка метода подготовки внешних пилотов дистанционно пилотируемых авиационных систем: дис. ... магистра. – Алматы: Академия гражданской авиации, 2026. – 210 с.

12 Об использовании воздушного пространства и деятельности авиации: Закон Республики Казахстан от 10 июня 2010 года № 339-IV. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z100000339_ (дата обращения: 08.09.2026).

13 Lee J., Kim S. Cognitive load assessment in UAV operators using eye-tracking technology // The Aeronautical Journal. – 2021. – Vol. 125, No. 1289. – P. 112-128.

АДАМ-ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ӨЗАРА ӘРЕКЕТТЕСУІНІҢ ПСИХОЛОГИЯЛЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

педагогика ғылымдарының магистрі,
ассистент-оқытушы Оразалы А.Н.
М.Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті,
Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы

Аннотация. Мақалада адам-жасанды интеллект өзара әрекеттесуінің психологиялық ерекшеліктері қарастырылады. ЖИ-ге сенім, антропоморфизм, когнитивтік оффлоадинг және тұлғалық автономияның өзара байланысы талданады. Адамның когнитивтік дербестігін сақтай отырып, жасанды интеллектіні тиімді әрі қауіпсіз қолданудың психологиялық-педагогикалық шарттары айқындалады.

Кілт сөздер: жасанды интеллект, адам-ЖИ өзара әрекеттесуі, психологиялық ерекшеліктер, антропоморфизм, сенім, когнитивтік оффлоадинг, тұлғалық автономия.

Кіріспе. Жасанды интеллектінің (ЖИ) қарқынды дамуы адамның ақпаратты қабылдау, өңдеу және шешім қабылдау тәсілдеріне елеулі өзгерістер енгізіп, адам мен технология арасындағы өзара әрекеттесудің жаңа формаларын қалыптастыруда. Әсіресе генеративті жасанды интеллект жүйелерінің кең таралуы технологияны тек ақпаратты өңдеудің құралы ретінде емес, адамның интеллектуалдық қызметіне тікелей қатысатын интерактивті жүйе ретінде қарастыру қажеттігін күшейтті. Осыған байланысты адам-жасанды интеллект өзара әрекеттесуі информатика немесе адам-компьютер өзара әрекеттесуі шеңберінен шығып, когнитивтік, әлеуметтік және тұлғалық психологияның маңызды зерттеу нысанына айналып отыр.

Қазіргі ғылыми зерттеулер адам мен ЖИ арасындағы өзара әрекеттесудің тиімділігін технологияның техникалық сипаттамаларымен ғана түсіндіру жеткіліксіз екенін көрсетеді. Адамның ЖИ жүйесіне деген сенімі, оның технологияны қабылдау ерекшелігі, жүйеге телінетін адамға тән қасиеттер, шешім қабылдау барысындағы автоматтандырылған ұсыныстарға сүйену деңгейі және адамның өз әрекетін бақылау мүмкіндігі өзара әрекеттесудің психологиялық сапасын айқындайтын маңызды факторларға жатады. Зерттеулерде ЖИ-ге деген сенімнің шамадан тыс жоғары болуы технологияны сынсыз қабылдауға, ал жеткіліксіз сенім оның әлеуетін пайдаланудан бас тартуға әкелуі мүмкін екені атап көрсетіледі. Сондықтан қазіргі ғылыми дискурста ЖИ-ге «көбірек сенім» қалыптастырудан гөрі сенімнің сәйкестігі мен калибрленуі (appropriate trust, trust calibration) мәселесіне ерекше назар аударылуда.

Адам-ЖИ өзара әрекеттесуіндегі маңызды психологиялық механизмдердің бірі – антропоморфизм, яғни адамның адамға тән қасиеттерді, ниеттерді немесе психологиялық сипаттарды адам емес объектілерге телу үрдісі. ЖИ жүйесінің

тілдік қарым-қатынас жүргізуі, диалогқа жауап беруі, эмоциялық реңктерді имитациялауы және пайдаланушының жеке сұраныстарына бейімделуі оның адамға ұқсас қабылдануына ықпал етуі мүмкін. Өз кезегінде мұндай қабылдау адамның ЖИ жүйесіне деген сеніміне, эмоционалдық қатынасына және оны әлеуметтік өзара әрекеттестік серіктесі ретінде қабылдауына әсер етеді.

Сонымен қатар ЖИ-ді пайдалану адамның когнитивтік қызметіне қатысты жаңа мәселелерді алға шығарады. ЖИ ақпаратты іздеу, салыстыру, құрылымдау және мәтін қалыптастыру сияқты операциялардың бір бөлігін өзіне алған жағдайда адамның когнитивтік жүктемесі төмендеуі мүмкін. Бұл тұрғыдан алғанда ЖИ адамның интеллектуалдық ресурстарын тиімді бөлуге мүмкіндік беретін когнитивтік құрал қызметін атқара алады. Алайда когнитивтік операциялардың жүйеге шамадан тыс берілуі когнитивтік оффлоадингке, яғни белгілі бір ойлау әрекеттерін сыртқы жүйеге ауыстыруға алып келуі ықтимал. 2026 жылғы зерттеулерде бұл құбылыстың одан әрі дамып, адамның белгілі бір пікірлер мен сенімдерді қалыптастыру процесін ЖИ жүйесіне ішінара «беруі» – *belief offloading* - ретінде қарастырыла бастағаны көрсетіледі.

Осы мәселе адамның тұлғалық автономиясы мен агенттілігіне қатысты сұрақтарды өзекті етеді. Егер адам ЖИ ұсынған ақпаратты тек қосымша ресурс ретінде пайдаланып, соңғы шешімді өзі қабылдаса, технология адамның когнитивтік мүмкіндіктерін кеңейтетін құрал ретінде қызмет етеді. Керісінше, ЖИ ұсынған шешімді тексермей қабылдау, жеке пайымдауды жүйелік ұсыныспен алмастыру және жауапкершілікті технологияға ығыстыру жағдайында адамның дербес шешім қабылдау белсенділігі өзгеруі мүмкін. Қазіргі зерттеулер адам–ЖИ өзара әрекеттесуінде тиімділік пен адамның бақылауы арасындағы тепе-теңдікті сақтаудың маңыздылығын көрсетеді.

Бұл мәселе жоғары білім беру жүйесі үшін ерекше мәнге ие. ЖОО студенттері генеративті ЖИ-ді ақпарат іздеу, оқу материалдарын түсіндіру, мәтін құрастыру, идеяларды жүйелеу және оқу тапсырмаларын орындау мақсатында белсенді қолданатын әлеуметтік топтардың біріне айналып отыр. Сондықтан студенттің ЖИ-мен өзара әрекеттесуін тек цифрлық сауаттылық немесе академиялық адалдық тұрғысынан қарастыру жеткіліксіз. Оның психологиялық салдарын - сенімнің қалыптасуын, когнитивтік жүктеменің өзгеруін, дербес ойлау мен шешім қабылдауды, өзіндік тиімділікті және тұлғалық автономияны - кешенді түрде зерттеу қажеттілігі туындайды. UNESCO да генеративті ЖИ-ді білім беруде адамға бағдарланған тәсіл негізінде қолданудың, адам агенттігін, қауіпсіздікті және этикалық жауапкершілікті сақтаудың маңыздылығын атап көрсетеді.

Осылайша, қазіргі кезеңдегі негізгі ғылыми мәселе ЖИ-дің адамға қаншалықты пайдалы екендігін анықтаумен шектелмейді.

Негізгі мәселе – адамның ЖИ-мен өзара әрекеттесу барысында өзінің когнитивтік белсенділігін, сыни пайымдауын, дербестігін және психологиялық агенттігін қандай деңгейде сақтай алатынын түсіндіру. Бұл тұрғыдан алғанда адам–ЖИ өзара әрекеттесуін психологиялық тұрғыдан зерттеу технологияны адам әрекетінің орнына қою немесе оған қарсы тұру емес, адамның

технологиямен өзара байланысының оңтайлы психологиялық моделін айқындауға бағытталуы тиіс.

Зерттеудің мақсаты – адам–жасанды интеллект өзара әрекеттесуінің психологиялық ерекшеліктерін теориялық тұрғыдан талдау және осы өзара әрекеттесудің сенім, когнитивтік жүктеме, антропоморфизм, тұлғалық автономия және адамның шешім қабылдау үдерістеріне ықпал ету механизмдерін жүйелеу.

Зерттеудің ғылыми маңыздылығы адам–ЖИ өзара әрекеттесуін технологиялық емес, психологиялық құбылыс ретінде қарастырумен және адамның ЖИ-ге деген сенімі мен технологияны пайдалану арасындағы шекараны, сондай-ақ когнитивтік қолдау мен когнитивтік тәуелділік арасындағы айырмашылықты ғылыми тұрғыдан ажырату қажеттілігімен айқындалады.

Негізгі бөлім. Адам-жасанды интеллект өзара әрекеттесуін психологиялық тұрғыдан түсіндіру үшін ең алдымен адамның технологияны қабылдау ерекшеліктеріне назар аудару қажет. Қазіргі ЖИ жүйелері дәстүрлі технологиялық құралдардан өзінің интерактивтілігімен, тілдік коммуникация мүмкіндігімен және пайдаланушының сұранысына бейімделуімен ерекшеленеді. Сондықтан пайдаланушы ЖИ-мен әрекеттескен кезде тек құралды қолданбайды, белгілі бір деңгейде әлеуметтік және когнитивтік өзара әрекеттестікке түседі.

Бұл құбылыстың теориялық негіздері генеративті ЖИ пайда болғанға дейінгі адам-компьютер өзара әрекеттестігін зерттеулерден бастау алады. С. Nass, В. Fogg және Y. Moon жүргізген эксперименттік зерттеуде адамдардың компьютерді әлеуметтік өзара әрекеттестіктің қатысушысы ретінде қабылдай алатыны көрсетілген. Авторлар 56 қатысушының қатысуымен жүргізілген экспериментте компьютермен «командалық» өзара тәуелділік қалыптастырылған жағдайда адамдардың компьютерді өз командасының мүшесі ретінде қабылдап, оның ақпаратын жоғарырақ бағалағанын және компьютер ұсынған ақпаратқа көбірек бейімделгенін анықтаған [1].

Бұл нәтиже адам-ЖИ қатынасын түсіндіруде маңызды теориялық негіз береді. Генеративті ЖИ жағдайында компьютердің мәтіндік диалог жүргізуі, сұраққа контекстке сәйкес жауап беруі және пайдаланушының коммуникативтік стиліне бейімделуі оның әлеуметтік субъект ретінде қабылдану ықтималдығын арттырады. Осы тұрғыдан алғанда, адамның ЖИ-ге қатысты психологиялық реакцияларын тек технологиялық пайдалану әрекеті ретінде қарастыру жеткіліксіз.

Жоғарыда атап өткендей адам-ЖИ өзара әрекеттесуіндегі маңызды психологиялық механизмдердің бірі – антропоморфизм, яғни адамға тән қасиеттерді, ниеттерді, эмоциялар мен мотивацияларды адам емес объектілерге телу.

N.Epley, A.Waytz және J.T.Cacioppo ұсынған антропоморфизмнің үш факторлы теориясы адамның адам емес агенттерге адамдық сипаттарды кездейсоқ емес, белгілі бір психологиялық қажеттіліктер негізінде телейтінін түсіндіреді. Авторлар антропоморфизмнің қалыптасуына үш факторды бөліп

көрсетеді: адамға тән білімнің қолжетімділігі, қоршаған ортаны түсіндіруге деген қажеттілік және әлеуметтік байланысқа деген мотивация [2].

Бұл теорияны қазіргі генеративті ЖИ контекстінде қолдану маңызды. Мысалы, пайдаланушы ЖИ-ге «ол мені түсінді», «ол жақсы кеңес берді», «ол менің жағдайымды түсінеді» деген сипаттамалар бере бастағанда, технологияның функционалдық қасиеті психологиялық тұрғыдан әлеуметтік қасиетке айналады. Мұндай антропоморфизация ЖИ-ге деген сенімнің артуына, оның ұсыныстарын қабылдауға дайындықтың күшеюіне және кейбір жағдайларда эмоционалдық байланыс қалыптасуына ықпал етуі мүмкін.

Бұл тұжырымды Y.Moon және C.Nass жүргізген зерттеулер де толықтырады. Авторлар компьютерге белгілі бір «тұлғалық» сипаттар берілген жағдайда адамдардың компьютерге деген психологиялық реакциялары адамаралық өзара әрекеттесуге ұқсас өзгеретінін эксперименттік түрде көрсеткен [3].

Осылайша, ЖИ интерфейсінің адамға ұқсас коммуникациялық ерекшеліктері пайдаланушының технологияны қабылдау тәсілін өзгерте алады. Демек, ЖИ-дің психологиялық әсері оның алгоритмдік мүмкіндіктерімен ғана емес, адамның оны қандай әлеуметтік және тұлғалық мағынада қабылдайтынымен де анықталады.

Адам-ЖИ өзара әрекеттесуіндегі келесі маңызды фактор – сенім. Технологияға сенім мәселесін J.D.Lee және K.A.See жан-жақты зерттеп, автоматтандырылған жүйелерге сенімнің адам әрекетіне тікелей ықпал ететінін көрсетті [4]. Авторлардың пікірінше, мәселе адамның автоматтандыруға сенуінде ғана емес, оның сенім деңгейінің жүйенің нақты мүмкіндіктеріне қаншалықты сәйкес келетінінде жатыр.

Осы тұста trust calibration, яғни сенімді дұрыс калибрлеу ұғымы ерекше мәнге ие. Егер адамның ЖИ-ге сенімі жүйенің нақты сенімділігінен жоғары болса, шамадан тыс сенім және автоматтандырылған ұсыныстарға сынсыз сүйену пайда болуы мүмкін. Ал керісінше, адамның сенімі жүйенің нақты мүмкіндіктерінен тым төмен болса, пайдалы технологияны қабылдамау немесе жеткіліксіз пайдалану орын алады. Бұл мәселе қазіргі адам-ЖИ өзара әрекеттесу зерттеулерінде де негізгі бағыттардың бірі ретінде қарастырылады.

R. Parasuraman және V.Riley автоматтандырумен өзара әрекеттесудің use, misuse, disuse және abuse сияқты төрт формасын ажыратқан [5]. Олардың зерттеуінде әсіресе misuse - автоматтандыруға шамадан тыс сүйену – адамның бақылауының әлсіреуіне және шешім қабылдаудағы қателіктерге әкелуі мүмкін екендігі көрсетілген.

Бұл теория генеративті ЖИ жағдайында ерекше өзекті. Мысалы, студент ЖИ ұсынған ақпаратты тексермей қабылдаса немесе оқытушының тапсырмасын орындау кезінде өзінің талдауын ЖИ жауабымен толығымен алмастырса, бұл технологияны тиімді пайдалану емес, шамадан тыс когнитивтік және шешімдік тәуелділік ретінде қарастырылуы мүмкін.

Адам-ЖИ өзара әрекеттесуінің тағы бір маңызды психологиялық аспектісі – когнитивтік оффлоадинг. E.F. Risko және S. J. Gilbert когнитивтік оффлоадингті

адамның когнитивтік жүктемесін азайту мақсатында ақпаратты өңдеудің белгілі бір бөлігін сыртқы ортаға немесе сыртқы құралға беруі ретінде қарастырады [6].

Когнитивтік оффлоадингтің өзі жағымсыз құбылыс емес. Керісінше, ол адамның шектеулі когнитивтік ресурстарын тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Мысалы, ақпаратты есте сақтаудың орнына жазып алу немесе күрделі ақпаратты сыртқы құрал арқылы құрылымдау адамның негізгі интеллектуалдық міндетке көбірек көңіл бөлуіне жағдай жасайды.

Алайда ЖИ жағдайында мәселе күрделене түседі. Генеративті ЖИ тек ақпаратты сақтап немесе құрылымдап қана қоймайды, сонымен бірге талдау, мәтін құрастыру, салыстыру, идея ұсыну және қорытынды жасау сияқты жоғары деңгейлі когнитивтік операциялардың бір бөлігін орындауы мүмкін. Сондықтан когнитивтік оффлоадингтің шекарасы қарапайым техникалық көмек көрсетуден адамның интеллектуалдық әрекетін сыртқы жүйеге беруге дейін кеңейеді.

A.Skulmowski генеративті ЖИ-дің білім беру үдерісіндегі қолданылуын талдай отырып, пайдаланушылардың күрделі тапсырмалардың бір бөлігін ЖИ-ге беруге бейім екенін көрсетеді. Ғалым бұл жағдайда адамның өзінің нақты үлесін бақылау қиындауы мүмкін екенін және ЖИ көмегімен орындалған тапсырма адамның өз қабілетін асыра бағалауына алып келетін AI-based placebo effect сияқты құбылыстардың пайда болуы ықтимал екенін талдайды [7].

Осыдан маңызды психологиялық мәселе туындайды: ЖИ адамның когнитивтік мүмкіндігін кеңейте ме, әлде оның когнитивтік дербестігін біртіндеп алмастыра ма? Бұл сұраққа жауап ЖИ қолданудың жиілігіне ғана емес, адамның технологиямен өзара әрекеттесу стратегиясына байланысты.

Адам-ЖИ өзара әрекеттесуінің жоғарыда қарастырылған механизмдері адамның агенттілігіне және тұлғалық автономиясына тікелей байланысты. Егер адам ЖИ-ді ақпараттық ресурс ретінде пайдаланып, алынған ақпаратты сыни бағалап, соңғы шешімді өзі қабылдаса, технология адамның когнитивтік мүмкіндігін кеңейтуші құрал ретінде қызмет етеді.

Ал ЖИ ұсынған ақпарат адамның жеке пайымдауын алмастырып, шешім қабылдау жауапкершілігі біртіндеп технологияға берілетін жағдайда өзара әрекеттесудің психологиялық сипаты өзгереді. Бұл жерде Parasuraman және Riley анықтаған автоматтандыруды шамадан тыс пайдалану қаупі ерекше маңызды [5].

Сонымен қатар адам-ЖИ өзара әрекеттесуінің психологиялық әсері барлық адамдарда бірдей болмауы мүмкін. Технологияға бастапқы сенім деңгейі, цифрлық тәжірибе, когнитивтік қабілеттерді субъективті бағалау, белгісіздікке төзімділік және адамның әлеуметтік қажеттіліктері сияқты жеке-психологиялық факторлар ЖИ-ді қабылдау мен пайдалану стратегиясын өзгерте алады. Осыған байланысты адам-ЖИ өзара әрекеттесуін бір ғана «сенім» немесе «тәуелділік» көрсеткіші арқылы түсіндіру жеткіліксіз.

Демек, ғылыми әдебиеттерді талдау адам-ЖИ өзара әрекеттесуінің кемінде төрт өзара байланысты психологиялық компонентін бөліп көрсетуге мүмкіндік береді: антропоморфизация, сенімнің калибрленуі, когнитивтік оффлоадинг және тұлғалық автономия. Бұл компоненттер бір-бірінен оқшау емес: ЖИ-ді

әлеуметтік субъект ретінде қабылдау сенімді күшейтуі мүмкін; жоғары сенім ЖИ-ге когнитивтік операцияларды көбірек беруге ықпал етуі ықтимал; ал шамадан тыс когнитивтік оффлоадинг адамның дербес шешім қабылдау белсенділігіне әсер етуі мүмкін. Осы өзара байланыс адам- ЖИ қатынасын қазіргі психологиядағы дербес зерттеу бағыты ретінде қарастыруға негіз болады.

Қорытынды. Жүргізілген теориялық талдау адам-жасанды интеллект өзара әрекеттесуінің қазіргі психология үшін жаңа әрі көпқырлы зерттеу нысанына айналып отырғанын көрсетті. ЖИ технологияларының интерактивті және адамға ұқсас коммуникациялық мүмкіндіктері адамның технологияны қабылдау ерекшеліктерін өзгертумен қатар, оның сеніміне, когнитивтік процестеріне, шешім қабылдауына және тұлғалық автономиясына ықпал ететін жаңа психологиялық жағдай қалыптастырады.

Ғылыми әдебиеттерді талдау негізінде адам-ЖИ өзара әрекеттесуінің өзара байланысты төрт негізгі психологиялық компонентін бөліп көрсетуге болады: антропоморфизм, ЖИ-ге деген сенім, когнитивтік оффлоадинг және тұлғалық автономия. Антропоморфизм ЖИ-ді әлеуметтік субъект ретінде қабылдауға ықпал етсе, сенім адамның жүйе ұсыныстарына сүйену деңгейін анықтайды. Когнитивтік оффлоадинг адамның белгілі бір интеллектуалдық операцияларды технологияға беруіне мүмкіндік береді, алайда оның шамадан тыс болуы когнитивтік дербестікке қатысты тәуекелдерді күшейтуі мүмкін. Ал тұлғалық автономия адамның соңғы шешімді өз пайымдауына сүйеніп қабылдау қабілетін сипаттайды.

Осы тұрғыдан алғанда, адам-ЖИ өзара әрекеттесуінің психологиялық тұрғыдан тиімді моделі «адамның орнына ЖИ» емес, «адам + ЖИ» қағидатына негізделуі тиіс. Яғни технология адамның когнитивтік мүмкіндіктерін кеңейтетін, бірақ оның сыни ойлауын, жауапкершілігін және дербес шешім қабылдау қабілетін алмастырмайтын құрал ретінде қарастырылуы қажет.

ЖИ-дің психологиялық әсерін бағалауда технологияны қолдану жиілігін ғана емес, оған деген сенім деңгейін, қолдану мақсатын, когнитивтік операцияларды беру дәрежесін және адамның өз шешімін бақылау деңгейін ескеру маңызды. Сондықтан болашақ зерттеулерде адам-ЖИ өзара әрекеттесуін эксперименттік және эмпирикалық тұрғыдан зерттеп, аталған факторлардың өзара байланысын нақты сандық көрсеткіштер арқылы анықтау өзекті болып табылады.

Қорытындылай келе, жасанды интеллектінің адам психикасына ықпалы технологияның өз қасиеттерімен ғана емес, адамның оны қалай қабылдайтыны және қалай пайдаланатынымен анықталады. Осы себепті ЖИ дәуіріндегі негізгі міндет технологияны адамға қарсы қою емес, адамның когнитивтік және тұлғалық әлеуетін сақтай отырып, онымен қауіпсіз, сыни және психологиялық тұрғыдан теңгерімді өзара әрекеттесу моделін қалыптастыру болып табылады.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Nass, C., Fogg, B. J., Moon, Y. Can Computers Be Teammates? // International Journal of Human-Computer Studies – 1996. – Vol. 45, No. 6. – P.669-678.
- 2 Epley, N., Waytz, A., Cacioppo, J. T. On Seeing Human: A Three-Factor Theory of Anthropomorphism // Psychological Review – 2007. – Vol. 114, No. 4. – P.864-886. DOI: 10.1037/0033-295X.114.4.864.
- 3 Moon, Y., Nass, C. How “Real” Are Computer Personalities? Psychological Responses to Personality Types in Human-Computer Interaction // Communication Research. – 1996. – Vol. 23, No. 6.
- 4 Lee, J. D., See, K. A. Trust in Automation: Designing for Appropriate Reliance // Human Factors. – 2004. – Vol. 46, No.1. – P.50-80. DOI: 10.1518/hfes.46.1.50_30392.
- 5 Parasuraman, R., Riley, V. Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse // Human Factors. – 1997. – Vol. 39, No. 2. – P.230-253. DOI: 10.1518/001872097778543886.
- 6 Risko, E. F., Gilbert, S. J. Cognitive Offloading // Trends in Cognitive Sciences. – 2016. – Vol. 20, No. 9. – P. 676-688. DOI: 10.1016/j.tics.2016.07.002.
- 7 Skulmowski, A. Placebo or Assistant? Generative AI Between Externalization and Anthropomorphization // Educational Psychology Review. – 2024. DOI: 10.1007/s10648-024-09894-x.

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ГРУППОВОМ ПРИМЕНЕНИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГРАНИЦЫ

старший преподаватель, подполковник
Рамаданов Ж.Н.

Пограничная академия Комитета
Национальной безопасности РК,
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассмотрены возможности группового применения беспилотных летательных аппаратов с элементами искусственного интеллекта для непрерывного мониторинга протяженных участков Государственной границы. Предложена аналитическая модель оценки потребного состава группы и числа операторов, выполнен анализ ее чувствительности, систематизированы методы искусственного интеллекта для распределения задач и планирования маршрутов, сформулированы предложения по внедрению.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, групповое применение, искусственный интеллект, мониторинг Государственной границы, распределение задач, человеко-машинное взаимодействие.

Введение. Охрана протяженных участков Государственной границы, проходящих по малонаселенной местности, традиционно требует значительных сил и средств. Одиночный беспилотный летательный аппарат (БПЛА) существенно расширяет возможности пограничного наряда по наблюдению, однако ограниченная продолжительность полета и необходимость возвращения для замены источников питания не позволяют ему обеспечить непрерывное наблюдение за участком протяженностью в десятки километров. Решение этой задачи связано с переходом от эпизодического применения одиночных аппаратов к групповому применению БПЛА, при котором несколько аппаратов согласованно выполняют общую задачу, сменяя друг друга и перераспределяя функции при изменении обстановки.

Ключевой технологией группового применения являются алгоритмы, позволяющие участникам группы обмениваться информацией, распределять задачи, планировать траектории и согласовывать полет так, чтобы общая цель достигалась эффективно; при этом роль оператора в принципе может быть сведена к управлению на верхнем уровне без непосредственного вмешательства в пилотирование [1]. Методологической основой таких алгоритмов служат методы роевой робототехники [2] и теория коллективного управления в группах роботов, развиваемая, в частности, в российской научной школе [3]. Значительная часть этих алгоритмов опирается на методы искусственного

интеллекта (далее – ИИ): многоагентное планирование, машинное обучение, теорию игр.

Для Республики Казахстан данное направление согласуется с приоритетами государственной политики. Концепция развития искусственного интеллекта на 2024–2029 годы ориентирует на развитие данных, инфраструктуры, человеческого капитала и научных исследований в сфере ИИ [4], а Закон Республики Казахстан «Об искусственном интеллекте» устанавливает классификацию систем ИИ по степени автономности и требования к контролю человека над ними [5]. Правовую основу деятельности по защите Государственной границы составляет Закон Республики Казахстан «О Государственной границе Республики Казахстан» [6].

Вместе с тем внедрение группового применения БПЛА ставит перед органами управления ряд практических вопросов: сколько аппаратов и операторов необходимо для обеспечения требуемой периодичности наблюдения за участком, какие функции целесообразно передать алгоритмам ИИ, а какие оставить за человеком. Целью статьи является разработка упрощенной аналитической модели для оценки потребного состава группы БПЛА и числа операторов, а также систематизация методов ИИ, повышающих эффективность группового применения. Исследование выполнено на основе открытых источников с использованием методов анализа, аналитического моделирования и систематизации.

Основная часть. Рассмотрим участок Государственной границы протяженностью L , наблюдение за которым ведется группой однотипных БПЛА, движущихся с крейсерской скоростью v . В качестве показателя качества наблюдения примем максимальный интервал между двумя последовательными пролетами над любой точкой участка – период повторного наблюдения. Этот показатель является основным в задачах постоянного наблюдения и кооперативного патрулирования, где требуется минимизировать время между посещениями одних и тех же районов [7, 8]. Если в воздухе одновременно находятся n аппаратов, равномерно распределенных по маршруту «туда – обратно» либо закрепленных за равными подучастками, период повторного наблюдения составит

$$T = 2L / (n \cdot v), \quad (1)$$

откуда потребное число одновременно находящихся в воздухе аппаратов при заданном периоде $T_{\text{тр}}$ определяется условием

$$n_{\text{в}} \geq 2L / (v \cdot T_{\text{тр}}). \quad (2)$$

Каждый аппарат находится в воздухе в течение времени E , часть которого затрачивается на перелет от пункта запуска до назначенного подучастка и обратно, а часть составляет навигационный резерв. Полезное время работы на участке за один вылет равно

$$t_{\Pi} = E - 2d/v - t_p, \quad (3)$$

где d – среднее удаление пункта запуска от подучастка;

t_p – резервное время. После посадки аппарату требуется время τ на послеполетное обслуживание (замену или заряд аккумуляторов, осмотр). Чтобы на участке непрерывно находилось n_b аппаратов, общий состав группы с округлением до большего целого должен составлять:

$$N = n_b \cdot (E + \tau) / (t_{\Pi} \cdot K_r), \quad (4)$$

Где K_r – коэффициент технической готовности, учитывающий аппараты, находящиеся на обслуживании и в ремонте.

Потребное число операторов определяется тем, сколько аппаратов один человек способен одновременно контролировать. В исследованиях взаимодействия человека с робототехническими системами для этого используются время допустимого невмешательства NT – ожидаемое время, в течение которого аппарат может оставаться без внимания оператора без снижения эффективности ниже допустимого уровня, и время взаимодействия IT – время, необходимое оператору для восстановления эффективной работы аппарата [9]. Верхняя оценка числа аппаратов, контролируемых одним оператором, составляет:

$$FO = (NT + IT) / IT, \quad (5)$$

а потребное число операторов в смене с округлением до большего целого:

$$m = n_b / FO. \quad (6)$$

Оценку (5) следует рассматривать как верхнюю границу. Экспериментально показано, что при учете задержек, связанных с ожиданием обслуживания в очереди и восстановлением ситуационной осведомленности оператора, прогнозируемое число контролируемых аппаратов снижалось на величину до 67 %, причем даже в высокоавтоматизированной системе, работающей по принципу управления по отклонениям, снижение составило 36 % [10].

Для иллюстрации выполним расчет по условным исходным данным: $v = 60$ км/ч, $E = 90$ мин, $d = 10$ км, $t_p = 10$ мин, $\tau = 30$ мин, $K_r = 0,9$. Тогда полезное время работы на участке за вылет составит $t_{\Pi} = 90 - 20 - 10 = 60$ мин, а отношение $(E + \tau)/t_{\Pi} = 2$, то есть для непрерывного нахождения на участке одного аппарата в составе группы требуется с учетом готовности в среднем 2,2 аппарата. Результаты расчета потребного состава группы для различных значений протяженности участка и требуемого периода повторного наблюдения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Потребный состав группы БПЛА (в числителе – число аппаратов, одновременно находящихся в воздухе, в знаменателе – общий состав группы)

Протяженность участка L , км	$T_{\text{тр}} = 15$ мин	$T_{\text{тр}} = 30$ мин	$T_{\text{тр}} = 60$ мин
30	4 / 9	2 / 5	1 / 3
60	8 / 18	4 / 9	2 / 5
100	14 / 32	7 / 16	4 / 9

Как видно из таблицы, потребный состав группы растет пропорционально протяженности участка и обратно пропорционально требуемому периоду повторного наблюдения: двукратное ужесточение требования к периодичности удваивает число аппаратов. Для участка протяженностью 100 км обеспечение 15-минутного периода потребовало бы 32 аппарата, тогда как 60-минутного – 9. Отсюда следует принципиальный вывод: требование высокой периодичности наблюдения на всем протяжении границы экономически неоправданно, и периодичность целесообразно дифференцировать по подучасткам в зависимости от оценки вероятности нарушений.

Наряду с периодичностью наблюдения на потребный состав группы существенно влияют параметры, определяющие полезное время работы аппаратов на участке. Результаты расчета по соотношениям (3), (4) для участка протяженностью 60 км при $T_{\text{тр}} = 30$ мин ($n_{\text{в}} = 4$) при изменении отдельных параметров относительно базового варианта приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние параметров аппаратов и их базирования на общий состав группы БПЛА ($L = 60$ км, $T_{\text{тр}} = 30$ мин)

Вариант исходных данных	$t_{\text{п}}$, мин	N
Базовый вариант ($E = 90$ мин, $\tau = 30$ мин, $d = 10$ км)	60	9
Сокращение τ до 10 мин (автоматическая замена аккумуляторов)	60	8
Увеличение E до 120 мин	90	8
Приближение пункта запуска ($d = 5$ км)	70	8
Удаление пункта запуска ($d = 20$ км)	40	14
Удаление пункта запуска ($d = 30$ км)	20	27

Из таблицы следует, что при принятых исходных данных наиболее чувствительным параметром является удаление пунктов запуска: его увеличение с 10 до 30 км приводит к трехкратному росту потребного состава группы, тогда как увеличение продолжительности полета на треть или трехкратное сокращение времени обслуживания уменьшают его лишь на один аппарат.

Это объясняется тем, что время перелета вычитается из полезного времени работы, и при удалении, сопоставимом с половиной дальности полета, потребный состав группы, согласно (3), (4), неограниченно возрастает.

Практический вывод состоит в том, что рассредоточение пунктов запуска вдоль участка, в том числе на базе пограничных подразделений, дает больший

эффект, чем приобретение аппаратов с увеличенной продолжительностью полета. Задача рационального размещения пунктов запуска и составления графика смены аппаратов является типичной оптимизационной задачей, решение которой целесообразно возложить на алгоритмы планирования.

Аналогично оценивается потребность в операторах. Если при ручном просмотре видеопотока аппарат фактически не может оставаться без внимания ($NT \rightarrow 0$), то $FO \rightarrow 1$ и каждому аппарату в воздухе нужен отдельный оператор: для участка протяженностью 60 км при $T_{тр} = 30$ мин – четыре оператора в смене. Если же автономное следование по маршруту и автоматическое обнаружение объектов позволяют оставлять аппарат без внимания в среднем $NT = 6$ мин при $IT = 2$ мин, то $FO = 4$ и та же задача, согласно верхней оценке (5), может решаться одним оператором. С учетом поправки на задержки [10], при снижении оценки примерно вдвое, потребуется ориентировочно два оператора, что также вдвое меньше, чем при ручном режиме.

Предложенная модель является упрощенной и основана на ряде допущений: участок рассматривается как линейный, аппараты – как однотипные, влияние рельефа на обзор и маршруты не учитывается, продолжительность полета считается постоянной. Не учитываются также метеоусловия: в периоды, когда полеты невозможны, наблюдение не обеспечивается независимо от состава группы, что требует резервирования другими средствами – стационарными средствами наблюдения и пограничными нарядами. Вместе с тем модель позволяет на этапе планирования получить обоснованные ориентиры и выявить параметры, в наибольшей степени влияющие на результат; уточнение оценок целесообразно выполнять методами имитационного моделирования.

Таким образом, ИИ влияет на эффективность группового применения по двум каналам: снижает потребный состав группы за счет рационального распределения ограниченного ресурса аппаратов и снижает потребность в операторах за счет повышения автономности. Анализ открытых публикаций позволяет выделить следующие основные направления применения методов ИИ в группах БПЛА.

Планирование маршрутов покрытия. Задача построения маршрутов, обеспечивающих полный обзор заданной области с учетом ее формы, препятствий и ограничений аппарата, относится к классу задач планирования покрытия, для которых разработаны как точные, так и приближенные методы [11]. Применительно к пограничному участку они позволяют строить маршруты облета с учетом складок местности, непросматриваемых зон и зон неустойчивой связи.

Распределение задач в группе. При обнаружении объекта одним из аппаратов возникает необходимость перераспределить задачи: какому аппарату сопровождать объект, какому принять освободившийся подучасток, какому вылететь на замену. Для формального описания таких задач предложена таксономия задач распределения в многороботных системах [12], а для их решения в реальном времени – децентрализованные аукционные алгоритмы, основанные на достижении консенсуса между участниками группы и

устойчивые к рассогласованию их представлений об обстановке [13]. Децентрализация принципиальна: группа сохраняет работоспособность при потере связи с пунктом управления или выходе из строя отдельных аппаратов.

Адаптивное и непредсказуемое патрулирование. Если маршруты и график облета неизменны, нарушитель может изучить их и выбрать момент пересечения границы между пролетами. Для противодействия этому разработаны методы теории игр безопасности, позволяющие строить рандомизированные графики патрулирования с учетом ценности охраняемых объектов и вероятного поведения нарушителя; такие системы применялись для охраны аэропортов и объектов транспортной инфраструктуры [14], а в дальнейшем были адаптированы для защиты природных ресурсов от браконьерства и незаконного рыболовства. В последнем случае учитывается, что нарушители, как правило, не могут полностью отслеживать стратегию охраны, а модели их поведения обучаются на накопленных данных [15]. Это позволяет не только дифференцировать периодичность наблюдения по подучасткам, как показано выше, но и сделать ее непредсказуемой для нарушителя.

Рост автономности группы не должен приводить к утрате контроля со стороны человека. Закон «Об искусственном интеллекте» выделяет системы низкой автономности, в которых окончательный выбор и действия всегда осуществляются человеком, системы средней автономности, решения которых человек может скорректировать или отменить, и системы высокой автономности, в которых такая возможность исключена; особенности создания и эксплуатации последних устанавливаются законами [5].

Для группы БПЛА, выполняющей задачи наблюдения, рациональным представляется распределение функций, соответствующее средней степени автономности: построение маршрутов, распределение подучастков, смена аппаратов и первичное обнаружение объектов выполняются автоматически, а оценка обстановки, решения о действиях пограничных нарядов и о приоритетах наблюдения остаются за должностными лицами (таблица 3).

Таблица 3 – Распределение функций между группой БПЛА и должностными лицами

Функция	Выполняется автоматически	Остается за должностным лицом
Планирование маршрутов	Построение маршрутов покрытия с учетом рельефа и условий связи	Утверждение плана, задание приоритетов подучастков
Смена аппаратов	Расчет графика вылетов, выход на подучасток и возврат по графику	Контроль выполнения, решения при отказах
Обнаружение объектов	Первичное обнаружение и классификация, формирование сигнала	Проверка сигнала, оценка обстановки

Функция	Выполняется автоматически	Остается за должностным лицом
Перераспределение задач	Назначение аппарата для сопровождения объекта, перекрытие освободившегося подучастка	Подтверждение или отмена перераспределения
Реагирование на нарушение	Передача данных о местоположении и перемещении объекта	Решение о действиях пограничных нарядов

Постоянное наблюдение с учетом энергетических ограничений. Для задачи постоянного наблюдения группой БПЛА, когда требуется минимизировать время между повторными посещениями районов, разработаны и проверены в летных экспериментах алгоритмы управления, учитывающие динамику аппаратов, ограниченную продолжительность их полета и возможные отказы [7]. Такие алгоритмы позволяют автоматически планировать смену аппаратов на подучастках без разрывов в наблюдении.

Связь и информационное взаимодействие. Групповое применение предъявляет особые требования к сетям передачи данных между аппаратами и с пунктом управления, связанные с подвижностью узлов, изменчивостью топологии сети и ограничениями по энергопотреблению [16]. Методы ИИ используются для планирования маршрутов с учетом поддержания связи, а при ее потере – для автономного продолжения выполнения задачи с последующей синхронизацией данных.

Заключение. С учетом изложенного предлагается следующий порядок внедрения группового применения БПЛА с элементами ИИ:

1) категорирование подучастков границы по оценке вероятности нарушений и установление для каждой категории требуемого периода повторного наблюдения, на основе которого по соотношениям (1)-(4) определяется потребный состав группы;

2) рассредоточение пунктов запуска и обслуживания аппаратов вдоль участка, обоснованное расчетом по соотношениям (3), (4);

3) предварительное имитационное моделирование работы группы на цифровой модели участка с учетом рельефа, метеоусловий и зон неустойчивой связи до проведения натурных испытаний;

4) поэтапное повышение автономности – от автоматического следования по маршруту и смены аппаратов к автоматическому распределению задач и адаптивному патрулированию – с оценкой фактических значений NT и IT на каждом этапе;

5) отработка алгоритмов группового применения на учебно-тренировочных полигонах до их использования на участках границы;

6) подготовка операторов к управлению группой аппаратов на верхнем уровне, включая поддержание ситуационной осведомленности при одновременном контроле нескольких БПЛА;

7) включение в требования к перспективным комплексам показателей, характеризующих нагрузку на оператора, времени допустимого невмешательства и времени взаимодействия.

Таким образом, групповое применение БПЛА с элементами ИИ является перспективным способом обеспечения непрерывного наблюдения за протяженными участками Государственной границы.

Предложенная упрощенная модель (1)- (6) позволяет на этапе планирования оценить потребный состав группы и число операторов в зависимости от протяженности участка, требуемого периода повторного наблюдения и характеристик аппаратов.

Расчеты показывают, что потребный состав группы прямо пропорционален протяженности участка и обратно пропорционален требуемому периоду наблюдения, а среди остальных параметров при принятых исходных данных наибольшее влияние на него оказывает удаление пунктов запуска от наблюдаемых подучастков. Поэтому ключевыми резервами повышения эффективности являются дифференциация периодичности наблюдения по подучасткам на основе оценки риска и рассредоточение пунктов запуска. Методы ИИ – планирование покрытия, децентрализованное распределение задач, адаптивное и рандомизированное патрулирование – позволяют рационально использовать ограниченный состав группы, а повышение автономности аппаратов – сократить потребность в операторах.

При этом распределение функций между человеком и группой аппаратов должно соответствовать системе средней автономности, при которой решения, затрагивающие действия пограничных нарядов, остаются за должностными лицами. Направлениями дальнейших исследований являются уточнение модели с учетом рельефа, метеоусловий и неоднородности состава группы, а также экспериментальная оценка показателей NT и IT для образцов БПЛА, эксплуатируемых в пограничных подразделениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Chung S.-J., Paranjape A.A., Dames P. [et al.] A Survey on Aerial Swarm Robotics // IEEE Transactions on Robotics – 2018. – Vol. 34, № 4. – P. 837-855.

2 Brambilla M., Ferrante E., Birattari M. [et al.] Swarm Robotics: a Review from the Swarm Engineering Perspective // Swarm Intelligence – 2013. – Vol. 7, № 1. – P.1-41.

3 Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 280с.

4 Об утверждении Концепции развития искусственного интеллекта на 2024-2029 годы: постановление Правительства Республики Казахстан от 24 июля 2024 года № 592.

5 Об искусственном интеллекте: Закон Республики Казахстан от 17 ноября 2025 года № 230-VIII ЗРК (с изменениями от 24.06.2026 г.).

6 О Государственной границе Республики Казахстан: Закон Республики Казахстан от 16 января 2013 года № 70-V (с изменениями и дополнениями по состоянию на 11.08.2026 г.).

7 Nigam N., Bieniawski S., Kroo I. [et al.] Control of Multiple UAVs for Persistent Surveillance: Algorithm and Flight Test Results // IEEE Transactions on Control Systems Technology – 2012. – Vol. 20, № 5. – P.1236-1251.

8 Pasqualetti F., Franchi A., Bullo F. On Cooperative Patrolling: Optimal Trajectories, Complexity Analysis, and Approximation Algorithms // IEEE Transactions on Robotics – 2012. – Vol. 28, № 3. – P.592-606.

9 Crandall J.W., Goodrich M.A., Olsen D.R. [et al.] Validating Human-Robot Interaction Schemes in Multitasking Environments // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans – 2005. – Vol. 35, № 4. – P. 438-449.

10 Cummings M.L., Mitchell P.J. Predicting Controller Capacity in Supervisory Control of Multiple UAVs // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans – 2008. – Vol. 38, № 2. – P. 451-460.

11 Galceran E., Carreras M. A Survey on Coverage Path Planning for Robotics // Robotics and Autonomous Systems. – 2013. – Vol. 61, № 12. – P.1258-1276.

12 Gerkey B.P., Mataric M.J. A Formal Analysis and Taxonomy of Task Allocation in Multi-Robot Systems // The International Journal of Robotics Research – 2004. – Vol. 23, № 9. – P. 939-954.

13 Choi H.-L., Brunet L., How J.P. Consensus-Based Decentralized Auctions for Robust Task Allocation // IEEE Transactions on Robotics – 2009. – Vol. 25, № 4. – P. 912-926.

14 Tambe M. Security and Game Theory: Algorithms, Deployed Systems, Lessons Learned. – Cambridge: Cambridge University Press, 2011. – 336 p.

15 Fang F., Stone P., Tambe M. When Security Games Go Green: Designing Defender Strategies to Prevent Poaching and Illegal Fishing // Proceedings of the 24th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). – Buenos Aires, 2015. – P. 2589-2595.

16 Hayat S., Yanmaz E., Muzaffar R. Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks for Civil Applications: A Communications Viewpoint // IEEE Communications Surveys & Tutorials – 2016. – Vol. 18, № 4. – P. 2624-2661.

ВОЗМОЖНОСТИ ИНТЕГРАЦИИ ПРИВЯЗНЫХ БПЛА В СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ АРТИЛЛЕРИЙСКИМИ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯМИ

старший преподаватель, майор запаса
Салимжанов Р.А.

НАО «Карагандинский технический
университет имени Абылкаса Сагинова»,
город Караганда, Республика Казахстан

Аннотация. В обзорной статье рассматриваются вопросы возможности применения привязных высотных телекоммуникационных платформ (ВТП) на основе беспилотных летательных аппаратов (как привязных БЛА), которые также еще получили название «привязанных дронов» Flying COWs (Cell on Wings). Сущность их заключается в том, что по гибкому металлическому кабелю-тросу подается достаточно высокое электрическое напряжение с наземного мобильного пункта управления в целях решения многопрофильных задач ВТП локального покрытия на обширной территории и выполнения огневых задач артиллерийских подразделений.

Данные беспилотные авиационные системы с ВТП и привязными БЛА, которые ретранслируют сигналы в привязке к конкретной местности в составе объектов современных геоинформационных систем, покрывающих радиосигналом отдельно взятые регионы, области и труднодоступные районы, могут найти достаточно широкое применение уже в ближайшее время, а в качестве средств тактических сетей управления в артиллерии при применении для сетей телекоммуникационных каналов приема/передачи информации в ходе выполнения огневых задач артиллерийских подразделений. Которые могут как использоваться радиоретрансляторы связи, так и для топогеодезической координации и управления огнем ракетно-артиллерийских подразделений.

В статье делается вывод о потенциале применения БПЛА привязного типа в боевых действиях при организации и выполнении управления разведки и огневых задач. В рамках литературного обзора проанализированы научные статьи, публикации, отраженные в открытых источниках.

Ключевые слова: сложные технические системы, высотные телекоммуникационные платформы, современные геоинформационные системы, беспилотное воздушное судно, беспилотные летательные аппараты,

Введение. Развитие возможностей робототехнических систем и комплексов в современных условиях может привести к качественному скачку в эволюции техники, экономики, медицины, спорта, сельского хозяйства, силовых ведомств и армии.

На основе Правил стрельбы, технической документации и боевого опыта локальных конфликтов в статье рассмотрен потенциал беспилотных

авиационных систем с привязными БЛА и средствами высокоточного поражения.

Впервые в мировой истории БПЛА применяются в военных действиях столь интенсивно и массово. Без них уже фактически невыполнимы боевые задачи по ведению разведки, корректировке огня артиллерии, ретрансляции усиления каналов связи, радиоэлектронной борьбы и даже ударов с воздуха. Суть как специализированного БПЛА так бытового коптера проста – запускаете его, поднимаете над собой на высоту 200-2000 метров и выше и видите, что происходит, вокруг не подвергая себя риску.

Не обязательно занимать высоты для наблюдения и вести корректировку целей. Если БПЛА мощный и может зависать в воздухе дольше 30 минут и летит на 1-3 километра в сторону и ведете разведку/корректировку. Сбить такой квадрокоптер без специальных систем радиоэлектронного подавления практически невозможно – на высоте 500 метров и выше его будет видно и не слышно.

Мобильный, компактный, экономно энергосберегающий начиная с тяжелых реактивных (ракетных) винтокрылых имеющих большую грузоподъемность, до маленьких юрких которые влезут даже в карман [1].

Также авторами изложены концепции развития БПЛА типа коптер или дрон, обзор основных БПЛА, их устройство, подготовка к полету, особенности организации воздушной разведки, ретрансляции радиосигналов и управления огнем артиллерии при выполнении огневых задач, а также способы их применения как устройство и средство заменяющие командно-наблюдательный пункт минометных и артиллерийских подразделений.

Одновременно с применением БПЛА в военных целях расширяется круг решаемых специальных задач используя искусственный интеллект для решения по управлению и взаимодействию как своих, так и коалиционных сил.

Основная часть. Практика применения беспилотной авиации в последних военных конфликтах продемонстрировала ее равнозначную эффективность. Современные БПЛА различной размерности и целевого назначения широко использовались в боевых операциях, среди которых особое место занимают операции в Ираке и Афганистане, во время которых общий налет БПЛА составил 894 335 часов. В вооруженном конфликте между Украиной и Российской Федерацией налет беспилотных авиационных систем превысил в разы больше. При этом анализ военными специалистами предположено, что широкомасштабное внедрение БПЛА, создаваемых на основе перечисленных технологий, значительно изменит способы ведения военных операций.

Важным достоинством современных БПЛА является также то, что они позволяют не только избежать потерь личного состава, но и решать задачи при минимальных экономических затратах. В рамках программы «Long-Range Strike» США ведут работы над созданием ударного гиперзвукового БПЛА, который рассматривается в качестве одного из важнейших вариантов перспективного стратегического бомбардировщика нового поколения. По оценкам американских специалистов, в течение 15 лет на мировом оружейном

рынке будут востребованы около 3000 современных БПЛА большой и сверхбольшой дальности, порядка 500 машин средней размерности, а также сотни тысяч малоразмерных БПЛА.

От США стараются не отставать другие развитые страны. К 2016 году более 90 типов БПЛА состоит на вооружении 41 страны, 32 государства сами производили и предполагали к продаже более 250 моделей различных типов. По мнению американских специалистов, производство БПЛА на экспорт не только позволит поддерживать собственный военно-промышленный комплекс, но и снижать стоимость БПЛА, закупаемых для своих ВС.

Лидерами в создании БПЛА на сегодняшний день можно с полным основанием считать США, Китай, Израиль, Турция.

Особо следует отметить, что в настоящее время разрабатываются БПЛА не только для решения боевых задач. Используя БПЛА, можно отправить за линию фронта оружие и аммуницию, а также эвакуировать раненых. Так, например, отдел логистики и снабжения армии Израиля вместе с ВВС и командованием сухопутных войск провели ряд разработок по транспортному применению БПЛА [2].

В настоящее время уже завершены эксперименты по превращению обычного грузового вертолета в беспилотный.

Взрывной рост количества разработок БПЛА и областей их применения не случаен. Этому способствовали следующие объективные предпосылки:

- появление новых и легких прочных материалов;
- развитие микроэлектронной компонентной базы (навигационных датчиков, приемопередатчиков радиосигналов, миниатюрных видеокамер и др.);
- появление и быстрое развитие эффективных возобновляемых источников питания;
- разработки в области высоко ресурсных бесколлекторных электродвигателей;
- разработки реактивных и поршневых двигателей;
- развитие спутниковых систем глобального позиционирования;
- развитие вычислительной техники, математического и алгоритмического обеспечения.

Ряд направлений реализации потенциальных возможностей БПЛА требует безотлагательных решений по их реализации. К таковым в первую очередь следует отнести:

- создание транспортных мини- и микро-БПЛА;
- отработку всех аспектов группового применения комплексов БПЛА;
- внедрение искусственного интеллекта как в разработку, так и в применение БПЛА;
- объединение пилотируемых и беспилотных ЛА в целях создания информационно-боевых систем для эффективного использования потенциала объединенных групп;
- создание и внедрение БПЛА привязанного типа [3].

В настоящее время применение БПЛА реализуется, как правило, в режиме одиночного управления. Перспективный способ применения – сложные системы коллективного поведения, состоящие из множества летательных аппаратов, информационно связанных для решения сложных задач. Эффективность внедрения способов группового применения БПЛА во многом будет определяться достигаемым техническим уровнем решений по интеллектуализации. Интеллектуализация управления БПЛА и поведения сложных авиационных систем БПЛА является ключевым направлением в повышении боевых возможностей беспилотной техники [4].

Принятие на вооружение современных и тем более перспективных образцов БПЛА открывает новые возможности по комплексированию боевых возможностей беспилотных авиационных систем при решении практически всех боевых задач и особенно при выполнении задач по огневому поражению противника артиллерийскими орудиями (рисунок 1).

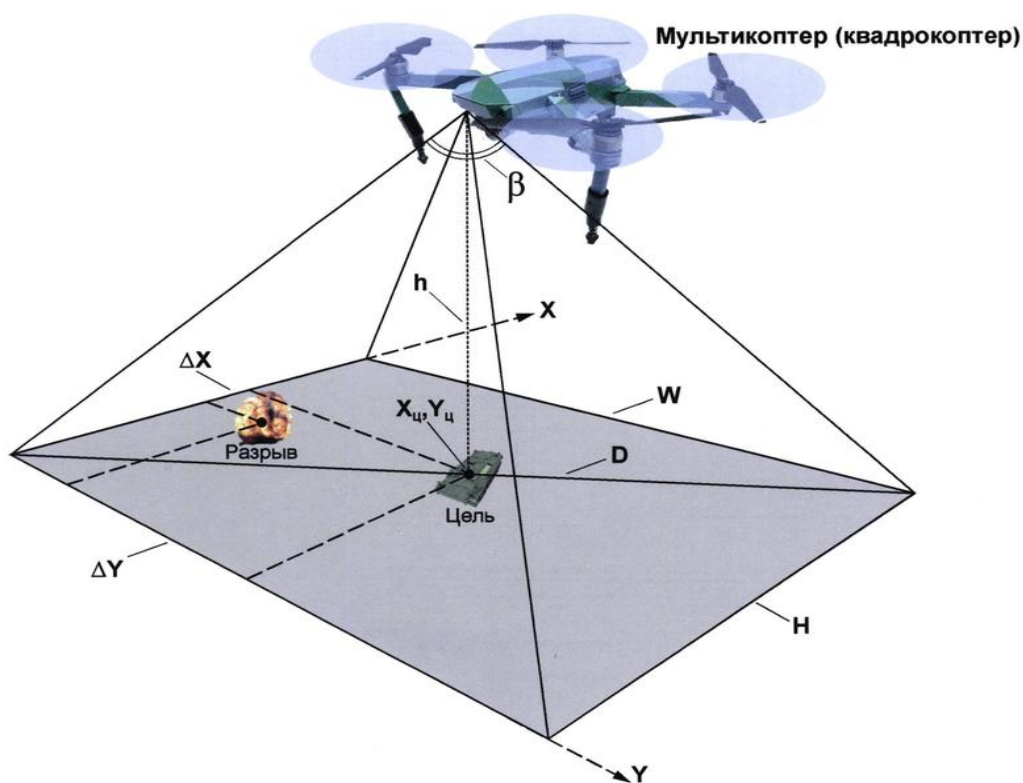


Рисунок 1 – Мультикоптер

На организацию управления огнем оказывает влияние размещение пунктов управления БПЛА, подсистемы управления и поражения артиллерийского подразделения.

В своей статье авторами предлагается рассмотреть вопрос по внедрению в артиллерийские подразделения БПЛА привязанного типа для управления огнем.

Рассмотрим, что такое привязные системы квадрокоптеров и чем они отличаются от остальных типов беспилотников. Главное отличие таких дронов заключается в принципе их питания. Вместо бортовых аккумуляторов привязные

беспилотники используют наземные источники питания. Они сопряжены с ними кабелем, поэтому ограничены в перемещениях, зато получают рекордную автономность. В среднем привязные дроны способны зависать в воздухе до 24 часов и больше (рисунок 2).



Рисунок 2 – БПЛА привязного типа

Дополнительным плюсом кабельного питания является возможность использования того же кабеля для управления БПЛА и качественной передачи видео, без помех и искажений. Привязные квадрокоптерные системы мобильны, имеют облегченную конструкцию без АКБ на борту, быстро разворачиваются на местности и могут подолгу работать в режиме зависания [5].

Концепция Привязанный БПЛА «Tethered UAV» возникла достаточно давно – с появлением беспилотных аэростатических летательных аппаратов, а затем и других аппаратов с вертикальным взлетом/посадкой.

Идея состояла в том, что для выполнения указанных задач не обязательно задействовать летательный аппарат большого радиуса действия – достаточно просто поднять его на определенную высоту. При этом очень разумно использовать коммуникационно-силовой кабель, одновременно выполняющий функции удерживающего троса, силового кабеля и коммуникационной линии. Такое решение имеет множество преимуществ: отсутствие необходимости иметь на борту запас топлива или энергоемкий аккумулятор (который требуется периодически подзаряжать, для чего приходится организовывать специальные системы, практически неограниченное время висения в воздухе, очень малая вероятность потери аппарата и т.д. [6].

В ходе исследования автором был проведен анализ сравнительной оценки характеристик систем мониторинга, основу которых составляют:

- 1) Привязанный БПЛА (на базе мультикоптера).
- 2) БПЛА аэростатического типа.
- 3) БПЛА вертолетного типа.

4) БПЛА самолетного типа (таблица 1).

Таблица 1– Виды аппаратов

№	Характеристики	Виды аппаратов			
		Привязанный БПЛА на основе мультикоптера	БПЛА вертолетного типа	БПЛА аэростатического типа	БПЛА самолетного типа
1	Дальность полета	3	4	5	5
2	Высота полета	3	4	4	5
3	Полезная нагрузка	4	4	5	3
4	Продолжительность полета	5	3	4	4
5	Скорость разворачивания	5	5	3	4
6	Скрытность наблюдения	5	5	3	4
7	Простота обеспечения взлета/ посадки	5	4	3	3
8	Исключение вероятности потери аппарата	5	4	4	3
9	Противостояние ветровым нагрузкам	4	4	3	4
10	Защищенность канала передачи данных	5	4	4	4

Автором сравнение выполнялось методом экспертных оценок по пятибалльной шкале. Как следует из таблицы 1, система на основе привязанного БПЛА довольно перспективна для использования [7].

Привязанные БПЛА можно классифицировать по различным критериям (рисунок 3).



Рисунок 3 – Использование БПЛА привязного типа

По месту базирования их можно разделить на следующие типы:

- аппараты стационарного базирования;
- аппараты, базирующиеся на наземной мобильной платформе (например, на автомобиле);

– аппараты морского базирования (на корабле). Системы на базе привязанных БПЛА можно различать также по применению удерживающих и направляющих элементов:

- системы с одним коммуникационно-силовым кабелем;
- системы с дополнительными удерживающими тросами (на растяжках);
- системы с дополнительными ведущими балками;
- системы с дополнительными горизонтальной направляющей и мобильной кареткой.

Они отлично подходят для охраны и исследования разнообразных объектов, воздушного видеонаблюдения за территориями, патрулирования, аэросъемки, проведения поисково-спасательных операций, организации местных навигационных сетей, создания сотового покрытия и систем связи [7].

Развитие класса привязных мультикоптеров, которые связаны с наземным пунктом управления с помощью кабеля-троса, обладающих небольшими размерами и потреблением энергии, считается наиболее перспективным направлением. Концепция использования привязных мультикоптеров особенно актуальна в случаях, когда требуется продолжительное нахождение в воздухе, на одной высоте, в заданной точке пространства. Основными особенностями таких авиационных платформ являются продолжительное время полета, быстрое развертывание и защищенность канала передачи данных как по спутниковым, так и радиоканалам, с усилением и ретрансляции этих сигналов как на наземные пункты управления, так и БПЛА ударного типа.

Примеры конкретного использования БПЛА привязного типа для ретрансляции связи и наблюдения в военных и гражданских целях: использование БПЛА привязного типа в различных военных операциях для передачи информации и обеспечения связи между командными пунктами и боевыми подразделениями на поле боя. Это позволяет оперативно получать данные о ситуации на местности и координировать действия в режиме реального времени.

БПЛА привязного типа, представляют собой важный инструмент в современных боевых действиях. Их использование предоставляет множество преимуществ для штабов и командующих. Вот некоторые из задач, которые они могут выполнять:

1) наблюдение и разведка: привязные БПЛА могут обеспечивать непрерывное наблюдение за территорией, необходимой для мониторинга действий противника или контроля за перемещением собственных войск;

2) целевое наведение: они могут использоваться для наведения артиллерии и ракет на цель, обеспечивая точную информацию о местоположении противника.

3) команды и связь: БПЛА могут выполнять функции ретрансляторов связи, улучшая связь между подразделениями на поле боя, особенно в условиях сложной местности:

4) сбор данных и анализ: их могут использовать для сбора информации о поле боя, климатических условиях и другой важной оперативной информации, что может помочь в планировании операций.

5) психологическое воздействие: присутствие БПЛА может оказать психологическое давление на противника, заставляя его быть более осторожными в своих действиях и улучшая моральный дух собственных войск.

6) устойчивость к поражению: благодаря привязанной конструкции, такие БПЛА менее подвержены риску быть сбитыми по сравнению с более подвижными летательными аппаратами.

7) поддержка специальных операций.

Они могут использоваться для выполнения специальных заданий, таких как наблюдение за важными целями или поддержка операций по захвату объектов. Кроме того, привязные БПЛА могут эффективно использоваться для обеспечения безопасности важных объектов и инфраструктуры. Их способность оставаться на месте в течение продолжительного времени позволяет проводить круглосуточный мониторинг, что значительно повышает уровень охраны критических точек, таких как базы или склады с боеприпасами. Это также позволяет в реальном времени выявлять потенциальные угрозы и быстро принимать меры [8].

Еще одной важной функцией привязных БПЛА является проведение аэрофотосъемки и картографирования местности. С помощью высококачественных камер они могут собирать детализированные изображения, которые потом используются для анализа и планирования операций. Это особенно актуально в подготовительном этапе, когда необходимо оценить фоновые характеристики района.

Интеграция привязных БПЛА в структуру управления боевыми действиями открывает новые горизонты для военных тактик. Их универсальность и эффективность делают их незаменимыми инструментами в современном боевом контексте, позволяя улучшать взаимодействие между подразделениями и повышать общую боеспособность армии.

В целом, привязные БПЛА значительно усиливают возможности современных вооружённых сил, обеспечивая высокую степень контроля и информации на поле боя.

Дроны мультикоптеры обладают рядом преимуществ по сравнению с беспилотными летательными аппаратами, построенными по самолетной схеме.

Они способны осуществлять вертикальный взлет и посадку, что делает их более удобными в использовании, так как им не требуется взлетно-посадочная полоса и дорогостоящее стартовое оборудование.

Мультикоптеры также предоставляют возможность ведения разведки и наблюдения, обнаружения и идентификации объектов в режиме реального времени, передачи данных на наземные станции управления, выдачи целеуказаний, мониторинга окружающей среды, фотовидеосъемки и ретрансляции радиосигналов.

Этот тип беспилотных авиационных систем не нуждается в частой подзарядке, отличается устойчивостью и стабильной передачей данных. Надежный кабель обеспечивает постоянное соединение летательного аппарата с землей. Благодаря этому минимизируется влияние ветра, турбулентности и других внешних факторов на качество получаемых изображений и удается получать высококлассные кадры профессионального уровня [9].

Важными преимуществами привязных квадрокоптеров выступают:

- 1) увеличенное время полета;
- 2) возможность непрерывного использования в течение длительного времени;
- 3) высокая стабильность, надежность;
- 4) эффективность применения в разных сферах;
- 5) универсальность и адаптивность под разные задачи;
- 6) высококачественная передача данных.

В целом привязные системы дронов выручают, когда нужно по максимуму увеличить время автономной работы летательного аппарата и при этом ему не приходится перемещаться на значительные расстояния.

Требования, предъявляемые к БПЛА привязного типа:

- максимальная взлетная масса;
- полезная нагрузка;
- практический потолок, зависящий от длины троса;
- конфигурация дрона, обтекаемость его формы, используемые материалы (например, углеродное волокно);
- техническое оснащение – например, камера видимого и тепловизионного диапазона с 40-кратным оптическим зумом;
- размеры и масса наземного блока питания;
- диапазон рабочих температур;
- возможное время непрерывного пребывания в воздухе;
- способность дрона летать при умеренном дожде, сопротивляемость ветру, защита от поломки винта;
- наличие полезных дополнений, таких как консоль с подсветкой, дисплей для мониторинга состояния, звуковые сигналы при ошибках, защита от осадков, ветра и пыли.

Привязные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) имеют ряд недостатков, несмотря на свои преимущества. Вот некоторые из них:

- ограниченная подвижность: привязные БПЛА могут выполнять полеты только в пределах определенной радиусной зоны от точки крепления, что ограничивает их оперативность;
- зависимость от привязки: работа таких аппаратов зависит от физической привязки к земле, что может затруднить их использование в некоторых ситуациях или местностях с препятствиями;
- требования к инфраструктуре: для установки привязного БПЛА необходимо подготовить специальную инфраструктуру (площадка, система крепления), что может вызывать дополнительные затраты;

– уязвимость к погодным условиям: сильный ветер или другие неблагоприятные погодные условия могут негативно влиять на стабильность полета и работу системы;

– сложность в управлении: хотя управление может быть упрощено за счет привязки, оно все равно требует квалифицированного персонала, который должен знать особенности работы с такими системами;

– ограниченная долговечность полета: обычно привязные БПЛА имеют ограничения по времени полета из-за энергии, которая поступает по проводам, что может потребовать частой замены или подзарядки оборудования;

– физическое повреждение: привязные системы могут быть более подвержены повреждениям из-за того, что они остаются на одном месте и находятся в пределах досягаемости ветра, животных или человека.

– сложности с мобильностью: если возникает необходимость перемещения БПЛА в другую локацию, потребуется демонтаж и повторная установка системы, что может занять время и усилия.

Эти недостатки необходимо учитывать при выборе системы беспилотной авиации для конкретных задач и условий эксплуатации.

Главными преимуществами таких БПЛА является их высокая мобильность и быстрое время развертывания. Они могут быть легко переброшены в необходимую точку местности, где оперативно настраиваются и успешно используются. Благодаря этому, БПЛА привязного типа позволяют в необходимые сроки обеспечить надежную и непрерывную связь и контроль пространства в зоне охраняемой территории. Благодаря своим техническим характеристикам, они могут осуществлять наблюдение контроль объектов на малых и предельно малых высотах, в том числе в сложных метеорологических условиях

В ходе организации работы на КНП и ОП батарей:

– дополнительно определяют тип применяемого БПЛА, район расположения, размещение средств отображения информации, распределение средств связи по ПУ;

– уточняют (выбирают) места пуска и посадки БПЛА;

– уточняют обязанности оператора БПЛА;

– уточняют порядок целеуказания.

При организации связи:

– определяют возможности БПЛА по количеству и типу выдаваемой информации, наличию средств связи;

– определяют порядок использования средств связи, возможности работы дополнительного средства отображения информации на удалении;

– уточняют порядок обмена информацией;

– уточняют наличие мертвых пространств связи и передачи телеметрии; доводят (уточняют) опознавательные признаки (данные) «свой-чужой» и порядок действий в случае потери связи с БПЛА (рисунок 4).



Рисунок 4 – Основы организации привязного БПЛА в артиллерии

Некоторые дополнительные средства отображения информации и управления используются только для визуального отображения разведывательной информации, без возможности вмешательства в управление БПЛА (рисунок 5).

Варианты	Подсистема поражения	Подсистема управления		Подсистема разведки
Оператор БПЛА совместно с КБ на переднем крае (не требует дополнительных средств связи)				
Оператор БПЛА совместно с НШ на ПУОД (не требует дополнительных средств связи)				
Оператор БПЛА совместно с СОБ на ОП (не требует дополнительных средств связи)				
Оператор БПЛА выполняет задачи самостоятельно				
При наличии и возможностях дополнительных средств отображения информации			КНП КБ 	

Рисунок 5 – Размещение автоматизированных рабочих мест на ПУ

При организации взаимодействия:

– определяют требуемые разведанные об объектах, определяемые оператором;

- определяют способы и порядок пристрелки, доводят требуемые данные об ОП (системы орудий, калибр, координаты, полетное время до района целей, высоту траектории);

- определяют количество БПЛА одновременно ведущих разведку и их целевые нагрузки; устанавливают сигналы управления, распределение выносных средств отображения информации и порядок их использования;

- составляют план полетов; доводят возможности ПВО и стрелкового оружия противника по обнаружению и уничтожению БПЛА, опыт применения в сложившейся обстановке.

При контроле готовности системы управления проверяют:

- знания обязанностей должностных лиц в ходе выполнения разведывательно-огневой задачи;

- знания порядка выполнения разведывательно-огневой задачи, порядка пристрелки и обслуживания стрельбы;

- знания порядка действий в случае потери цели (выход из строя целевой нагрузки или самого БПЛА), выхода из строя ПУ, отсутствия связи и отображения информации.

С целью повышения боеготовности БПЛА может быть введено дежурство. Оно предусматривает поддержание специально выделенных сил и средств в готовности к решению внезапно возникающих задач.

Управление огнем осуществляется по общим правилам, принимая во внимание ряд особенностей, которые необходимо учитывать.

При уяснении разведывательно-огневой задачи:

- выбирают цель в соответствии с поставленными задачами в зоне разведки и поражения;

- определяют достоверность и фактическое состояние цели;

- определяют ее опасность и важность на данный момент времени, положение в боевом порядке противника, время обнаружения, характер деятельности и маневренные возможности;

- определяют оставшееся время нахождения БПЛА в воздухе (заряд АКБ).

При оценке условий выполнения обратной геодезической задачи (РОГЗ):

- определяют положение ОП и время открытия огня;

- определяют общее время выполнения задачи с учетом температуры окружающей среды;

- уточняют возможности БПЛА по обслуживанию пристрелки и стрельбы на поражение, порядок получения информации; определяют характер грунта, наличие незащищенного личного состава, положение своих войск, возможности по применению боеприпасов с неконтактными взрывателями и стрельбы на ricoшетах.

Принимая решение на выполнение разведывательно-огневой задачи, как правило, по собственной инициативе командир батареи определяет:

- цель для поражения;

- задачу стрельбы и вид огня;

- порядок выполнения задачи;
 - количество привлекаемых средств поражения (орудий);
 - способ определения установок для стрельбы на поражение;
 - способ обстрела цели; вид снаряда, тип взрывателя, вид стрельбы и заряд;
- порядок стрельбы на поражение; обслуживающий БПЛА;
- расход снарядов;
 - требования безопасности для своих войск и БПЛА в ходе обслуживания стрельбы.

При постановке разведывательно-огневых задач руководствуются. и указывают:

- при определении способа пристрелки – порядок получения и доведения информации; порядок расчета корректур;
- номер ОП, порядок маневра и время готовности к открытию огня.

Установки для стрельбы на поражения определяют способами:

- полной (сокращенной) подготовки;
- использования пристрелянных поправок;
- пристрелкой цели.

Пристрелку ведут по целям, координаты которых определены этим же аппаратом. Если координаты цели определены другими средствами, то они уточняются с помощью данного БПЛА.

Для расчета корректур используют только координаты цели, определенные с помощью БПЛА.

В ходе пристрелки (стрельбы на поражение) оператор докладывает:

- координаты разрыва (центра группы разрывов в залпе); отклонение центра группы разрывов от цели;
- категорию разрывов (воздушный, наземный);
- действие цели в ходе стрельбы.

Пристрелку с помощью БПЛА проводят:

- по наблюдению знаков разрывов; последовательными контролями по странам света; по графику или шкалой; по сетке с глазомерной оценкой разрывов;
- по измеренным отклонениям (при наличии соответствующего программного обеспечения).

Точка старта, как правило, выбирается вблизи КНП артиллерийского подразделения (в этом случае координаты точки наблюдения совпадают с координатами КНП). При необходимости за точку наблюдения принимается любая точка в радиусе действия БПЛА, над которой он зависает, обеспечивающая хорошие условия наблюдения за целью (разрывами) [10].

В некоторых случаях, прежде всего при обслуживании стрельбы минометной батареи, предусмотрено обслуживание стрельбы непосредственно из района ОП, в этом случае координаты точки наблюдения обычно совпадают с координатами основного миномета. При наличии дымовых мин в начале пристрелки вместо залпа разрешается назначать один выстрел дымовой миной. Если выполняющий огневую задачу и оператор БПЛА не находятся на одном

пункте (ОП), при постановке задачи на разведку и обслуживание стрельбы ему указывают характер цели, ее координаты или предполагаемый район (квадрат) расположения.

Разведав цель, оператор докладывает ее координаты, размеры по фронту и глубине, определенные перпендикулярно и параллельно плоскости стрельбы, количество отдельных целей в ее составе, условия расположения целей (открыто или в окопах), готовность к обслуживанию стрельбы, доступный для него, в данных условиях, способ пристрелки и промежуток времени между залпами (выстрелами), ВАЖНО – координаты точки наблюдения.

По готовности батареи оператору сообщают число разрывов в залпе или выстрелов, которые надо наблюдать, и полетное время мины. Огонь открывают после доклада оператора о готовности к засечке разрывов и сообщают ему о произведенных залпах (выстрелах).

Оператор БПЛА определяет и докладывает отклонения центра группы разрывов в залпе (разрыва) от цели (рисунок 6).

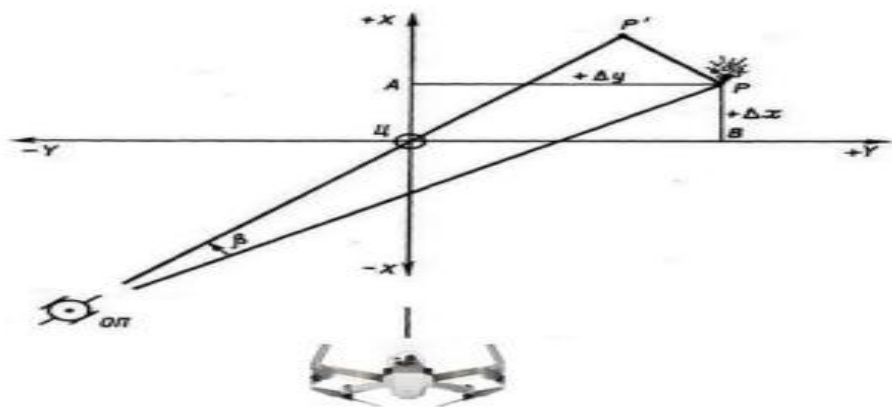


Рисунок 6 – Определение корректур дальности ЦР

Пристрелка по наблюдению знаков разрывов Пристрелку по НЗР ведут по общим правилам до получения вилки 100 м или накрывающей группы. Если точка старта не находится вблизи от КНП (ОП), то оператор БПЛА докладывает наименование точки наблюдения, которую принимают за точку НП, например: «Точка наблюдения – мост в квадрате 2315». При удалении точки наблюдения от ОП, не превышающем 1/10 дальности стрельбы в любую сторону, корректуры дальности и направления принимают равными отклонениям, взятым с противоположными знаками.

Пристрелка последовательными контролями по сторонам света (ПКСС) Пристрелку ПКСС ведут до накрытия цели или до получения отклонения центра залпа (разрыва) от цели не более 100 м.

Оператор докладывает отклонения на стороны горизонта (С-Ю, З-В) или ΔX , ΔY по осям прямоугольных координат в метрах. Сущность пристрелки заключается в определении отклонений разрывов от цели по осям координат X и

У ($\Delta A = \Delta X$ и $\Delta B = \Delta Y$) и в последующем расчете корректур дальности ($\Delta P'$) и направления (β) по этим отклонениям. Если оператор докладывает отклонения разрыва по направлению на стороны горизонта: положительное направление оси X – это направление на СЕВЕР, а отрицательное на ЮГ. Положительное направление оси Y соответствует направлению на ВОСТОК, а отрицательное на ЗАПАД.

Пристрелку ведут, последовательно приближая разрывы к цели, до накрытия или получения отклонения разрыва от цели не более 100 м по осям координат. Корректуры определяют с помощью ЭВМ, МК, ПУО, ПРК или с помощью сетки. Сетку для определения корректур строят на листе клетчатой бумаги. При построении сетки (рис. 34) проводят две взаимно перпендикулярные линии, соответствующие осям координат X (СЕВЕР – ЮГ) и Y (ЗАПАД – ВОСТОК) (рисунок 7).

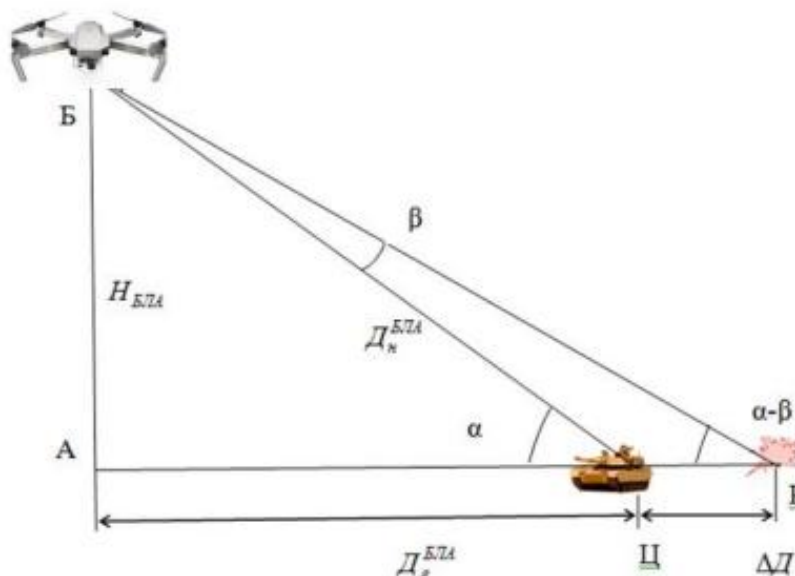


Рисунок 7 – Схема наблюдения с БПЛА

Построение взаимодействия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и артиллерии предполагает комплексный подход, включающий как технические, так и организационные аспекты.

Которое включает в себя комплекс мероприятий:

1) Сбор информации.

– разведка БПЛА: использование БПЛА для проведения разведки местности, определения позиции противника и оценки обстановки;

– обработка данных: полученные данные обрабатываются и анализируются для выявления целей;

2) Целеуказание.

- передача координат: после выявления целей БПЛА передает координаты и описание целей на командный пункт артиллерии;

- коррекция огня: БПЛА может осуществлять корректировку огня артиллерии, обеспечивая более точные данные о попадании.

3) Удар.

- артиллерийский огонь: на основе полученных данных артиллерия ведет огонь по указанным целям:

- контроль результатов: БПЛА проводит наблюдение за результатами удара, фиксируя попадания и возможные разрушения.

4) Обратная связь.

- отчетность: БПЛА передает информацию о результатах удара обратно на командный пункт.

- анализ эффективности: Оценка эффективности артиллерийского огня и корректировка дальнейших действий.

5) Адаптация.

- обновление данных: на основе анализа результатов и новой разведывательной информации обновляются цели и тактика применения артиллерии.

- планирование следующей операции: формируется план дальнейших действий с учетом полученного опыта и новой информации.

6) Координация действий.

- связь и взаимодействие: Обеспечение надежной связи между БПЛА, артиллерией и командным пунктом для эффективного выполнения поставленных задач.

- совместные учения: Регулярные тренировки для оценивания взаимодействия и устранения возможных недостатков в координации.

Данная схема является общим направлением и может варьироваться в зависимости от конкретной ситуации, типа используемых БПЛА и особенностей артиллерийских систем [11,12].

Заключение. Проведённый обзор показывает, что БПЛА привязного типа обладают значительным потенциалом для применения в артиллерии как элемент единой системы разведки, связи, наблюдения и управления. Их основное преимущество заключается в возможности длительного нахождения в заданной точке пространства за счёт питания по кабелю-тросу, что существенно расширяет продолжительность непрерывного наблюдения и передачи информации по сравнению с автономными БПЛА.

Применение привязных БПЛА позволяет повысить эффективность информационного обеспечения артиллерийских подразделений за счёт организации устойчивого канала связи, передачи разведывательной информации, наблюдения за районом, определения координат объектов и контроля результатов применения огневых средств. Размещение такого аппарата на определённой высоте обеспечивает более широкую зону обзора и может повысить оперативность получения информации, необходимой для принятия решений.

Важным направлением является интеграция привязного БПЛА с автоматизированными системами управления и средствами связи артиллерийских подразделений. При соответствующем техническом оснащении такая система способна объединять средства разведки, наблюдения, связи и управления в единый информационный контур. Это создаёт предпосылки для сокращения времени прохождения информации от момента обнаружения объекта до принятия решения и оценки результатов.

Вместе с тем применение привязных БПЛА имеет определённые ограничения. К ним относятся зависимость от кабельной системы, ограниченная зона перемещения, требования к месту размещения наземного оборудования, зависимость от метеорологических условий, необходимость квалифицированного персонала и потенциальная уязвимость самого аппарата и элементов привязки. Поэтому эффективность такой системы определяется не только характеристиками БПЛА, но и правильностью её организационного включения в структуру управления подразделением.

Таким образом, привязной БПЛА следует рассматривать не просто как средство воздушного наблюдения, а как многофункциональный элемент перспективной системы информационного обеспечения артиллерии. Наиболее перспективными направлениями его дальнейшего развития являются увеличение продолжительности работы, совершенствование средств наблюдения и передачи данных, повышение устойчивости каналов связи, автоматизация обработки информации и интеграция с современными геоинформационными и автоматизированными системами управления.

В целом проведённый анализ подтверждает, что внедрение привязных БПЛА в артиллерийские подразделения может способствовать повышению оперативности, устойчивости связи, качества разведывательного обеспечения и эффективности управления, при условии учёта технических, организационных и эксплуатационных ограничений. Перспективность данного направления обуславливает необходимость дальнейшего изучения возможностей привязных беспилотных систем и их практической адаптации к требованиям современных артиллерийских подразделений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Дмитренко А. Г. Воздушная разведка в интересах артиллерии : учебное пособие. – Пенза: [б. и.], 2010. – 166 с.

2 Карпович А. В., Круковский А. С. Выполнение огневой задачи с помощью комплекса воздушной разведки с БПЛА // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XVII ВНК. – СПб., 2014. – Т. 6. – С. 217–222.

3 Карпович А. В., Козлов М. В. Применение БПЛА вертолетного типа для корректирования огня артиллерии // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XVI ВНК. – СПб., 2013. – Т. 1. – С. 324–328.

- 4 Фетисов В. С., Кулбаев Б. Р. Содержание и развитие концепции «Привязанный беспилотный летательный аппарат» // Альманах современной науки и образования. – 2014. – № 3 (82). – С. 170–173.
- 5 Чернышев Ю.М., Карпович А. В. Выполнение разведывательно-огневых задач с БПЛА. – СПб.: МВАА, 2015. – 75 с.
- 6 Чернышев Ю.М., Карпович А. В. Обслуживание стрельбы артиллерии с помощью вертолета и комплекса воздушной разведки. – СПб., 2017. – 64 с.
- 7 Правила стрельбы и управления огнем артиллерии. Дивизион, батарея, взвод, оружие. Ч. 1. – М.: Воениздат, 2020. – 289 с.
- 8 Моисеев В. С., Гимадеев Р. Г., Борзов Г. Е. Методы формирования типовых траекторий полётов БПЛА артиллерийской разведки // Научный сборник. – 2009. – № 10. – С. 1–74.
- 9 Харисов В. Н., Перов А. И., Болдин В. А. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. – М., 1998. – 400 с.
- 10 Чернышев Ю.М., Карпович А. В. Выполнение разведывательно-огневых задач с БПЛА коммерческого назначения. – СПб., 2018. – 80 с.
- 11 Фетисов В. С., Адамовский В. В., Красноперов Р. А. Беспилотная авиация: терминология, классификация, современное развитие. – Уфа: НПО «Фотон», 2014. – 217 с.
- 12 Обзоры и рейтинги квадрокоптеров // Квадрокоптеры: [сайт]. – URL: <http://quadrocoptery.ru> (дата обращения: 11.09.2026).

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ СИСТЕМАМ СВЯЗИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

магистр технических наук,
преподаватель, майор Серікхан С.С.
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи,
г. Алматы, Республика Казахстан.
к.ф.-м.н., заведующая лабораторией
Грищенко В.Ф.
Институт ионосферы Академии наук РК,
г. Алматы, Республика Казахстан.
доктор философии (PhD), ассоц.
профессор, полковник Мукушев А.А.
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи,
г. Алматы, Республика Казахстан.
к.т.н., начальник кафедры, подполковник
Исабаев К.Ж
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи,
г. Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Стремительное развитие низкоорбитальных спутниковых систем связи LowEarthOrbit (LEO) а также и российской спутниковой группировки «Рассвет») привело к формированию нового класса распределённых телекоммуникационных сетей, характеризующихся большой численностью космических аппаратов, динамической топологией, малой задержкой распространения сигнала и широким пространственным охватом. Указанные особенности одновременно повышают эффективность спутниковой связи и формируют новые научно-технические задачи в области радиомониторинга, обеспечения электромагнитной совместимости и устойчивости радиоканалов к преднамеренным и непреднамеренным помехам.

В работе представлен обзор особенностей построения LEO-систем связи, определяющих характер их радиочастотной уязвимости и помехоустойчивости. Рассмотрены основные классы воздействий на радиоканалы, методы обнаружения и классификации радиосигналов, пространственно-временная и адаптивная обработка, цифровые антенные системы, методы оценки качества каналов и перспективы применения интеллектуальных алгоритмов.

Предложена классификация методов радиоэлектронного воздействия и противодействия по пространственному, частотному, временному, энергетическому и информационному признакам.

Ключевые слова: низкоорбитальные спутниковые системы, LEO, спутниковая связь, радиоэлектронное противодействие, радиомониторинг, помехоустойчивость, электромагнитная совместимость, цифровая обработка сигналов, адаптивные антенные системы, машинное обучение.

Введение. Специфика применения низкоорбитальных спутниковых систем связи LEO-сетей требует комплексных мер перехода от традиционного представления о радиоэлектронном противодействии на комплексное воздействие на отдельную радиолинию к системному подходу. Под этим понимается учет динамики группировки спутников на околоземной орбите, изменение геометрии радиоканалов, адаптивное управление ресурсами и распределённую архитектуру сети.

В обзорной статье предпринята попытка систематизировать перспективные направления исследований, включая интеллектуальный радиомониторинг, программно-конфигурируемые радиосистемы, цифровые антенные решётки, распределённые сенсорные сети и цифровые двойники спутниковых группировок.

Общеизвестно, что современные спутниковые системы связи на низких околоземных орбитах в последние годы превратились в один из наиболее динамично развивающихся классов телекоммуникационных систем. Особенности LEO-систем существенно отличаются от характеристик традиционных спутниковых радиолиний. Это связано прежде всего с тем, что космический аппарат непрерывно изменяет положение относительно наземной станции, вследствие чего параметры радиоканала являются функцией времени.

Дополнительными факторами являются доплеровский сдвиг, изменение углов прихода сигнала, динамическое переключение между спутниками, использование многолучевых антенных систем и повторное использование частотного ресурса.

Последнее обстоятельство имеет особое значение. Исследования управления взаимными помехами в многолучевых LEO-сетях показывают, что повторное использование одних и тех же частотных ресурсов в соседних лучах является важным механизмом повышения спектральной эффективности, но одновременно создаёт проблему взаимных помех и требует соответствующих методов управления. Таким образом, при исследовании радиоэлектронного противодействия LEO-системам необходимо учитывать не только характеристики отдельного сигнала, но и динамическую структуру всей сети.

Основная часть. К особенностям низкоорбитальных спутниковых систем связи можно отнести совокупность трёх основных сегментов: космического, наземного и пользовательского.

Космический сегмент включает совокупность спутников, находящихся на низких околоземных орбитах. В зависимости от архитектуры между отдельными космическими аппаратами могут использоваться межспутниковые линии связи.

Наземный сегмент включает шлюзовые станции, центры управления, системы мониторинга и другие элементы инфраструктуры. Пользовательский сегмент состоит из терминалов различных типов, обеспечивающих подключение конечных пользователей.

В отличие от традиционной схемы «один спутник - одна наземная станция», многоспутниковая архитектура формирует распределённую сеть с динамической топологией. При движении спутников изменяются зоны обслуживания, взаимное расположение терминалов и космических аппаратов, а также условия распространения радиосигналов. Также можно выделить несколько ключевых особенностей LEO-систем, в частности:

- динамическая геометрия радиолинии. Это относится к расположению спутника относительно наземного терминала, которая изменяется во времени;
- доплеровский сдвиг. Относительное движение источника и приёмника приводит к изменению наблюдаемой частоты сигнала;
- частое переключение технических систем обслуживания спутника. Для обеспечения непрерывности соединения сеть может осуществлять передачу обслуживания между космическими аппаратами;
- повторное использование частот. Один и тот же частотный ресурс может использоваться различными лучами и элементами сети;
- высокая пространственная плотность сигналов. В зоне наблюдения наземного средства одновременно могут присутствовать сигналы от нескольких космических аппаратов;
- адаптивное управление ресурсами. Современные системы способны изменять параметры обслуживания в зависимости от состояния сети и радиоканала.

Перечисленные свойства определяют необходимость разработки динамических моделей радиосреды, в которых параметры сигналов и каналов рассматриваются как изменяющиеся во времени и пространстве.

Вместе с тем увеличение плотности спутниковых группировок приводит к усложнению электромагнитной обстановки. Современные исследования ученых рассматривают интерференцию не только как возможность обеспечения широкого покрытия, между спутниками и наземными станциями, но и между различными LEO/NGSO-системами и отдельными лучами одной группировки на межспутниковых линиях связи [1-6].

В то же время, устойчивость спутникового радиоканала определяется совокупностью характеристик передатчика, приёмника, антенной системы, протоколов связи и условий распространения. Особо следует отметить явление пространственной селекции информации. Применение направленных и адаптивных антенных систем позволяет формировать требуемую диаграмму направленности и одновременно снижать влияние сигналов, приходящих с нежелательных направлений.

В таблице 1 приведена классификация методов радиоэлектронного противодействия на радиосистемы, систематизированных по нескольким признакам.

Таблица 1 – Классификация методов радиоэлектронного противодействия на радиосистемы

Признаки	Класс методов	Основные характеристики
Пространственный	Пространственно-селективные	Использование различий в направлениях прихода сигналов
Частотный	Частотно-селективные	Использование различий спектральных характеристик
Временной	Временные	Использование различий временной структуры
Энергетический	Энергетические	Изменение соотношения полезного сигнала и помехи

Как видно из данных таблицы, с точки зрения разработки научно-технических средств особенно важным является не сам процесс воздействия радиоэлектронного противодействия, а замкнутый цикл проведения радиомониторинга работы спутников, который можно описать таким образом (рисунок 1):

Обнаружение → измерение → классификация →
→ оценка состояния → выбор режима → контроль результата

Рисунок 1 – Замкнутый цикл проведения радиомониторинга работы спутников

Такой подход позволяет исследовать радиоэлектронное воздействие как самостоятельную информационно-управляющую систему. Современное средство радиомониторинга должно обеспечивать обнаружение сигналов в условиях высокой пространственной и спектральной плотности. К основным функциям такого средства можно отнести:

- обнаружение неизвестных сигналов;
- измерение параметров;
- оценка спектральных характеристик;
- определение временной структуры;
- классификация сигналов;
- пространственная оценка источников;
- сопровождение изменяющихся сигналов;
- формирование статистики состояния радиосреды.

Анализ исследований ученых по низкоорбитальным спутниковым группировкам показывает, что их можно условно разделить на несколько нижеперечисленных направлений.

Первое направление связано с математическим моделированием интерференции. В таких исследованиях, изучена вероятность отказа канала, пространственное положение спутников и статистические характеристики мощности мешающих сигналов. Например, применение стохастической геометрии позволяет получать статистические характеристики расстояния до ближайшего спутника и мощности интерференции в многовысотных LEO-сетях [2].

Второе направление, это управление межлучевой интерференцией. В этих исследованиях рассматриваются распределение ресурсов между соседними лучами. Совместное планирование лучей и распределение ресурсов позволяют учитывать, как нагрузку сети, так и ограничения по интерференции [3].

Третье направление → адаптивный beamforming. В частности, исследуются robustbeamforming при неполной информации о канале, многоспутниковая кооперация и методы формирования пространственных нулей в направлениях нежелательной интерференции [4-7]. Исследования, проведенные учеными Алсенви М., Лагунас Э. и Чатзинотас С. были направлены на изучение неопределённостей параметров канала.

Четвёртое направление, это совместное использование спектра LEO и GEO/других NGSO-систем. Здесь изучены пространственное разделение, выбор спутника, beamhopping и совместное формирование диаграмм направленности [8–11].

Пятое направление связано с более высокими технологиями, с интеллектуальными алгоритмами. В этих работах исследовались – машинное обучение, federatedlearning и прогнозирование состояния радиосреды для управления beamforming и радиоресурсами [12-14].

Особенности LEO-систем состоят в том, что их классификация должна учитывать динамику их параметров. Например, изменение частоты сигнала во времени может быть не признаком изменения режима работы передатчика, а естественным следствием относительного движения космического аппарата и наземного терминала. Следовательно, к перспективным направлениям радиомониторинга работы спутников можно отнести использование многомерного описания сигнала. И в этом плане наиболее перспективными направлениями развития средств радиомониторинга является применение цифровых антенных решёток. Из большого массива NN антенных элементов выходной сигнал может быть представлен как комплексный вектор весовых коэффициентов. Изменение параметром этих сигналов спутниковая система может адаптировать пространственную характеристику приёма к текущей радиосреде. И в этой ситуации особую перспективность имеют алгоритмы, использующие:

- пространственную фильтрацию;
- адаптивное подавление помех;
- оценивание направления прихода;
- многоканальную цифровую обработку;
- совместную пространственно-временную обработку.

Для группировки спутников преимущество таких методов связано с динамичностью радиосреды: алгоритм должен не просто один раз определить оптимальную пространственную конфигурацию, а непрерывно адаптироваться к изменению положения источников. Увеличение числа сигналов и сложность их временно-пространственной структуры делают перспективным применение машинного обучения. В этом плане к перспективным направлениям можно отнести:

- автоматическую классификацию радиосигналов;
- обнаружение аномалий;
- прогнозирование изменения состояния радиоканала;
- оценка вероятности деградации качества;
- интеллектуальный выбор режима мониторинга;
- объединение данных от нескольких пространственно-разнесённых сенсоров.

При этом применение искусственного интеллекта требует особого внимания к качеству обучающих выборок. Модель, обученная на ограниченном наборе сигналов, может демонстрировать значительное снижение качества при изменении условий распространения или появлении новых типов сигналов. Для ЛЕО-систем перспективным является переход от одиночного средства мониторинга к распределённой сети сенсоров. Преимуществами такого подхода являются:

- повышение пространственной наблюдаемости;
- снижение неопределённости при определении источника сигнала;
- возможность корреляции и наблюдений;
- повышение устойчивости системы мониторинга;
- получение информации о динамике сигнала в различных точках.

Распределённая архитектура особенно интересна для исследования многоспутниковых группировок, поскольку наблюдаемые сигналы могут иметь различные углы прихода и изменяющиеся траектории.

Для объективного сравнения различных методов необходимо использовать систему качественных и количественных критериев. К ним можно отнести:

- вероятность обнаружения сигнала;
- вероятность возникновения ложной тревоги;
- вероятность правильной классификации;
- точность оценки параметров;
- время обнаружения;
- время реакции;
- устойчивость алгоритма к изменению условий;
- пространственная селективность;
- вычислительная сложность;
- энергетическая эффективность.

Такой подход позволяет отказаться от оценки эффективности только по энергетическому критерию и перейти к оценке фактического влияния на

качество функционирования сети. Одной из наиболее перспективных методологий представляется создание цифрового двойника LEO-системы.

Такой двойник должен учитывать:

- орбитальную динамику;
- конфигурацию группировки;
- положение наземных станций;
- характеристики радиоканалов;
- модели распространения;
- структуру трафика;
- алгоритмы управления ресурсами;
- модели помех.

В отличие от натурных испытаний, цифровое моделирование позволяет исследовать большое количество сценариев без создания реального радиоизлучения. Особенно важным является обращение к использованию программного продукта Hardware-in-the-Loop (HIL), при котором часть модели выполняется в программном виде, а отдельные элементы реального оборудования включаются в замкнутый контур испытаний. Это позволяет исследовать работу приёмных трактов, цифровых процессоров и антенных систем в контролируемой виртуальной радиосреде. Следует отметить и такой факт, что исследования, проводимые в космосе в данной области, должны учитывать международное регулирование использования радиочастотного спектра. Правила радиосвязи (МСЭ) устанавливают международные основы использования радиочастотного спектра и спутниковых орбитальных ресурсов. МСЭ отдельно указывает, что вредные помехи могут иметь как непреднамеренное, так и преднамеренное происхождение, а устранение таких помех предполагает сочетание технологических и регуляторных механизмов. Поэтому, перспективная методология исследований должна учитывать не только техническую эффективность средств, но и электромагнитную совместимость, пространственную избирательность и минимизацию побочного воздействия на другие радиосистемы.

Анализ работ, проведенных учеными, указывают на основные перспективные направления исследований, к ним можно отнести:

- интеллектуальный радиомониторинг LEO-сетей на основе машинного обучения;
- совместная пространственно-временная обработка для повышения точности обнаружения и классификации сигналов;
- распределённые сенсорные сети, объединяющие информацию от нескольких наблюдательных пунктов;
- программно-конфигурируемые радиосистемы, позволяющие быстро адаптировать алгоритмы обработки;
- цифровые антенные решётки с адаптивным управлением пространственными характеристиками;
- цифровые двойники спутниковых группировок для исследования сложных сценариев в безопасной моделируемой среде;

– многокритериальная оценка устойчивости, учитывающая не только энергетические показатели, но и качество обслуживания;

– совместное исследование радиочастотной и сетевой устойчивости, поскольку нарушение физического радиоканала не обязательно непосредственно приводит к потере обслуживания благодаря механизмам адаптации и маршрутизации.

Заключение. Низкоорбитальные спутниковые системы связи формируют новый класс распределённых радиосетей, отличающихся высокой динамичностью, большим количеством космических аппаратов, повторным использованием частотного ресурса и сложной структурой взаимодействия космического, наземного и пользовательского сегментов.

Проведённый обзор показывает, что исследование радиоэлектронного противодействия таким системам не может ограничиваться анализом отдельной радиолинии. Необходимо разработать системный подход, учитывающий пространственно-временную динамику группировки, адаптацию параметров радиоканала, архитектуру сети и механизмы обеспечения качества обслуживания.

Наиболее перспективными направлениями являются цифровая обработка сигналов, адаптивные антенные системы, распределённый радиомониторинг, машинное обучение и цифровые двойники. Их совместное использование позволяет перейти от статического анализа радиосреды к интеллектуальной системе непрерывного мониторинга и оценки состояния LEO-сети.

Важным направлением дальнейших работ является создание унифицированной модели LEO-радиосреды, позволяющей сопоставлять различные алгоритмы обнаружения, классификации и оценки устойчивости в одинаковых условиях эксперимента. При этом исследования должны проводиться с учётом действующих требований международного регулирования радиочастотного спектра и недопущения вредных помех другим радиослужбам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Yun J., An T., Jo H., Ku B.-J., Oh D.-S., Joo C. Dynamic Downlink Interference Management in LEO Satellite Networks Without Direct Communications // IEEE Access – 2023. – Vol. 11. – P. 24137-24148. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3253

2 Чой К.С., Баччелли Ф. Процессы определения точек Кокса для многовысотных спутниковых сетей LEO//IEEEET transactions по автомобильным технологиям – 2024. – Том 73, №10. – С.15916-15921. – DOI:10.1109/TVT.2024.3414

3 Лин З., Ни З., Куанг Л., Цзян С., Хуан З. Стратегия переключения луча спутников NGSO, основанная на балансировке нагрузки и предотвращении помех для совместной работы с системами GSO//Информационные письма IEEE – 2023. – Том 27, №1. – С.278-282. – DOI:10.1109/LCOMM.2022.3213912.

4 Алсенви М., Лагунас Э., Чатзинотас С. Надежное формирование луча для массовой спутниковой связи MIMOLEO: система обучения, учитывающая

риски// IEEE Transactionson Vehicular Technology –2024. – Том 73, №5. – С.6560-6571. – DOI:10.1109/TVT. 2023.3338065.

5 СеХ., Дин Х., Чжан Г. Снижение помех с помощью формирования луча для систем спутниковой связи LEO с общим использованием спектра// IEEE Systems –2023. – Том17, №4. – С.5822-5830. – DOI:10.1109/JSYST.2023.3286117.

6 Чжэн Б., Лин С., Чжан Р. Интеллектуальная спутниковая связь LEO с использованием отражающей поверхности: совместное пассивное формирование луча и оценка распределенных каналов// IEEE по избранным областям связи –2022. –Том.40, №10. – С.3057-3070. – DOI:10.1109/JSAC.2022.3196119.

7 Лю Ю., Ли К., Ли Дж., Фенг Л. Надежная энергоэффективная гибридная конструкция формирования луча для массивных систем спутниковой связи// MIMO LEO – 2022. – Том 10. – С.63085-63099. – DOI:10.1109/ 2022.3181178.

8 Паласиос, Дж. Разработка динамической кодовой книги для аналогового формирования луча в спутниковой связи MIMO LEO / Дж. Паласиос, Н. Гонсалес-Прельич, С. Москера, Т. Симидзу // IEEE International Conference on Communications (ICC). – 2022. – С. 16.

9 Даккак М. Р., Ривьелло Д. Г., Гвидотти А, Ванелли-Коралли А. Оценка цифровых алгоритмов формирования луча MU-MIMO в спутниковых системах B5G/6G LEO // Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Satellite Multimedia Systems Systems and the 17th Signal Processing for Space Communications Workshop. – 2022. – С. 1-6.

10 Zheng Z., Jing W., Lu Z., Wu Q., Zhang H. and Gesbert D. Cooperative Multi-Satellite and Multi-RIS Beamforming: Enhancing LEO SatCom and Mitigating LEO-GEO Intersystem Interference// Journal on Selected Areas in Communications. – 2025. – Vol. 43, No.1. P. 279-296.

11 Zheng Z., Jing W., Lu Z., Wen X., Li W. RIS-Aided LEO SatCom with LEO-GEO Inter-System Interference Mitigation: Joint Multi-Satellite Multi-RIS Beamforming// In 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) – 2024. – P. 1-6.

12 Caceres F. M., Al-Hourani A, Sithamparanathan A. K., [et al.]. Interference Mitigation in LEO Constellations with Limited Radio Environment Information // IEEE International Conference on Communications (ICC) – 2024. – P. 4880-4885. – DOI: 10.1109/ICC51166.2024.10622540.

13 Chen X., Luo Z. Asynchronous Interference Mitigation for LEO Multi-Satellite Cooperative Systems // IEEE Transactions on Wireless Communications – 2024. – Vol. 23, No. 10. – P. 14956-14971. – DOI: 10.1109/TWC.2024.3422101.

14 Kim E., Roberts I. P, Andrews J. G. Downlink Analysis and Evaluation of Multi-Beam LEO Satellite Communication in Shadowed Rician Channels // IEEE Transactions on Vehicular Technology –2024. – Vol. 73, No. 2. – P. 2061-2075. – DOI: 10.1109/TVT.2023.3312959.

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ УГРОЗ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВИЗАЦИИ ВООРУЖЕННЫХ КОНФЛИКТОВ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

доктор философии PhD, профессор,
полковник запаса Саурбаев Т.К.,
доктор философии PhD,
полковник запаса Кемалов Б.К.
АО «Центр военно-стратегических
исследований»
г. Астана, Республика Казахстан

Аннотация. Цифровизация вооруженных конфликтов сопровождается существенным изменением характера информационного противоборства, увеличением скорости распространения информации, развитием социальных сетей и цифровых платформ, применением технологий искусственного интеллекта, автоматизированных средств распространения контента и методов информационно-психологического воздействия. В этих условиях традиционные подходы к анализу информационной обстановки, основанные преимущественно на экспертной оценке отдельных событий, не в полной мере соответствуют требованиям своевременного выявления и прогнозирования информационных угроз.

Рассмотрена эволюция научных представлений от концепций информационной войны и информационного превосходства к ситуационной осведомленности, анализу больших данных, машинному обучению, вероятностному моделированию, графовой аналитике, большим языковым моделям и когнитивной аналитике.

Установлено, что зарубежные исследования характеризуются интенсивным применением технологий искусственного интеллекта и анализа цифровых коммуникаций. Вместе с тем в рассмотренных исследованиях сохраняется разрыв между технологическими средствами анализа информационных потоков, вероятностной оценкой неопределенности, исследованием психологических факторов информационного воздействия и поддержкой принятия решений.

Ключевые слова: информационное противоборство, информационные угрозы, мониторинг, прогнозирование, искусственный интеллект, машинное обучение, вероятностное моделирование, когнитивное противоборство, информационно-психологическое воздействие, поддержка принятия решений.

Введение. Актуальность исследования. Современный этап развития вооруженного противоборства характеризуется глубокими изменениями, связанными с цифровизацией процессов управления, глобальным

распространением информационно-коммуникационных технологий и формированием единого цифрового пространства [1].

Особое влияние на трансформацию информационного пространства оказывает развитие искусственного интеллекта. Алгоритмы машинного обучения применяются для классификации и анализа больших массивов информации, выявления аномалий и определения закономерностей информационной активности.

Распространение генеративного искусственного интеллекта дополнительно изменило характер информационных угроз. Большие языковые модели и системы генерации изображений, аудио и видео позволяют создавать значительные объемы синтетического контента, адаптировать сообщения под характеристики целевых аудиторий и автоматизировать отдельные процессы информационного воздействия. Одновременно развитие технологий deepfake затрудняет установление достоверности цифрового контента.

Параллельно развивается концепция когнитивного противоборства, в рамках которой объектом воздействия становится не только информационная инфраструктура, но и процессы восприятия, интерпретации информации и принятия решений человеком; значимость когнитивных механизмов принятия решений фундаментально раскрыта в работах D.Kahneman [2].

В результате изменяются требования к мониторингу информационной обстановки. Задача заключается уже не только в обнаружении конкретного сообщения или информационного события, но и в выявлении устойчивых закономерностей, аномальной активности, признаков координации, оценке потенциального воздействия и прогнозировании дальнейшего развития информационной ситуации.

Целью настоящей статьи является систематизация и сравнительный анализ зарубежных подходов к мониторингу и прогнозированию информационных угроз, выявление их ограничений и определение перспектив развития интеллектуальных средств анализа информационной обстановки в интересах информационного противоборства.

Научная новизна статьи заключается в систематизации современных подходов к мониторингу и прогнозированию информационных угроз и выявлении научно-методологического разрыва между анализом цифровых потоков, вероятностной оценкой неопределенности, когнитивных и психометрических факторов и поддержкой принятия решений. Обоснована перспективность перехода к гибридным интеллектуальным подходам, обеспечивающим мониторинг и прогнозирование в условиях неполноты данных и высокой динамики информационной среды.

Основная часть. Результаты исследования. Установлен переход от концептуальных моделей информационной войны к анализу больших данных и интеллектуальному прогнозированию. Зарубежные исследования преимущественно развивают технологические методы анализа цифровых коммуникаций, тогда как российская школа обладает значительным теоретико-методологическим заделом в области информационного противоборства,

информационно-психологического воздействия и рефлексивного управления. Выявлена недостаточная интеграция анализа разнородных данных, вероятностной оценки, прогнозирования и оценки информационно-психологического воздействия. Перспективным направлением определено развитие гибридных интеллектуальных моделей поддержки принятия решений.

1) Эволюция научных подходов к исследованию информационных угроз.

Формирование современных методов мониторинга информационных угроз является результатом длительного развития представлений о роли информации в вооруженном противоборстве. Условно можно выделить три этапа.

Первый этап, охватывающий преимущественно 1990-е и начало 2000-х годов, связан с формированием концепций информационной войны, информационного превосходства и сетево-центрических операций. В ранних исследованиях информационная среда стала рассматриваться как самостоятельный фактор военного противоборства, а последующее развитие концепций информационной войны показало многомерность воздействия на информацию, информационные системы и процессы принятия решений.

D. Alberts, J.J. Garstka и F.P. Stein развили положения сетево-центрического подхода [4], в рамках которого информационное превосходство связывается с объединением распределенных сил, средств и органов управления посредством информационных сетей. J. Arquilla и D. Ronfeldt исследовали сетевые формы противоборства [5] и влияние развития коммуникационных технологий на организацию конфликтов.

Таким образом, первый этап сформировал концептуальные основы информационного противоборства, однако автоматизированный анализ больших информационных потоков и интеллектуальное прогнозирование еще не являлись центральными объектами исследований.

Второй этап, приблизительно соответствующий периоду 2005-2015 годов, связан с цифровизацией информационной среды и развитием ситуационной осведомленности, анализа больших данных и систем поддержки принятия решений.

Третий этап, начавшийся приблизительно после 2015 года, характеризуется активным применением искусственного интеллекта. Machine Learning используется для классификации, обнаружения аномалий и прогнозирования [9, 10]. Natural Language Processing применяется для анализа текстов, определения тематической и эмоциональной направленности сообщений. Deep Learning обеспечивает обработку мультимодальной информации [11]. Graph Analytics позволяет анализировать структуру информационных взаимодействий и выявлять признаки координированной активности.

Таким образом, эволюция научных подходов характеризуется переходом от концептуального понимания информационной войны к цифровой аналитике, а затем к интеллектуальному анализу и прогнозированию информационных процессов (таблица 1).

2) Зарубежные исследования мониторинга информационных угроз.

Зарубежные исследования развиваются одновременно в военной, технологической, социально-коммуникационной и когнитивной областях.

3) Современные методы мониторинга и прогнозирования информационных угроз.

Современный инструментарий мониторинга информационных угроз включает несколько классов методов.

Таблица 1 – Эволюция научных подходов к анализу информационных угроз

Период	Основной объект	Преобладающие подходы	Основной результат	Основное ограничение
1990-2005	Информационная война	системный анализ, сетевые концепции, OODA	формирование теории информационного противоборства	ограниченная автоматизация
2005-2015	Цифровая информационная среда	Situation Awareness, Big Data, Decision Support	развитие автоматизированной аналитики	ограниченное применение ИИ
2015-2020	Социальные сети и цифровые коммуникации	ML, NLP, Deep Learning, Graph Analytics	автоматизация выявления информационных событий	преимущественно специализированные модели
2020-2025	Когнитивная и мультимодальная информационная среда	AI, LLM, Generative AI, Hybrid AI	интеллектуальный анализ разнородных данных	недостаточная интеграция методов прогнозирования и оценки воздействия

Классические экспертные системы используют заранее заданные правила и отличаются объяснимостью, но имеют ограниченную адаптивность.

Машинное обучение применяется для классификации сообщений, обнаружения аномалий и оценки вероятности принадлежности событий к определенным классам угроз [9, 10]. Ограничение связано с качеством исходных данных и обучающих выборок.

Глубокое обучение расширяет возможности обработки текста, изображений, аудио и видео [11], однако требует значительных вычислительных ресурсов и дополнительных механизмов контроля объяснимости.

Вероятностные методы, включая Байесовские модели, позволяют учитывать неопределенность, обновлять оценки при поступлении новых данных и формировать вероятностные сценарии развития ситуации [10, 21, 22].

Графовая аналитика представляет информационную среду как сеть взаимосвязанных субъектов, сообщений и каналов и позволяет выявлять сообщества, центры влияния и признаки координации [23].

Большие языковые модели расширяют возможности семантического анализа и обобщения больших массивов текста, но требуют обязательной проверки результатов из-за риска фактических ошибок.

Когнитивная аналитика дополняет анализ информационных потоков исследованием восприятия, эмоциональных реакций и поведения объектов информационного воздействия (таблица 2).

Перспективным является гибридный подход, объединяющий методы с различными сильными сторонами и компенсирующий их ограничения

Таблица 2 – Сравнительная характеристика методов мониторинга информационных угроз

Подход	Основные возможности	Преимущества	Ограничения
Rule-Based	экспертная оценка событий	объяснимость	низкая адаптивность
Machine Learning	классификация, обнаружение аномалий	обучение на данных	зависимость от выборки
Deep Learning	мультимодальный анализ	обработка сложных данных	ресурсоемкость, объяснимость
Bayesian Models	вероятностная оценка и прогнозирование	учет неопределенности	сложность построения модели
Graph Analytics	анализ информационных сетей	выявление связей и координации	требования к качеству графовых данных
LLM	семантический анализ больших массивов текста	масштабируемость анализа	необходимость верификации
Cognitive Analytics	оценка когнитивных и поведенческих факторов	анализ потенциального воздействия	сложность формализации
Hybrid AI	интеграция нескольких методов	комплексность и адаптивность	архитектурная и вычислительная сложность

4) Сравнительный анализ и нерешенные научные проблемы

Однако практическая задача мониторинга информационных угроз предполагает не последовательное применение изолированных методов, а их согласованное использование в едином аналитическом процессе: получение информации, обнаружение аномалии, идентификация признаков информационного воздействия, оценка уровня угрозы, прогнозирование ее развития и представление результата лицу, принимающему решение.

Проведенный анализ позволяет выделить несколько взаимосвязанных нерешенных вопросов.

Первый связан с интеграцией разнородных данных. Информационные угрозы формируются одновременно в текстовой, визуальной, аудиовизуальной и сетевой среде. Поэтому анализ отдельного типа данных способен отражать только часть наблюдаемой информационной ситуации.

Второй вопрос заключается в учете неопределенности. В условиях информационного противоборства данные могут быть неполными, противоречивыми, намеренно искаженными либо поступать с различной задержкой. Детерминированная классификация в подобных условиях не всегда позволяет адекватно оценивать достоверность аналитического вывода.

Третий вопрос связан с переходом от обнаружения к прогнозированию. Обнаружение уже сформировавшейся информационной кампании имеет преимущественно реактивный характер. Для поддержки управления требуется оценка вероятных сценариев дальнейшего развития информационной ситуации.

Четвертый вопрос заключается в соотношении анализа информационной активности и оценки потенциального воздействия. Рост количества сообщений или появление координированной активности сам по себе не позволяет однозначно оценить последствия воздействия на конкретную аудиторию. Это обуславливает необходимость развития методов, связывающих параметры цифровой среды с когнитивными и психометрическими показателями.

Пятый вопрос касается функционирования аналитических средств в условиях ограниченности информации и вычислительных ресурсов. Значительная часть современных методов разрабатывается исходя из доступности развитой вычислительной и коммуникационной инфраструктуры. Однако кризисная и военная обстановка может сопровождаться нарушением каналов связи, задержками поступления данных и сокращением доступных вычислительных ресурсов.

Таким образом, основной научный пробел заключается не в отсутствии отдельных технологий анализа информационных угроз, а в недостаточной разработанности методологии их интеграции в единый процесс мониторинга, вероятностной оценки, прогнозирования и информационно-аналитической поддержки принятия решений.

Заключение. Для дальнейших исследований целесообразно формализовать принципы интеграции цифровых и психометрических показателей, разработать методы прогнозирования при неполноте данных и оценить устойчивость моделей в условиях ограниченных информационно-коммуникационных ресурсов. Полученные положения могут служить методологической основой для развития отечественных средств мониторинга и прогнозирования информационных угроз в интересах информационного противоборства Вооруженных Сил Республики Казахстан.

Перспективным направлением определено применение гибридных интеллектуальных моделей, объединяющих машинное обучение, вероятностное моделирование, NLP, графовую и когнитивную аналитику. Такая архитектура может обеспечить переход от фиксации отдельных информационных событий к комплексной оценке информационной обстановки.

Основной научный результат исследования заключается в выявлении необходимости интеграции указанных направлений в единый аналитический процесс, включающий сбор и обработку разнородных данных, обнаружение аномальной активности, вероятностную оценку угроз, прогнозирование их развития и представление результатов лицу, принимающему решение.

Установлено, что современные исследования преимущественно развивают специализированные технологии: машинное обучение, NLP, глубокое обучение, графовую аналитику, вероятностное моделирование и генеративный ИИ. Вместе с тем сохраняется методологический разрыв между анализом цифровых потоков,

учетом неопределенности, оценкой информационно-психологического воздействия и поддержкой принятия решений.

Проведенный сравнительный анализ показал, что развитие мониторинга информационных угроз прошло путь от концепций информационной войны и информационного превосходства к анализу больших данных, ситуационной осведомленности и интеллектуальному прогнозированию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Castells, M. The Rise of the Network Society / M. Castells. – 2nd ed., with a new pref. – Chichester.: Wiley-Blackwell, 2010. – 597 p.

2 Kahneman, D. Thinking, Fast and Slow / D. Kahneman. – New York.: Farrar, Straus and Giroux, 2011. – 512 p.

3 Boyd, J. R. A Discourse on Winning and Losing. AL.: Air University Press, 2018. – 400 p.

4 Alberts, D.S. Network Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority / D.S. Alberts, J.J. Garstka, F.P. Stein. – 2nd ed. (rev.). – Washington, DC: CCRP Publication Series, 2000. – 287 p.

5 Networks and Netwars: The Future of Terror, Crime, and Militancy / edited by J. Arquilla, D. Ronfeldt. – Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2001. – 380 p.

6 Endsley M.R. Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems // Human Factors – 1995. – Vol. 37. No. 1. – P. 32-64.

7 Davenport, T.H. Competing on Analytics: The New Science of Winning / T. H. Davenport, J. G. Harris. – Boston, MA.: Harvard Business School Press, 2007. – 240 p.

8 Kott A., Wang C., Erbacher R.F., eds. Cyber Defense and Situational Awareness // Cham: Springer. – 2014. – Vol. 62. P. 1-17. DOI: 10.1007/978-3-319-11391-3.

9 Russell, S. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Global ed. – Harlow: Pearson, 2021. – 1166 p.

10 Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. – New York: Springer, 2006. – 738 p.

11 Goodfellow, I. Deep Learning. – Cambridge, MA.: MIT Press, 2016. – 775 p.

12 Defense Advanced Research Projects Agency. Semantic Forensics (SemaFor). – URL: <https://www.darpa.mil/research/programs/semantic-forensics> (дата обращения: 28.07.2026).

13 Computational Propaganda: Political Parties, Politicians, and Political Manipulation on Social Media. – Oxford.: Oxford University Press, 2018. – 272 p.

14 Howard, P. N. Bots, #StrongerIn, and #Brexit: Computational Propaganda during the UK-EU Referendum // arXiv preprint arXiv:1606.06356 – 2016. – 6 p. (дата обращения: 28.07.2026).

15 NATO Strategic Communications Centre of Excellence. Publications and Research on Strategic Communications and the Information Environment. – URL: <https://stratcomcoe.org/publications> (дата обращения: 28.07.2026).

- 16 2nd EEAS Report on Foreign Information Manipulation and Interference Threats: A Framework for Networked Defence. European External Action Service. – Brussels.: EEAS, 2024. – 38 p.
- 17 Расторгуев С.П. Информационная война. М.: Радио и связь, 1999. – 416с.
- 18 Расторгуев С.П. Философия информационной войны. М.: Московский психолого-социальный институт, 2003. – 496с.
- 19 Манойло А.В. Государственная информационная политика в особых условиях. М.: МИФИ, 2003. – 388 с.
- 20 Манойло А.В. Технологии несилового разрешения современных конфликтов. М.: Горячая линия-Телеком, 2008. – 392с.
- 21 Murphy K. P. Probabilistic Machine Learning: An Introduction. – Cambridge, MA.: MIT Press, 2022. – 864 p.
- 22 Blei D.M., Kucukelbir A., McAuliffe J.D. Variational Inference: A Review for Statisticians // Journal of the American Statistical Association –2017. – Vol. 112., No. 518. – P. 859-877. – DOI: 10.1080/01621459.2017.1285773.
- 23 Sabir E., Jaiswal A., AbdAlmageed W., Natarajan P. MEG: Multi-Evidence GNN for Multimodal Semantic Forensics // arXiv preprint arXiv:2011.11286 – 2020. – 10 p. – URL: <https://arxiv.org/abs/2011.11286> (дата обращения: 28.07.2026).

**ПРЕДИКТИВНАЯ АНАЛИТИКА И ТЕХНОЛОГИИ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМЕ
ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЕННОСЛУЖАЩИХ:
ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ**

доктор философии PhD, профессор,
полковник запаса Саурбаев Т.К.,
доктор философии PhD,
капитан второго ранга запаса
Бельгибеков Н.А.
АО «Центр военно-стратегических
исследований»,
г. Астана, Республика Казахстан

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор современных зарубежных исследований, посвященных применению технологий искусственного интеллекта в системе психологического обеспечения военнослужащих. Рассмотрена эволюция научных подходов к оценке и прогнозированию психологического состояния личного состава - от традиционной психодиагностики и статистических методов анализа к использованию технологий больших данных, машинного обучения, объяснимого искусственного интеллекта (Explainable Artificial Intelligence), цифрового фенотипирования (Digital Phenotyping) и интеллектуальных систем поддержки принятия решений. Проведен сравнительный анализ крупнейших международных исследовательских программ Army Study to Assess Risk and Resilience in Servicemembers (Army STARRS), Recovery Engagement and Coordination for Health - Veterans Enhanced Treatment (REACH VET), а также исследований Агентства перспективных исследовательских проектов МО США (DARPA) и Научно-технологической организации НАТО (NATO Science and Technology Organization).

Ключевые слова: искусственный интеллект; предиктивная аналитика; военная психология; психологическое обеспечение военнослужащих; машинное обучение; Human Performance; Army STARRS; REACH VET; Explainable Artificial Intelligence; Digital Phenotyping; интеллектуальные системы поддержки принятия решений; социально-психологическая адаптация.

Введение. Цифровизация вооруженных сил, развитие искусственного интеллекта и анализа больших данных изменяют систему психологического обеспечения военнослужащих [1-4]. Традиционная модель периодической психодиагностики и экспертной оценки постепенно дополняется непрерывным мониторингом и предиктивной аналитикой [1-7].

За последние два десятилетия акцент сместился от выявления уже сформировавшихся нарушений к раннему прогнозированию психологических рисков и профилактике.

Несмотря на прогресс, большинство публикаций посвящено отдельным технологиям или проектам. Недостаточно систематизированы эволюция подходов, сравнительные возможности ИИ и перспективы их комплексного применения в военной психологии.

Цель статьи – систематизировать и критически проанализировать зарубежные исследования применения ИИ в психологическом обеспечении военнослужащих, сопоставить основные исследовательские программы и определить перспективы предиктивной аналитики.

Научная новизна заключается в объединении результатов международных проектов в единую систему и выявлении перехода от традиционной психодиагностики к предиктивной аналитике и интеллектуальной поддержке принятия решений.

Методологическую основу составили системный и сравнительный анализ, библиометрический и контент-анализ публикаций, а также обобщение фундаментальных и прикладных исследований в области военной психологии, ИИ и Big Data.

Основная часть. Эволюция зарубежных подходов к психологическому обеспечению военнослужащих в условиях цифровой трансформации вооруженных сил (Таблица 1).

Развитие системы психологического обеспечения отражает переход от реактивной психодиагностики к превентивным и предиктивным моделям [10-13, 18-21].

Первый этап (до начала 2000-х годов) характеризовался традиционной психодиагностикой, экспертной оценкой и медицинским обследованием. Модель позволяла оценивать текущее состояние, но практически не обеспечивала его прогнозирование [18, 19].

Второй этап, связанный с операциями в Афганистане и Ираке, выявил ограничения традиционной модели и стимулировал переход к раннему выявлению факторов риска и профилактике кризисных состояний [18-20].

Третий этап, после 2010 года, связан с внедрением Big Data и объединением психодиагностических, медицинских, кадровых и иных данных, что создало основу для крупных проектов, прежде всего Army STARRS [18-20].

Следующий этап связан с Machine Learning, позволившим выявлять сложные взаимосвязи между психологическими, медицинскими, социальными и организационными показателями. Применение регрессионных моделей, Random Forest, Gradient Boosting, XGBoost, LightGBM, SVM и нейронных сетей расширило возможности прогнозирования [1-7].

Дальнейшее развитие привело к Explainable AI, позволяющему интерпретировать вклад факторов в прогноз и повышать доверие к интеллектуальным системам [3-5].

Современный этап характеризуется мультимодальными системами, объединяющими психометрические, медицинские, психофизиологические и поведенческие данные, включая сведения с носимых сенсоров. Фокус смещается к Human Performance, то есть оценке устойчивости, когнитивной эффективности и адаптационного потенциала военнослужащих [10-13].

Таким образом, зарубежная военная психология перешла от реактивной модели к предиктивной аналитике, что сформировало основу современных интеллектуальных систем психологического обеспечения.

Таблица 1 – Этапы развития зарубежных исследований в области применения искусственного интеллекта в системе психологического обеспечения военнослужащих

Период	Основное содержание исследований	Доминирующие технологии	Основной научный результат
до 2000 г.	Классическая психодиагностика	Психометрические методики, экспертные оценки	Диагностика текущего психологического состояния
2000-2010 гг.	Исследование факторов риска	Статистический анализ, регрессионные модели	Выявление факторов суицид. поведения и ПТСР
2010-2015 гг.	Big Data в военной психологии	Анализ больших данных	Создание крупных интегрированных баз данных
2015-2020 гг.	Предиктивная аналитика	Machine Learning, Random Forest, XGBoost	Прогнозирование психологических рисков
2020-2026 гг.	Интеллектуальные системы поддержки решений	Explainable AI, Digital Phenotyping, Multimodal AI	Комплексное управление Human Performance
Источник: составлено автором по материалам [1-24].			

Army STARRS: формирование новой парадигмы предиктивной военной психологии.

В Army STARRS применялись многомерный статистический анализ, логистическая регрессия, байесовское моделирование и машинное обучение. Результаты показали, что психологические риски определяются совокупностью индивидуальных, медицинских, социальных и организационных факторов [19-21].

Важным результатом Army STARRS стало использование административных данных: кадровой информации, истории службы, медицинских обращений и дисциплинарной практики. Их комплексный анализ позволил разрабатывать алгоритмы стратификации риска [18-21].

Ограничением Army STARRS является опора преимущественно на данные армии США, что ограничивает прямую переносимость моделей (таблица 2). Кроме того, акцент делался на психических расстройствах и суицидальном поведении, тогда как социально-психологическая адаптация и климат подразделений изучены в меньшей степени [18-21].

REACH VET: переход от научных исследований к практическому применению искусственного интеллекта. Наиболее значимым прикладным проектом стала REACH VET. Система использует машинное обучение для анализа электронных медицинских карт и формирования интегральной оценки риска [22-24].

REACH VET сохраняет ведущую роль врача и психолога: ИИ выполняет функцию поддержки принятия решений, а окончательное решение остается за специалистом по принципу Human-in-the-Loop [22, 23].

Ограничение REACH VET связано с преобладанием медицинских данных и недостаточным учетом условий службы, морально-психологического климата и социально-психологической адаптации. Эффективность также зависит от развитой цифровой медицинской инфраструктуры [22-24].

Таблица 2 – Сравнительная характеристика крупнейших зарубежных исследовательских программ

Проект	Цель	Объем данных	Использование ИИ	Основной научный результат	Ограничения
Army STARRS	Выявление факторов риска	Более 110 тыс. в/сл, более 1 млрд административных записей	Машинное обучение, статистическое моделирование	Создание новой парадигмы предиктивной воен. психологии	Национальная выборка США
STARRS-LS	Долговремен. наблюдение	Лонгитюдные данные участников Army STARRS	Предиктивные модели	Подтверждение устойчивости факторов риска	Ограниченная междунар. применимость
REACH VET	Практич. выявление лиц высокого риска	Электронные медицинские карты ветеранов	Machine Learning	Первое масштаб. внедрение ИИ в клинич. практику	Преимущественно медицинские данные
DARPA	Повышение Human Performance	Психофизиол. и сенсорные данные	AI, нейротехнологии	Развитие интеллект. сопровод. принятия решений	Высокая технологическая сложность
NATO STO	Развитие Human Performance	Международные исследования	AI, Big Data	Формирование концепции Cognitive Superiority	Недостаток унифицированных моделей
Источник: составлено автором по материалам [8-13, 18-24].					

DARPA и NATO Science and Technology Organization: переход от прогнозирования психологических рисков к управлению человеческим потенциалом.

В центре внимания находится не отдельное нарушение, а совокупность когнитивных, эмоциональных, психофизиологических и профессиональных характеристик, определяющих эффективность военнослужащего. Это соответствует концепции Human Performance [8, 9, 13].

Исследовательские программы DARPA.

Одно из направлений DARPA - Human-AI Teaming, при котором ИИ анализирует данные, прогнозирует развитие ситуации и формирует рекомендации, а решение сохраняется за человеком. Параллельно исследуются когнитивная устойчивость, носимые сенсоры и психофизиологический мониторинг.

Одновременно развиваются проекты по изучению когнитивной устойчивости военнослужащих, применению носимых сенсорных устройств, психофизиологическому мониторингу и нейротехнологиям. Анализ данных о сердечном ритме, качестве сна, двигательной активности и других физиологических показателях позволяет своевременно выявлять признаки функционального истощения и снижения когнитивной эффективности. Исследования DARPA ориентированы не на лечение последствий психологических нарушений, а на предупреждение снижения эффективности деятельности военнослужащих.

Исследования NATO Science and Technology Organization

NATO STO развивает концепцию Cognitive Superiority и методы ИИ, анализа данных, моделирования, VR/AR и оценки Human Performance на основе психометрических, психофизиологических и поведенческих данных [10-13].

Заключение. Полученные результаты обосновывают перспективность разработки национальных интеллектуальных систем психологического обеспечения, объединяющих психометрические, медицинские, психофизиологические, поведенческие и организационные показатели. Такая модель может стать основой для раннего выявления рисков, прогнозирования динамики психологического состояния и поддержки специалистов при принятии профилактических решений с учетом специфики Вооруженных Сил Республики Казахстан.

Современный этап связан с развитием Explainable AI, Digital Phenotyping, мультимодальных моделей и концепции Human Performance. Вместе с тем существующие решения преимущественно основаны на данных США и стран НАТО, а отдельные проекты ориентированы главным образом на медицинские или психиатрические риски. Это ограничивает их прямую адаптацию к другим военным системам и недостаточно отражает задачи социально-психологической адаптации военнослужащих.

Проведенный анализ показал, что зарубежная военная психология перешла от периодической психодиагностики к предиктивной аналитике и интеллектуальным системам поддержки решений. Army STARRS сформировал научную основу такого перехода, а REACH VET продемонстрировал возможность практического применения прогнозных моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Topol E.J. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence // Nature Medicine –2019 – Vol. 25. – P. 44-56. –DOI: 10.1038/s41591-018-0300-7.
- 2 Rajpurkar P., Chen E., Banerjee O., Topol E. AI in Health and Medicine // Nature Medicine – 2022. – Vol. 28. – P. 31-38. –DOI: 10.1038/s41591-021-01614-0.
- 3 Rudin C. Stop Explaining Black Box Machine Learning Models for HighStakes Decisions // Nature Machine Intelligence. – 2019. – Vol. 1. – P. 206-215.
- 4 Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence Program // AI Magazine – 2019. –Vol. 40, No. 2. – P. 44-58.
- 5 Samek W., Wiegand T., Müller K.R. Explainable Artificial Intelligence // Proceedings of the IEEE – 2021. – Vol. 109, No. 3. – P. 247-278.
- 6 Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining – 2016. – P. 785-794. – DOI: 10.1145/2939672.2939785.
- 7 Ke G., Meng Q., Finley T. et al. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree // Advances in Neural Information Processing Systems – 2017. – Vol. 30, No. 2. – P. 44-58.
- 8 Defense Advanced Research Projects Agency. DARPA Strategic Plan 2023-2028. Arlington. – URL: <https://www.darpa.mil/about-us/strategic-plan> (дата обращения: 15.07.2026).
- 9 Defense Advanced Research Projects Agency. AI Next Campaign. Arlington, VA. – URL: <https://www.darpa.mil/work-with-us/ai-next-campaign> (дата обращения: 15.07.2026).
- 10 NATO Science and Technology Organization. Human Performance Research Strategy. – URL: <https://www.sto.nato.int> (дата обращения: 15.07.2026).
- 11 NATO Science and Technology Organization. Science & Technology Trends 2025-2045. – URL: <https://www.sto.nato.int> (дата обращения: 15.07.2026).
- 12 NATO Science and Technology Organization. Human Factors and Medicine Panel. Technical Report. Brussels. – URL: <https://www.sto.nato.int> (дата обращения: 15.07.2026).
- 13 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Human-AI Teaming: State-of-the-Art and Research Needs. Washington, DC: National Academies Press. – URL: <https://doi.org/10.17226/26355> (дата обращения: 13.07.2026).
- 14 Insel T.R. Digital Phenotyping: Technology for a New Science of Behavior // JAMA – 2017. – Vol. 318, No. 13. – P. 1215-1216.
- 15 Onnela J.P., Rauch S.L. Harnessing Smartphone-Based Digital Phenotyping // Neuropsychopharmacology –2016. – Vol. 41. – P.1691-1696.
- 16 Torous J., Kiang M.V., Lorme J., Onnela J.P. New Tools for New Research in Psychiatry: Digital Phenotyping // JMIR Mental Health – 2016. – Vol. 3, No. 2. – P.1-15.
- 17 Jacobson N.C., Weingarden H., Wilhelm S. Digital Biomarkers of Mood Disorders // Current Psychiatry Reports –2019. – Vol. 21, No. 3. – P.1-15.

18 Ursano R.J., Colpe L.J., Heeringa S.G. et al. The Army Study to Assess Risk and Resilience in Servicemembers (Army STARRS) // *Military Medicine* – 2014. – Vol. 179, No. 10. P. 1073-1082. –DOI: 10.7205/MILMED-D-13-00633.

19 Ursano R.J., Kessler R.C., Stein M.B. et al. Risk Factors, Methods and Design for the Army Study to Assess Risk and Resilience in Servicemembers (Army STARRS) // *International Journal of Methods in Psychiatric Research* – 2014. – Vol. 23, No. 2. – P.157-171. –DOI: 10.1002/mpr.1412.

20 Stein M.B., Ursano R.J., Campbell-Sills L. et al. Prognostic Indicators of Suicide Attempts in US Army Soldiers // *American Journal of Psychiatry* – 2017. – Vol. 174, No. 3. – P. 262-270. DOI: 10.1176/appi.ajp.2016.16010080.

21 Ursano R.J., Naifeh J.A., Kessler R.C. et al. Longitudinal Assessment in the Army STARRS Longitudinal Study (STARRS-LS) // *Military Medicine* – 2021. – Vol. 186, Suppl. 1. – P.26-34. DOI: 10.1093/milmed/usaa271.

22 McCarthy J.F., Bossarte R.M., Katz I.R. et al. Predictive Modeling and REACH VET: Implementation of Suicide Prevention in the U.S. Department of Veterans Affairs // *Psychiatric Services* – 2015. – Vol. 66, No.8. – P. 851-857. –DOI: 10.1176/appi.ps.201400482.

23 McCarthy J.F., Cooper S.A., Dent K.R. et al. Evaluation of the Recovery Engagement and Coordination for Health - Veterans Enhanced Treatment (REACH VET) Program // *JAMA Network Open* – 2021. – Vol. 4, No. 10. – DOI: 10.1001/jamanetworkopen.2021.30208.

24 U.S. Department of Veterans Affairs. REACH VET. – URL: <https://www.mentalhealth.va.gov/reachvet/> (дата обращения: 14.07.2026).

ОТ ОТДЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ К КОМПЛЕКСНОЙ БЕСПИЛОТНОЙ СИСТЕМЕ: РЕЗУЛЬТАТЫ СИСТЕМНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

магистр МВА, главный инструктор,
полковник запаса Семченко А.Г.
Авиационный учебный центр
АО «Казавиаспас»,
город Астана, Республика Казахстан
доктор философии PhD, полковник
Шандронов Д.Н.
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи,
г. Алматы, Республика Казахстан,
сеньор-лектор Кутпанова З.А.
Astana IT University,
менеджер по исследованиям
департамента проектов Рамазанов Н.К.
ТОО «WSE»,
город Астана, Республика Казахстан

Аннотация. В статье представлены результаты системного исследования, направленного на обоснование перехода от разработки отдельных технологий к формированию комплексной беспилотной авиационной системы. Рассмотрены взаимосвязанные компоненты такой системы: воздушная платформа, интеллектуальные алгоритмы автономного управления и компьютерного зрения, средства подготовки операторов, цифровая среда и испытательная инфраструктура. Проведенное исследование показало, что высокая степень готовности отдельных технических или программных решений сама по себе не обеспечивает готовность комплекса к практическому применению. Существенное значение имеют согласованность развития подсистем, учет ресурсных и эксплуатационных ограничений, подготовка человека, а также объективное подтверждение заявленного функционала. На примере разработки программного обеспечения автономного управления БПЛА рассмотрена многоэтапная процедура испытаний, включающая проверку реализованного функционала, выявление замечаний, доработку и повторное подтверждение результатов. Установлено, что формирование технологически готовой беспилотной системы требует совместного развития аппаратных, программных и человеко-машинных компонентов и их последовательной интеграции. Предложенный системный подход позволяет рассматривать технологическую готовность не как характеристику отдельных решений, а как результат их согласованного функционирования в составе единого комплекса.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, БПЛА, системный подход, искусственный интеллект, автономное управление, компьютерное зрение, подготовка операторов, испытания, технологическая готовность, интеграция подсистем.

Введение. Современное развитие беспилотных авиационных систем сопровождается усложнением как самих летательных аппаратов, так и всей совокупности обеспечивающих их применение технологий. Характеристики воздушной платформы, энергетической установки, бортовых вычислительных средств, навигации и связи все в большей степени связаны с возможностями программного обеспечения, алгоритмов автономного управления, компьютерного зрения, средств подготовки оператора и испытательной инфраструктуры. В этих условиях создание отдельных технически работоспособных компонентов еще не означает формирования готовой к практическому применению беспилотной системы.

На начальном этапе настоящего цикла исследований была сформулирована концепция инновационного комплексного продукта в дронной индустрии, предполагающая переход от разрозненного развития отдельных технологий и сервисов к их объединению в единую систему, включающую беспилотную платформу, интеллектуальные программные решения, средства подготовки и цифровую среду взаимодействия [1]. Именно эта постановка определила дальнейшую логику исследования: от определения требований к перспективному FPV-дрону – к разработке отдельных аппаратных и программных решений, их исследованию, испытаниям и последующей оценке готовности комплекса. Ранее выполненное обоснование тактико-технических требований позволило перейти от выбора доступных компонентов к формированию характеристик беспилотной системы исходя из ее назначения и условий предполагаемого применения [2]. Концепция комплексного продукта и ее связь с формированием экосистемы беспилотной авиации были сформулированы авторами как самостоятельное направление исследования.

Отдельные составляющие этого подхода получили развитие в последующих работах. Для системы подготовки операторов была предложена интегральная модель, учитывающая совместное влияние тренажерной подготовки, практических полетов и внешних условий [3]. Исследования движения БПЛА были продолжены в направлении оптимизации траекторий, включая применение сегментированного представления траектории и аналитических методов управления [4]. В области компьютерного зрения проведено экспериментальное сравнение алгоритмов обнаружения пожара и дыма по изображениям с беспилотных платформ; результаты показали, что выбор метода должен учитывать не только качество распознавания, но и требования к вычислительным ресурсам и возможности работы в реальном времени [5]. Международная публикация по компьютерному зрению содержит экспериментальное сравнение Faster R-CNN и YOLOv8n и показывает более устойчивое и вычислительно эффективное поведение облегченной модели при

сохранении преимуществ Faster R-CNN в чувствительности к отдельным объектам.

Развитие отдельных технологических направлений одновременно выявило более сложную проблему. Высокая степень готовности большинства компонентов не гарантирует готовности системы в целом, если отдельные критические подсистемы существенно отстают либо их совместное функционирование не подтверждено. В ранее опубликованном исследовании авторов было показано, что технологическая зрелость многокомпонентной беспилотной системы не должна сводиться к одному усредненному значению TRL: для инженерной оценки необходимо сохранять информацию о состоянии отдельных аппаратных, программных и алгоритмических подсистем и учитывать неоднородность их развития [6]. При этом оценка интеграционного состояния требует отдельного анализа зрелости интерфейсов, архитектурной связанности и функциональной критичности компонентов.

Параллельно исследование показало, что переход от научного результата к практически применимому продукту определяется не только технологическими характеристиками самой разработки. Существенное значение приобретают испытательная инфраструктура, последовательность подтверждения заявленных характеристик, взаимодействие научных и производственных организаций и возможность своевременной доработки решений по результатам испытаний. В работе, посвященной взаимодействию науки и оборонно-промышленного комплекса в дробной индустрии, комплексный продукт рассматривался как интеграционный механизм, объединяющий технологии, обучение, данные, испытания и взаимодействие участников разработки [7]. В качестве наиболее значимых условий перехода к практическому применению были выделены развитие испытательной инфраструктуры, пилотная эксплуатация, цифровое взаимодействие и согласование процессов научной разработки и промышленной реализации.

Таким образом, результаты отдельных этапов исследования позволили получить научные и практические результаты по конструкции беспилотных аппаратов, формированию требований, автономному управлению, компьютерному зрению, подготовке операторов и оценке технологической зрелости. Вместе с тем их сопоставление показало, что дальнейшее развитие комплексной беспилотной системы требует перехода от исследования отдельных компонентов к анализу условий их согласованного развития, объективного подтверждения и совместного функционирования.

Цель исследования – обобщение результатов трехлетнего цикла работ и обоснование системного подхода к переходу от отдельных технологических решений к комплексной беспилотной авиационной системе.

Основное внимание уделяется взаимосвязи аппаратной платформы, интеллектуальных алгоритмов, человеческого фактора, средств подготовки и испытательной инфраструктуры, а также последовательности перехода от заявленных характеристик к объективно подтвержденному результату.

Научная новизна работы состоит в развитии представления о технологической готовности комплексной беспилотной системы как о результате не только достигнутого уровня отдельных технологий, но и согласованности их развития, подтвержденности функциональных характеристик и способности взаимодействовать в составе единого комплекса. Практическая значимость такого подхода заключается в возможности использовать его при планировании дальнейшей разработки, определении приоритетов доработки подсистем, организации испытаний и подготовке перехода от экспериментальных решений к практически применимой беспилотной системе.

Материалы и методы исследования. Исследование выполнено в рамках трехлетнего цикла работ по созданию инновационного комплексного продукта в дробной индустрии с использованием технологий искусственного интеллекта. В качестве объекта исследования рассматривалась не отдельная конструкция беспилотного летательного аппарата или программный модуль, а совокупность взаимосвязанных аппаратных, программных и человек-машинных компонентов, обеспечивающих формирование и применение комплексной беспилотной авиационной системы.

Методологической основой исследования принят системный подход, при котором отдельные результаты разработки рассматривались с учетом их назначения, взаимосвязи с другими подсистемами, достигнутой степени готовности и возможности последующей интеграции. Такой подход развивает сформулированную ранее концепцию инновационного комплексного продукта, предусматривающую объединение технологических решений, средств подготовки, цифровой инфраструктуры и механизмов взаимодействия участников дробной индустрии [1].

Основная часть. Исследование проводилось последовательно по нескольким взаимосвязанным направлениям. На начальном этапе выполнялись анализ предметной области и формирование требований к перспективным беспилотным аппаратам. При этом исходной задачей являлось не определение перечня доступных комплектующих, а установление функциональных и технических характеристик системы исходя из ее назначения и предполагаемых условий применения. Результаты данного этапа были использованы при обосновании требований к разрабатываемым FPV-дронам [2].

Следующий этап включал разработку и исследование технических и программных решений. Для аппаратной части анализировались компоновочные решения, взаимосвязь массы, полезной нагрузки, энергетики и продолжительности полета. Для программной части исследовались алгоритмы автономного управления, планирования движения и компьютерного зрения. Отдельное направление составляли средства подготовки операторов и использование имитационной среды, позволяющей безопасно воспроизводить различные условия выполнения задач [3–5].

При исследовании интеллектуальных алгоритмов использовались вычислительные эксперименты и сравнительный анализ. Эффективность

методов оценивалась не изолированно, а применительно к конкретным условиям среды и вычислительным ограничениям. Такой подход позволил выявить, что преимущества отдельных алгоритмов изменяются при усложнении условий применения, а выбор решения должен учитывать не только формальный показатель качества, но и устойчивость, быстродействие и требования к вычислительным ресурсам.

Самостоятельным направлением стала оценка технологической готовности комплексной системы. В ранее выполненном исследовании было показано, что для многокомпонентной беспилотной системы недостаточно использовать единичную или усредненную характеристику зрелости. Необходимо учитывать состояние отдельных подсистем, различия между достигнутыми уровнями их готовности и особенности интеграционных связей [6]. При этом в настоящей работе данный результат используется не как самостоятельная математическая модель, а как методологическая основа для анализа перехода от отдельных разработок к комплексной системе.

Завершающая часть исследования была связана с экспериментальной проверкой программных решений. Испытания проводились поэтапно с использованием технической спецификации, программы и методики испытаний, экспертных матриц, испытательных сценариев и материалов объективного контроля. На ранних этапах проверялся функционал, фактически представленный разработчиком; выявленные неподтвержденные требования и замечания учитывались при последующей доработке. После внесения изменений выполнялась повторная и расширенная проверка. Такой порядок позволил перейти от формального наличия программного решения к документированному подтверждению его работоспособности в предусмотренном объеме. Первые испытания были ориентированы на проверку реализованных на тот момент компонентов и отдельных требований технической спецификации, а завершающий этап – на комплексную проверку доработанного программного обеспечения в полном функциональном цикле [12, 13].

В рамках проверочных мероприятий оценивались навигация, сбор и обработка данных, автономное управление, принятие решений, компьютерное зрение, планирование миссий, архитектура взаимодействия программных компонентов, фиксация событий и формирование итоговых результатов. Заключительный этап испытаний охватывал все восемь функциональных разделов экспертной матрицы и был направлен на подтверждение устранения замечаний, выявленных ранее [13].

На основе совокупности полученных результатов была выполнена системная интерпретация трехлетнего цикла исследований. При этом анализировалось не только достижение отдельных технических результатов, но и изменение первоначального представления о составе комплексного продукта, взаимосвязь между разработанными компонентами, роль испытаний и подготовки оператора, а также условия перехода от экспериментальных решений к практически применимой беспилотной системе.

Для целостного представления принятой методологии последовательность выполненных работ была сведена в единую схему системного исследования. Она отражает переход от анализа предметной области и формирования требований к разработке аппаратных и программных решений, моделированию, подготовке оператора, экспериментальной проверке, оценке технологической готовности и последующей интеграции полученных результатов в комплексную беспилотную систему. При этом указанные этапы не рассматривались изолированно: на протяжении всего цикла исследования сохранялась взаимосвязь четырех сквозных компонентов – аппаратной платформы, интеллектуальных алгоритмов, человека и системы подготовки, а также испытательной инфраструктуры. Общая логика исследования представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Логика системного исследования в рамках программы ИРН BR249015/0224

Представленная схема показывает, что переход к комплексной беспилотной системе осуществлялся не путем последовательного завершения независимых направлений, а через их взаимное уточнение. Результаты моделирования влияли на требования к программным и аппаратным компонентам, экспериментальная проверка выявляла необходимость доработки реализованного функционала, оценка технологической готовности позволяла определять проблемные участки дальнейшей интеграции, а вопросы подготовки оператора рассматривались во взаимосвязи с уровнем автономности и условиями применения системы.

Такой подход позволил рассматривать результаты трехлетнего исследования не как совокупность отдельных разработок, а как взаимосвязанные элементы единого процесса формирования комплексного продукта. Вместе с тем

для каждого направления использовался собственный набор методов исследования и форм подтверждения результатов. Их сопоставление представлено в таблице 1.

Как следует из таблицы 1, применяемые методы различались в зависимости от характера исследуемого компонента: от инженерного анализа и моделирования до вычислительного эксперимента и документированных испытаний программного обеспечения. При этом общим для всех направлений являлся принцип последовательного перехода от постановки требований к разработке, проверке и оценке полученного результата. Именно эта сквозная логика стала основой для последующего анализа результатов и определения условий перехода от отдельных технологий к комплексной беспилотной системе.

Таблица 1 – Основные направления и методы исследования

Направление исследования	Примененные методы	Основной результат
Формирование требований к БПЛА	анализ назначения, условий применения и функциональных ограничений	система требований к перспективному FPV-дрону
Аппаратная часть	инженерный анализ, проектирование, расчет взаимосвязанных параметров	конструктивные решения и обоснование взаимосвязи массы, энергетики и летных характеристик
Автономное управление	моделирование, вычислительный эксперимент, сравнительный анализ	установление зависимости эффективности алгоритмов от сложности среды
Компьютерное зрение	сравнительное экспериментальное исследование моделей	оценка соотношения качества распознавания и вычислительной эффективности
Подготовка оператора	моделирование процесса подготовки, анализ тренажерной и практической составляющих	обоснование роли симулятора как элемента системы подготовки
Технологическая зрелость	системный анализ состояния отдельных подсистем	обоснование необходимости учитывать неоднородность их готовности и интеграционные связи
Испытания программного обеспечения	ПМИ, экспертные матрицы, испытательные сценарии, объективный контроль, повторная проверка	документированное подтверждение функционала и устранения выявленных замечаний

Результаты исследования и их обсуждение. Формирование аппаратной основы комплексной системы. Первым результатом исследования стало уточнение самого объекта разработки. Проведенный на начальном этапе анализ показал, что проектирование перспективного FPV-дрона нецелесообразно сводить к подбору имеющихся на рынке компонентов. Такой подход позволяет сформировать работоспособный аппарат, однако не обеспечивает создания собственной технической концепции и затрудняет последующее согласование конструкции с требованиями к полезной нагрузке, энергетике, бортовым вычислениям и автономности.

Поэтому дальнейшая разработка была основана на предварительном формировании системы требований к перспективным FPV-дронам [2]. В качестве взаимосвязанных характеристик рассматривались назначение аппарата, максимальная взлетная масса, полезная нагрузка, продолжительность полета, требования к связи и навигации, вычислительным ресурсам и возможности последующего применения интеллектуальных алгоритмов.

Практическая реализация данного подхода привела к разработке нескольких оригинальных конструктивных решений. В частности, предложена конструкция дрона с функцией складывания и пилотирования, предусматривающая изменение конфигурации аппарата при транспортировке. Решение получило правовую охрану патентом Республики Казахстан на полезную модель № 10254 [9]. Другим результатом стала дисковидная компоновочная схема беспилотного аппарата, получившая правовую охрану патентом на изобретение № 38119 [10].

При этом наличие патента рассматривается в настоящем исследовании исключительно как подтверждение правовой охраны технического решения, но не как доказательство достижения заданных эксплуатационных характеристик. Последние требуют самостоятельного расчетного или экспериментального подтверждения.

Исследование конструктивных вариантов показало также, что параметры аппарата обладают выраженной взаимозависимостью. Увеличение емкости аккумуляторной батареи приводит к росту массы; увеличение массы требует изменения тяговооруженности; рост требуемой мощности, в свою очередь, изменяет требования к энергетической системе. Аналогичные взаимосвязи возникают при изменении полезной нагрузки, габаритов и требуемой продолжительности полета. Это позволило сделать вывод, что аппаратную платформу необходимо рассматривать не как набор последовательно выбираемых элементов, а как систему взаимосвязанных параметров, подлежащих совместному согласованию.

Именно на этом этапе первоначальная концепция комплексного продукта получила первое существенное уточнение: системность должна обеспечиваться уже на уровне самой воздушной платформы, до ее объединения с программными и интеллектуальными компонентами.

Интеллектуальные алгоритмы: зависимость результата от условий применения.

Следующее направление исследования было связано с применением искусственного интеллекта в задачах автономного управления и восприятия окружающей среды.

Вычислительный эксперимент по автономной навигации квадрокоптера среди препятствий был построен на сравнении алгоритмов Truncated Quantile Critics (TQC) и Soft Actor-Critic (SAC) при трех уровнях плотности препятствий [8].

В разреженной среде TQC обеспечил успешное достижение цели в 100 % случаев, а при средней плотности препятствий – в 99 %. Для SAC соответствующие значения составили 92 и 97 %. Однако при переходе к среде с

40 препятствиями результат изменился: SAC обеспечил 87 % успешных прохождений, тогда как TQC – 69 %. При этом статистически значимого превосходства одного из методов при принятом объеме выборки установлено не было.

Полученный результат имеет значение не столько как сравнение двух конкретных алгоритмов, сколько как подтверждение более общего положения. Первоначальное предположение о том, что более консервативная стратегия управления должна обеспечивать преимущество за счет более осторожного обхода препятствий, подтвердилось лишь частично.

При низкой и средней плотности среды такой подход действительно оказался эффективным, однако при значительном усложнении обстановки повышенная консервативность стала ограничивающим фактором. В исходной публикации отмечено также, что при высокой плотности препятствий значительная часть неудачных эпизодов TQC была связана не со столкновениями, а с превышением допустимого времени выполнения задачи.

Таким образом, эксперимент не подтвердил существование универсально лучшего алгоритма автономного управления. Напротив, он показал, что оценка эффективности должна учитывать структуру среды, плотность препятствий, требования к времени выполнения задачи и вычислительную стоимость метода.

Аналогичная закономерность проявилась при исследовании компьютерного зрения. В работе [5] сравнивались Faster R-CNN и облегченная модель YOLOv8n применительно к обнаружению пожара и дыма по изображениям с беспилотной платформы. Для YOLOv8n получено значение [mAP@0.5](#), равное 0,673; модель характеризовалась более стабильным и вычислительно эффективным распознаванием, тогда как Faster R-CNN демонстрировал более высокую чувствительность к отдельным небольшим объектам.

Сопоставление двух исследований позволяет сделать общий вывод: интеллектуальный алгоритм не должен оцениваться отдельно от условий его применения и ограничений всей системы.

Для бортового применения значение имеют не только показатели качества распознавания или успешности автономного движения, но и вычислительная нагрузка, быстродействие, устойчивость к усложнению среды и возможность реализации на доступной аппаратной платформе.

Полученные результаты двух направлений исследований позволяют сопоставить характер проявления ограничений интеллектуальных алгоритмов в различных задачах. Несмотря на различие исходных задач – автономная навигация и распознавание объектов – в обоих случаях эффективность конкретного метода определялась не только его собственной алгоритмической результативностью, но и условиями применения, сложностью окружающей среды и доступными вычислительными ресурсами.

Для систематизации полученных результатов и их дальнейшей инженерной интерпретации основные характеристики проведенных исследований сведены в таблицу 2.

Сопоставление результатов показывает, что применение технологий искусственного интеллекта в составе беспилотной авиационной системы не может основываться на выборе «лучшего» алгоритма по одному показателю. В зависимости от поставленной задачи критериями выбора могут становиться устойчивость к усложнению среды, быстродействие, вычислительная нагрузка, чувствительность распознавания или возможность работы в реальном времени. Следовательно, интеллектуальный алгоритм должен рассматриваться как один из элементов комплексной системы, параметры которого согласуются с возможностями аппаратной платформы и условиями предполагаемого применения.

Таблица 2 – Сопоставление результатов исследования интеллектуальных алгоритмов

Направление	Сравниваемые методы	Полученный результат	Системная интерпретация
Автономная навигация	TQC и SAC	преимущество изменяется в зависимости от плотности препятствий; статистически значимого универсального превосходства не установлено	выбор алгоритма зависит от структуры и сложности среды
Компьютерное зрение	Faster R-CNN и YOLOv8n	YOLOv8n обеспечивает более устойчивое и вычислительно эффективное распознавание; Faster R-CNN чувствительнее к отдельным малым объектам	выбор модели должен учитывать не только качество распознавания, но и ограничения бортовых вычислений

Представленные результаты существенно уточняют распространенную постановку задачи «применить искусственный интеллект на борту БПЛА». Более корректной становится постановка: определить, какой алгоритм, при каких ограничениях и в каких условиях обеспечивает требуемое поведение системы.

Человек и система подготовки.

Развитие автономности беспилотного аппарата первоначально может создавать впечатление постепенного снижения роли оператора. Проведенное исследование показало, что фактически происходит не устранение человека из контура применения, а изменение структуры его функций и необходимых компетенций.

В работе [3] была предложена модель подготовки операторов FPV-дронов, учитывающая вклад симуляционной подготовки, практических полетов и внешних факторов. Полученные результаты позволили обосновать использование симулятора как средства безопасного и экономически эффективного формирования значительной части навыков, при этом тренажерная подготовка не рассматривается как полная замена реальных полетов.

Данное направление получило и прикладное продолжение. Разработанное решение, объединяющее симулятор подготовки операторов беспилотных авиационных систем и обучающую on-line платформу, получило правовую охрану патентом Республики Казахстан на полезную модель № 11568 [11]. Библиографические сведения патента подтверждают его публикацию 19 декабря 2025 года.

Результат этого этапа исследования имеет более широкий смысл. Рост автономности аппарата требует от оператора меньше непосредственных ручных воздействий, однако повышает значение понимания логики автоматизированной системы, контроля ее состояния, правильной постановки задачи и оценки результатов ее выполнения.

Следовательно, в комплексной беспилотной системе человек остается самостоятельным компонентом, а его подготовка должна развиваться одновременно с изменением уровня автономности технических средств.

От готовности отдельных компонентов к готовности системы.

По мере накопления результатов возникла принципиально новая проблема. Наличие разработанной аппаратной платформы, алгоритмов автономного управления, средств компьютерного зрения, симулятора и цифровых решений еще не позволяло сделать вывод о готовности комплексной системы.

Ранее проведенное исследование технологической зрелости показало, что использование одного усредненного показателя способно скрывать существенные различия в состоянии отдельных подсистем [6]. Для инженерной интерпретации необходимо учитывать профиль зрелости аппаратных, программных и алгоритмических компонентов, а также состояние интеграционных интерфейсов и архитектурных связей.

Для настоящей работы существенно не само математическое описание данного подхода, а вытекающий из него практический вывод: высокая готовность большинства элементов не компенсирует отставание критически важного компонента и не подтверждает способность системы функционировать как единое целое.

Этот вывод получил практическое подтверждение при переходе от разработанных программных решений к их испытаниям.

Первый этап предварительных испытаний программного обеспечения системы автономного управления БПЛА был ориентирован на проверку именно того функционала, который фактически был представлен разработчиком на момент испытания. Цель заключалась в проверке работоспособности реализованных компонентов и подтверждении отдельных требований технической спецификации в доступном объеме [12].

По мере устранения выявленных замечаний объем проверки расширялся. На заключительном этапе проверялась уже доработанная версия программного обеспечения с учетом результатов предыдущих испытаний. Проверка охватывала полный функциональный цикл: формирование полетного задания, навигацию, сбор сенсорной информации, автономное управление, восприятие

окружающей обстановки, принятие решений, выполнение управляющих действий, фиксацию событий и документирование результатов [13].

Особенность данной процедуры состояла в том, что объектом оценки являлось не заявление разработчика о наличии функции, а наличие объективного подтверждения ее реализации. В результате сложилась последовательность: «заявлено - реализовано - проверено - выявлены замечания - доработано - повторно проверено – подтверждено» [12, 13].

Эта последовательность представляет собой один из наиболее существенных практических результатов исследования. Она позволяет разграничить три различных состояния разработки: предусмотрено требованиями, реализовано разработчиком и подтверждено испытаниями.

Обобщенная последовательность перехода от исходного требования к подтвержденному компоненту комплексной системы представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Переход от отдельного технологического решения к подтвержденному компоненту комплексной системы

Представленная схема отражает принципиальное различие между разработанным и подтвержденным технологическим решением. На каждом этапе оцениваются не только наличие заявленной функции, но и ее работоспособность, совместимость с другими компонентами, наличие объективных подтверждающих материалов и достигнутая степень технологической готовности. При этом выявление замечаний не рассматривается как отрицательный результат исследования, а является нормальной частью инженерного цикла, обеспечивающей уточнение и последовательное повышение готовности решения. Таким образом, интеграция

в комплексную беспилотную систему должна осуществляться не непосредственно после завершения разработки, а после прохождения компонентом последовательности «требование – реализация – проверка – доработка – повторное подтверждение». Это позволяет уменьшить разрыв между формально заявленными характеристиками и фактически подтвержденными возможностями системы. Системное обобщение результатов. Сопоставление результатов всех направлений показало, что первоначальная концепция комплексного продукта за время исследования существенно изменилась.

На раннем этапе комплексный продукт представлялся преимущественно как совокупность нескольких крупных составляющих: «беспилотный аппарат + искусственный интеллект + симулятор + цифровая платформа» [1].

По итогам выполненных исследований эта схема оказалась недостаточной. В окончательную структуру необходимо включать не только сами технологии, но также требования к ним, человека, систему подготовки, процедуры испытаний, оценку технологической готовности и механизмы интеграции.

Иными словами, комплексность определяется не количеством включенных в продукт компонентов, а характером связей между ними и подтвержденной возможностью совместного функционирования.

Данный вывод согласуется и с результатами исследования взаимодействия науки и промышленности [7], в котором в качестве условий перехода перспективной разработки к практическому применению были выделены испытательная инфраструктура, пилотная эксплуатация, технологическая зрелость и организационная интеграция участников.

В результате исходная модель: «дрон - искусственный интеллект - симулятор - цифровая платформа» трансформировалась в более полное системное представление: «техническая платформа - интеллектуальные алгоритмы - человек - подготовка - испытания - оценка технологической готовности - интеграция - практическое применение».

Именно эта трансформация является главным результатом системного анализа трехлетнего цикла исследований.

Заключение. Проведенное исследование позволило обобщить результаты трехлетнего цикла работ и уточнить условия перехода от отдельных технологических решений к комплексной беспилотной авиационной системе. Исходная модель, объединявшая беспилотную платформу, технологии искусственного интеллекта, симулятор подготовки операторов и цифровую среду [1], в ходе исследования была расширена за счет учета взаимосвязи технических, программных, человеко-машинных и испытательных компонентов.

Установлено, что требования к БПЛА должны формироваться до выбора конкретных технических решений, а конструкция, энергетика, полезная нагрузка и условия применения – рассматриваться совместно [2]. Исследования интеллектуальных алгоритмов показали отсутствие универсально лучшего решения: эффективность автономного управления и компьютерного зрения зависит от сложности среды, вычислительных ограничений и условий

применения [5, 8]. Повышение автономности при этом не исключает человека из системы, а изменяет требования к его подготовке и взаимодействию с автоматизированными средствами [3, 11].

Системное сопоставление результатов показало, что высокая готовность отдельных компонентов не обеспечивает готовности комплекса в целом. Необходимо учитывать состояние критических подсистем и их интеграционные связи [6]. Практическое подтверждение этого положения получено в ходе поэтапных испытаний программного обеспечения автономного управления, где последовательно реализовывалась логика: «требование - разработка - проверка - замечания - доработка - повторная проверка - подтверждение – интеграция».

Таким образом, готовность комплексной БАС определяется не количеством разработанных технологий, а согласованностью их развития, объективным подтверждением заявленного функционала и способностью совместно функционировать в составе единой системы.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на перенос интеллектуальных алгоритмов из имитационной среды на реальные бортовые вычислительные средства, проверку их работы в более сложных условиях, экспериментальную оценку интеграционных связей и комплексные испытания объединенных аппаратных и программных решений.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках научно-технической программы целевого финансирования на 2024-2026 годы ИРН BR249015/0224 «Создание инновационного комплексного продукта в дронной индустрии с использованием передовых технологий искусственного интеллекта», финансируемой Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Семченко А.Г., Шандронов Д.Н., Кутпанова З.А. Инновационный комплексный продукт в дронной индустрии – первые шаги к созданию экосистемы беспилотной авиации Казахстана // Сардар – 2025. – № 2(50). – С.173-182.

2 Шандронов Д.Н., Семченко А.Г., Кутпанова З.А. Обоснование тактико-технических требований к перспективным FPV дронам // Вестник Национального университета обороны Республики Казахстан – 2025. – № 3(106). – С. 182-188.

3 Semchenko A., Baiseitov G., Shandronov D., Kutpanova Z. Modeling the effectiveness of FPV drone operator training using simulators and online platforms // Scientific Journal of Astana IT University. – 2025. – Vol. 23. – P. 149-159. – DOI: 10.37943/23WKCN1585.

4 Kutpanova Z., Suleymenov K., Kozhakhmetova D., Kumar P., Baiseitov G., Shandronov D. Segmented UAV Trajectory Optimization via Fifth-Order Polynomial Approximation and Analytical Optimal Control // Engineering, Technology & Applied Science Research. – 2026. – Vol. 16, No. 1. – P. 32696-32703. – DOI: 10.48084/etasr.15905.

5 Kutpanova Z., Dossymbekov A., Khambarov A., Biloshchytska S. Intelligent UAV-Based Fire Detection Using Deep Learning: A Review and Experimental Evaluation // *Procedia Computer Science*. – 2026. – Vol. 290. – P. 184-191.

6 Семченко А. Г., Шандронов Д. Н., Кутпанова З. А. Модель оценки технологической зрелости комплексных беспилотных систем с учетом неоднородности уровней TRL // *Сардар* – 2026. – № 3(55). – С. 176-185.

7 Семченко А. Г., Рамазанов Н. К., Джусупбеков Т. Х. Инновационный комплексный продукт, как механизм интеграции науки и оборонно-промышленного комплекса в дроневой индустрии // *Вестник Национального университета обороны Республики Казахстан* – 2026. – № 3(110). – С. 266-273.

8 Kutpanova Z., Biloshchytska S., Khambarov A., Dossymbekov A. Truncated Quantile Critics for Obstacle-Dense Quadrotor Navigation: A Comparative Study with SAC // *2026 International Conference on Cybersecurity, Digital Forensics, and AI Applications (ICCSDFAI)*. – Istanbul, Türkiye, 25–27 June 2026. – P. 238-242. – DOI: 10.1109/ICCSDFAI70505.2026.11647864.

9 Дрон с функцией складывания и пилотирования: патент 10254 Республика Казахстан: МПК В64U 20/50 / Г.Н. Байсеитов, А.М. Калкабек, Д.Н. Шандронов [и др.]; заявитель ТОО «Research & Development центр «Казахстан инжиниринг». – № 2025/0023.2; заявл. 10.01.2025; опубл. 28.02.2025, Бюл. № 9. – 7 с.

10 Дисковидный дрон: патент 38119 Республика Казахстан / Г.Н. Байсеитов, А.М.Калкабек, А.С.Сейт [и др.]; патентообладатель ТОО «Research & Development центр «Казахстан инжиниринг». – № 2025/0110.1; заявл. 12.02.2025; опубл. 03.07.2026, Бюл. № 26.

11 Симулятор для подготовки операторов беспилотных авиационных систем и обучающей on-line платформы: патент 11568 Республика Казахстан: МПК В64U 20/00, G09B 9/02 / Г. Н. Байсеитов, А. Н. Тулембаев, Д. Н. Шандронов [и др.]; заявитель ТОО «Research & Development центр «Казахстан инжиниринг». – № 2025/1459.2; заявл. 29.09.2025; опубл. 19.12.2025, Бюл. № 51. – 6 с.

12 Акт № 1 предварительных испытаний (инициированных ТОО «Pure Tech») программного обеспечения системы автономного управления БПЛА с использованием технологий искусственного интеллекта от 03.07.2026 / ТОО «R&D центр «Казахстан инжиниринг». – Астана, 2026. – 12 с. – Внутренний документ программы ИРН BR249015/0224.

13 Акт № 3 проверочных испытаний (по результатам устранения замечаний предыдущих этапов) программного обеспечения системы автономного управления БПЛА с использованием технологий искусственного интеллекта от 27–28.09.2026/ ТОО «R&D центр «Казахстан инжиниринг». – Астана, 2026. – Внутренний документ программы ИРН BR249015/0224.

КОНЦЕПЦИЯ БЕСПИЛОТНОГО НАДВОДНОГО КОМПЛЕКСА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА И ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ

профессор, полковник Умбетов Р.Ж.
Академия Комитета национальной
безопасности Республики Казахстан
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Предложен беспилотный надводный комплекс интеллектуального мониторинга прибрежной акватории казахстанского сектора Каспийского моря. На основе гидрометеорологических наблюдений и анализа инфраструктурных проектов обоснована потребность в оперативной гидрографической информации. Разработаны функциональная архитектура и компоновка катамаранной платформы, объединяющей батиметрическую съёмку, профилирование течений и пространственно-временной анализ данных. Предложена методика выявления аномалий и коррекции гидродинамического прогноза средствами машинного обучения. Определены критерии экспериментальной верификации и направления практического применения комплекса.

Ключевые слова: Каспийское море, беспилотный катер, мониторинг, батиметрия, течения, искусственный интеллект.

Введение. Актуальность и постановка задачи. Навигационно-гидрографическое обеспечение казахстанского сектора Каспия осуществляется на основе наблюдений Казгидромета и исследований Службы гидрографического обеспечения ВМС. В состав опубликованной технической базы последней входят оснащённые эхолотами суда «Жайык», «Табиғат» и катер БЛ-680. Перспективным направлением развития этой инфраструктуры является внедрение мобильных средств локального мониторинга с интегрированной обработкой разнородных данных. Цель работы - разработка концепции беспилотного комплекса, обеспечивающего совместный анализ рельефа дна, течений и гидрометеорологических условий для поддержки решений при выполнении прибрежных работ.

Исходную количественную базу исследования составляют результаты наблюдений Казгидромета за 2024 год.

Основная часть. Размах региональных значений уровня, рассчитанный как разность годовых экстремумов, составляет 2,51 м для северо-восточной мелководной части и 1,43 м для глубоководной казахстанской части Каспия (рисунок 1). Выраженная пространственно-временная изменчивость уровня определяет необходимость регулярной актуализации гидрографической

информации и учёта состояния водной поверхности при интерпретации промерных данных.

Характеристики уровня режима Каспийского моря в 2024 году: а - региональные минимумы, средние значения и максимумы; б - число сгонно-нагонных явлений у казахстанского побережья Северного Каспия (рисунок 1). Построено по данным [1, с. 29–30].

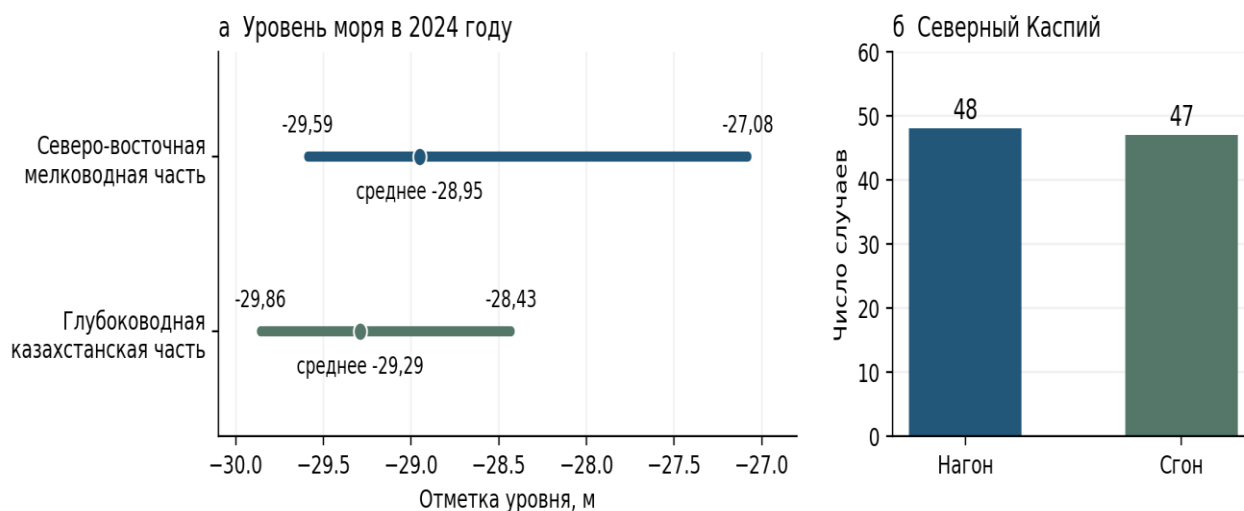


Рисунок 1 – Характеристики уровня режима Каспийского моря в 2024 году

В рассматриваемом периоде зарегистрированы 48 случаев нагона и 47 случаев сгона. Повторяемость указанных явлений обосновывает развитие оперативного мониторинга прибрежной зоны. Совместная регистрация уровня, профилей скорости течения и метеорологических параметров формирует информационную основу для оценки локальных условий и своевременного выявления их изменений. Прикладные предпосылки создания комплекса [2-4].

Развитие морской инфраструктуры Казахстана формирует устойчивую потребность в гидрографическом сопровождении. Проект дноуглубления порта Актау предусматривает достижение проходной осадки 6–7 м с планируемым завершением работ до конца 2026 года. Дополнительным направлением применения является обследование водозаборных каналов, включая канал МАЭК, на котором выполнялись дноуглубительные работы. Начало деятельности Казахского НИИ Каспийского моря в сентябре 2025 года и развитие комплексного мониторинга расширяют исследовательскую базу. Указанные направления определяют области внедрения предлагаемого продукта (таблица 1).

Функциональная архитектура комплекса

Аппаратная часть включает катамаранную платформу, навигационный модуль, эхолот, акустический доплеровский профилограф течений ADCP, видеокамеры и бортовой вычислитель.

Таблица 1 – Прикладные задачи и функциональные возможности предлагаемого комплекса

Область применения	Факторы потребности	Функции комплекса
ВМС и гидрография	Съёмка и корректура карт; действующие эхолотные носители	Повторные обследования выбранных прибрежных участков
Порт Актау	Проект дноуглубления и увеличения проходной осадки	Контроль глубин до и после работ, поиск изменений
Водозабор МАЭК	Договор и работы на водозаборном канале	Контроль заносимости и доступных глубин
НИИ Каспийского моря	Развитие исследований и комплексного мониторинга	Сбор сопоставимых рядов течений и параметров среды

Профилирование скорости течения по глубине выполняется с компенсацией движения носителя. Наземная станция обеспечивает объединение бортовых измерений с данными стационарных постов и гидрометеорологическими прогнозами. Архитектура предусматривает отдельные циклы обновления батиметрической модели и оперативных параметров среды (рисунок 2).

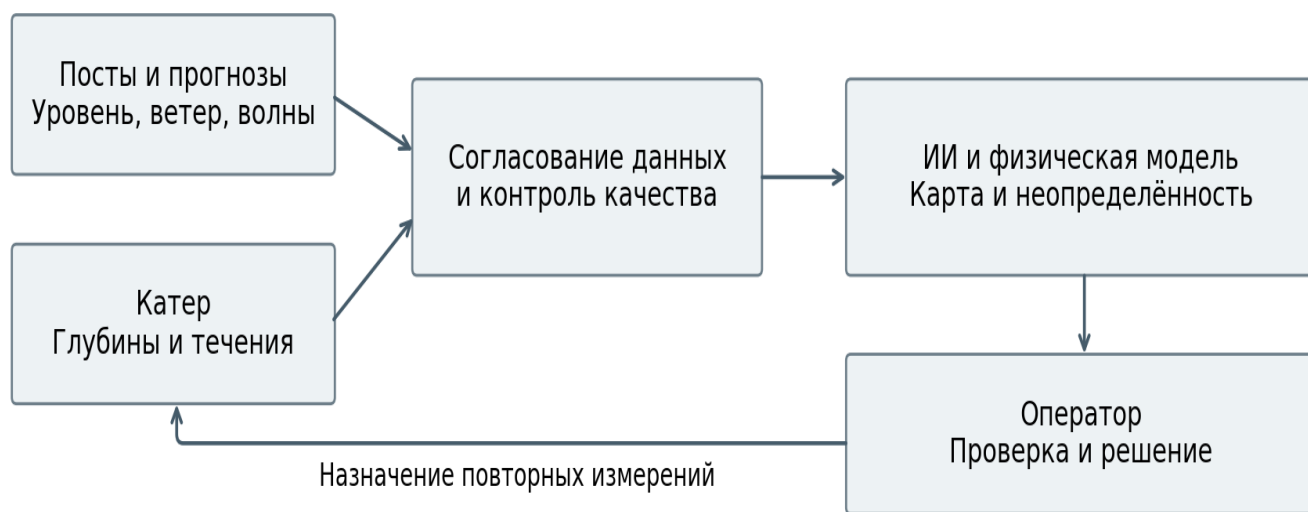


Рисунок 2 – Функциональная схема интеграции измерений, интеллектуального анализа и операторского управления

Комплекс ориентирован на интеграцию с действующей инфраструктурой наблюдений. Пространственное покрытие и периодичность измерений задаются программой обследования с учётом автономности платформы, гидрометеорологических условий и требований к актуальности данных.

Конструктивное решение надводной платформы

В основу конструкции положена двухкорпусная схема с поперечными силовыми связями и отдельными электрическими двигателями, обеспечивающими дифференциальное управление. Для базового варианта

приняты проектные габариты $2,4 \times 1,4$ м (рисунок 3). Аккумуляторные отсеки размещаются в нижней части корпусов, вычислительный модуль и аппаратура связи - в центральном герметичном блоке. Предусмотрены контроль поступления воды, аварийное отключение и дистанционное управление. Конструктивная проработка включает расчёты водоизмещения, осадки, устойчивости и энергетического баланса.

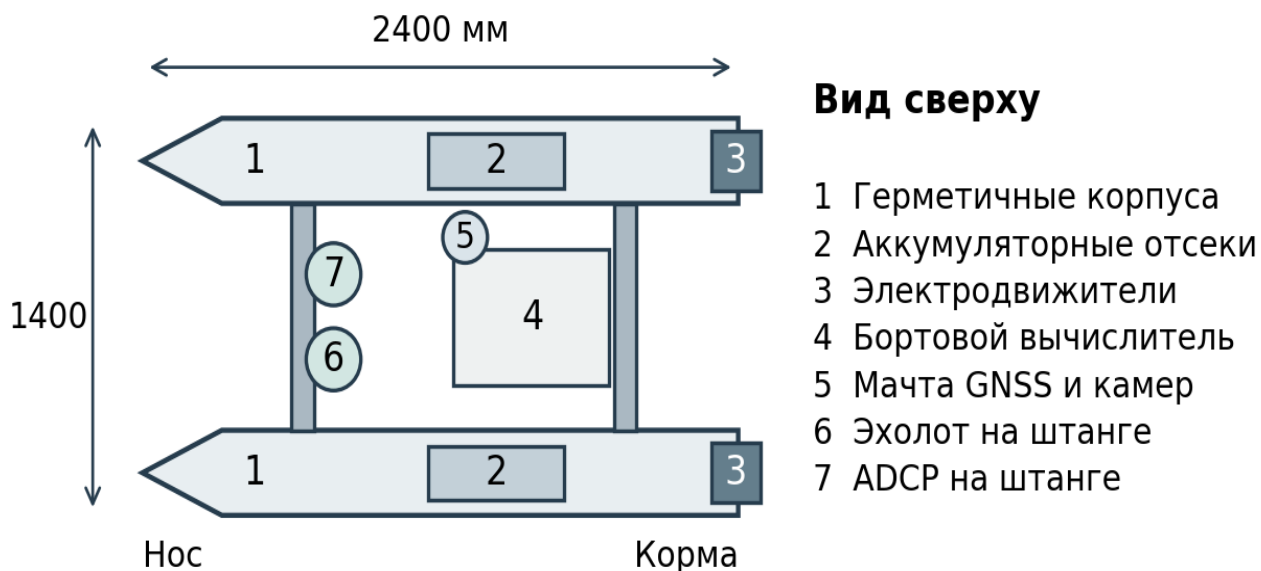


Рисунок 3 – Компоновочная схема базового варианта беспилотной катамаранной платформы

Эхолот и ADCP размещаются на съёмном измерительном узле в межкорпусном пространстве вне зоны воздействия двигателей. Конфигурация крепления выбирается по условиям свободного распространения акустических лучей. Для подавления взаимных помех предусматривается согласование циклов зондирования.

Спутниковая навигационная система GNSS и инерциальный модуль обеспечивают координатную привязку и определение параметров движения носителя. Проектная визуализация платформы представлена на рисунке 4.

Методика интеллектуальной обработки данных.

Предварительная обработка реализуется на языке Python и включает временную синхронизацию, координатную привязку, контроль полноты измерений и компенсацию движения платформы. Вектор признаков формируется из компонент скорости течения u и v по глубинам, их временных приращений, уровня воды, ветра, крена и показателей качества сигнала. Сопоставление батиметрических моделей выполняется в единой высотной системе с учётом неопределённости съёмки.

Для выявления аномалий предлагается алгоритм Isolation Forest библиотеки scikit-learn, обучаемый на верифицированных наблюдениях штатных режимов. Алгоритм присваивает временным окнам оценку аномальности по

многомерному пространству признаков. Последующая классификация событий основывается на совместном анализе этой оценки, качества измерений, пространственно-временной согласованности и эксплуатационных порогов. Первичные данные сохраняются для экспертной интерпретации.



Рисунок 4 – Проектная визуализация беспилотного катамарана в прибрежной акватории

Коррекция прогноза течений выполняется двумя регрессорами XGBoost для компонент u и v . Входные признаки включают предшествующие измерения, ветер, глубину и прогноз физической модели; целевые переменные представляют остаточные ошибки прогноза на заданном горизонте. Оценённые поправки суммируются с результатами физической модели. Обучение и валидация выполняются на наземной станции; бортовой вычислитель реализует применение верифицированной модели к поступающим данным [5-8].

Заключение. Верификация предусматривает разделение обучающих и контрольных выборок по времени и участкам. Критерии качества включают ошибку прогноза, полноту выявления событий и частоту ложных уведомлений; базовые модели сравнения – физический прогноз и сохранение последнего наблюдения. Предлагаемый комплекс интегрирует измерительную платформу, аналитическое обеспечение и операторский интерфейс в единый продукт. Его практическая значимость заключается в информационном обеспечении гидрографических, инфраструктурных и ведомственных работ. Экспериментальная программа направлена на оценку точности, надёжности и удельной стоимости обследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Казгидромет. Обзор об особенностях климата на территории Казахстана за 2024 год. – URL:<https://kazhydromet.kz/ru/post/2987> (дата обращения 28.09.2026)
- 2 Служба гидрографического обеспечения ВМС РК. Военный гидрограф рассказал об исследовательской работе в Каспийском море. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/sgo/press/news/details/819810> (дата обращения 27.09.2026)
- 3 Министерство транспорта РК. Казахстан наращивает потенциал порта Актау. Сообщение о проекте 2026 года. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/transport/press/news/details/1246493?lang=ru> (дата обращения 28.09.2026)
- 4 Акимат Актау. Дноуглубительные работы водозаборного канала ТОО «МАЭК». – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/akimat-goroda-aktau/press/news/details/893013?lang=ru> (дата обращения 28.09.2026)
- 5 Министерство экологии и природных ресурсов РК. О создании Казахского НИИ Каспийского моря. – URL: <https://www.gov.kz/memleket/entities/ecogeo/press/news/details/1180439?lang=ru> (дата обращения 28.09.2026)
- 6 NOAA Ocean Exploration. Acoustic Doppler Current Profiler. – URL: <https://oceanexplorer.noaa.gov/technology/doppler/> (дата обращения 28.09.2026)
- 7 Scikit-learn. IsolationForest. Документация. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.IsolationForest.html> (дата обращения 28.09.2026)
- 8 XGBoost. Python API Reference. XGBRegressor. – URL: https://xgboost.readthedocs.io/en/stable/python/python_api.html (дата обращения 28.09.2026)

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНО-БИОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «СОБАКА-ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ» ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛЫХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

магистр педагогики, старший
преподаватель Хитматов А.М.
Пограничная академия Комитета
национальной безопасности
Республики Казахстан,
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. Статья подготовлена в рамках научно-исследовательской проблемы «Научное обоснование концептуальных основ развития служебной кинологии и конного дела» и является результатом цикла опубликованных докладов научно-практических конференций по интеграции применения служебных собак в комплексе с искусственным интеллектом. Исследование направлено на решение критической проблемы современных кинологических расчетов – временной задержки принятия решения, обусловленной «человеческим фактором». Предложена концептуальная модель, в которой служебная собака выступает в роли мобильного биосенсора, а искусственный интеллект обеспечивает автоматическую верификацию угрозы на основе анализа психофизиологических маркеров животного.

Ключевые слова: искусственный интеллект, служебные собаки, малые беспилотные летательные аппараты, противовоздушная оборона, кинология, биосенсор, концептуальная модель, человеческий фактор.

Введение. Масштабная интеграция беспилотных авиационных систем в контур боевого управления привела к качественной трансформации парадигмы современных вооруженных конфликтов. Опыт боевых действий, в частности на восточноевропейском театре, наглядно демонстрирует эволюцию тактической ниши малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и FPV-платформ: из категории вспомогательного разведывательного инструмента они перешли в разряд основного средства огневого поражения [1].

Еще на стратегических учениях «Батыл тойтарыс – 2023» Президент Республики Казахстан Касым-Жомарт Токаев заявил о необходимой готовности казахстанской армии к «гибридным видам войн» и «любым вызовам».

Сегодня функционал данных систем не ограничивается корректировкой артиллерийского огня; они массово применяются в качестве барражирующих боеприпасов («камикадзе») для селективного уничтожения живой силы и бронетехники, а также для нанесения ударов по объектам критической инфраструктуры. Проблема усугубляется фактором асимметрии: низкая

технологическая себестоимость и доступность аппаратов позволяют противнику обеспечивать высокую плотность атак, тогда как экономический и стратегический ущерб – как подтверждают инциденты на объектах нефтегазового и энергетического секторов – оказывается несопоставимо высоким [2].

Эта новая реальность выявила серьезную уязвимость существующих систем противовоздушной обороны (ПВО). Традиционные радиолокационные средства (РЛС) оказались недостаточно эффективны для борьбы с малоразмерными низколетящими целями. Это обусловлено их конструктивными особенностями: БПЛА обладают малой эффективной площадью рассеяния (ЭПР), часто сопоставимой с ЭПР птицы (менее 0,01 м²), и используют тактику полета на сверхмалых высотах с огибанием рельефа местности [3]. В результате стандартные РЛС либо не фиксируют угрозу, либо теряют ее на фоне земной поверхности, что не позволяет обеспечить гарантированное своевременное обнаружение.

В условиях, когда технические сенсоры демонстрируют ограничения, возникает необходимость в поиске нетрадиционных, в том числе асимметричных методов противодействия. Одним из таких направлений остается использование потенциала биологических сенсоров. Служебные собаки на протяжении десятилетий остаются незаменимым компонентом в системах безопасности, в частности, для обнаружения взрывчатых веществ, скрытого оружия и в поисково-спасательных операциях [4]. Уникальные сенсорные возможности животного, прежде всего острый слух и обоняние, значительно превосходят чувствительность большинства существующих технических аналогов, что теоретически позволяет им фиксировать акустические и, возможно, химические сигнатуры БПЛА на дистанциях, недоступных аппаратуре [5].

Однако при попытке интеграции служебной собаки в контур ПВО возникает фундаментальное операционное противоречие. Высокая скорость обнаружения угрозы биосенсором (собакой) нивелируется низкой скоростью обработки этого сигнала человеком. Эффективность кинологического расчета полностью зависит от «человеческого фактора» – способности оператора своевременно заметить, корректно интерпретировать поведенческие сигналы животного (изменение позы, вокализацию) и принять решение. В условиях скоротечного боя или диверсионной атаки эта задержка становится критической [6].

Актуальность данной статьи определяется необходимостью устранить этот разрыв между мгновенным биологическим обнаружением и медленной человеческой реакцией. Перспективным решением представляется создание интеллектуально-биологического комплекса, в котором искусственный интеллект (ИИ) используется для автоматического анализа психофизиологических показателей собаки и мгновенной передачи сигнала тревоги непосредственно на исполнительные устройства – автоматизированные огневые или радиоэлектронные комплексы подавления.

Научная проблема. Эффективное противодействие малым БПЛА требует решения двух фундаментальных задач: обнаружения и нейтрализации. При этом

скорость обнаружения является определяющим фактором. Как показало время, существующие подходы имеют критические ограничения.

1) Технические средства (РЛС, акустические и оптические системы) испытывают трудности. Акустические датчики, несмотря на их пассивный характер, сильно зависят от фонового шума, ветра и расстояния до цели, что снижает их надежность [7]. Оптические системы уязвимы в сложных метеоусловиях, а РЛС-комплексы, настроенные на фильтрацию малоскоростных объектов (птиц), часто игнорируют и малые БПЛА, обладающие схожей сигнатурой [7].

2) Биологические сенсоры (служебные собаки), обладая феноменальной слуховой и обонятельной чувствительностью, способны выделить аномальный сигнал (жужжание БПЛА) из общего шума. Однако их применение ограничено «человеческим фактором». Скорость реакции всего кинологического расчета равна скорости самого медленного его элемента – кинолога, который должен распознать сигнал собаки, верифицировать его и передать команду [7]. Для угрозы, движущейся со скоростью 30-50 м/с, эта задержка в несколько секунд является фатальной.

Таким образом, научная проблема заключается в разрешении противоречия между высокой сенсорной чувствительностью биологического детектора (собаки) и низкой скоростью интерпретации его сигналов человеком-оператором. К примеру, исходя из опыта дрессировки собак, даже опытный дрессировщик не всегда успевает дать своевременную обратную связь действиям служебной собаки. Возникает необходимость в разработке такой системы, которая исключает «медленное» человеческое звено из первичного контура обнаружения. Требуется создать высокоскоростной «интерфейс» прямого сопряжения, способный формализовать психофизиологическую реакцию животного на угрозу в машиночитаемую команду для автоматизированных систем противодействия.

Цель статьи – разработать и теоретически обосновать концептуальную модель интеллектуально-биологического комплекса «Собака-ИИ», предназначенного для автоматизированного обнаружения низколетящих малых БПЛА и способного устранить задержку, связанную с «человеческим фактором» в контуре принятия решения.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1) определить наиболее информативные психофизиологические и поведенческие маркеры служебной собаки, которые могут быть использованы ИИ для верификации сигнала об обнаружении угрозы;

2) предложить архитектуру интегрированной системы, включающую подсистему сбора биометрических данных (носимые датчики), подсистему анализа (ИИ-классификатор) и подсистему сопряжения с исполнительными устройствами;

3) разработать концептуальный алгоритм функционирования комплекса «Собака-ИИ», описывающий логику обработки сигнала от момента фиксации угрозы биосенсором до передачи команды на нейтрализацию.

Методы исследования. В качестве методологической основы исследования использовался комплекс общенаучных методов. На этапе постановки проблемы применялся аналитический обзор и сравнительный анализ для изучения научной литературы, выявления преимуществ и недостатков существующих технических средств ПВО (РЛС, акустических, оптических) и кинологических расчетов.

При разработке концептуальной модели использовался системный подход, позволивший рассмотреть интеллектуально-биологический комплекс как единую систему, состоящую из трех взаимосвязанных компонентов: сенсорного (собака), аналитического (ИИ) и исполнительного (вооружение). Метод моделирования применялся для описания алгоритмов функционирования предлагаемой системы и логики взаимодействия ее элементов.

Изложение основного материала (результаты/обсуждение). Предлагаемая в данной статье концептуальная модель интеллектуально-биологического комплекса «Собака-ИИ» основана на фундаментальном принципе устранения наиболее медленного и уязвимого элемента из контура принятия решения - «человеческого фактора». Модель представляет собой интегрированную систему, состоящую из трех последовательно функционирующих подсистем: биосенсорной, аналитической и исполнительной.

Основная часть. Изучение научной литературы выявило существенный пробел в подходах к защите границы. Если вопросы тактики применения БПЛА изучены достаточно глубоко, то методы противодействия им с использованием биологических систем остаются на периферии научного внимания. В науке стоит отметить труды отечественного исследователя Н.Ф.Чистякова, который рассматривал аспекты подготовки собак для визуального и слухового поиска дронов. Однако вопрос автоматизации этого процесса через интеграцию с искусственным интеллектом в Казахстане ранее комплексно не прорабатывался.

Существующий мировой опыт в этой сфере четко фрагментирован тремя независимыми направлениями.

Первое направление - техническое обнаружение БПЛА. Это наиболее развитая область. Множество исследований посвящено созданию акустических систем на основе сверхточных нейронных сетей, которые обучаются на спектрограммах (визуальных «отпечатках звука») для идентификации шума винтов БПЛА [7]. Несмотря на достигаемую в лабораторных условиях высокую точность, ключевой нерешенной проблемой остается отделение сигнала от фоновых шума в реальной обстановке [6].

Второе направление – мониторинг состояния служебных животных. В этой области активно разрабатываются носимые биометрические системы (шлеи и ошейники), оснащенные акселерометрами, гироскопами и датчиками сердечного ритма [3]. Однако текущий фокус этих исследований направлен на мониторинг здоровья, уровня стресса, усталости животного или для анализа эффективности тренировок [5]. При этом уже существуют исследования, подтверждающие прямую корреляцию между физиологическими показателями (например, резким изменением сердечного ритма) и моментом успешного обнаружения цели собакой при поисковой работе [6].

Третье направление – прямое взаимодействие «животное-компьютер». Эти исследования находятся на ранней стадии и в основном сфокусированы либо на использовании инвазивных нейроинтерфейсов (вживление в мозговую ткань для «чтения мыслей» животного), что неприемлемо в массовой практике, либо на разработке интерфейсов для коммуникации служебных собак с ограниченными возможностями (например, нажатие собакой-помощником тревожной кнопки на сенсорном экране) [7].

Вывод по анализу: ни одно из этих направлений по отдельности не решает задачу мгновенного реагирования. Наша цель – объединить биометрию и алгоритмы ИИ в единый контур управления огнем.

Биосенсорная подсистема: Сбор мультимодальных данных. Первичным элементом комплекса выступает служебная собака, которая используется в качестве высокочувствительного мобильного биосенсора, способного к пассивному обнаружению угроз в радиусе 360 градусов. Для автоматической фиксации ее реакции предлагается использовать носимый тактический комплекс (НТК), интегрированный в эргономичную и не стесняющую движений шлею.

Задача НТК – в реальном времени объективно и синхронно регистрировать не только явные поведенческие, но и непроизвольные психофизиологические маркеры обнаружения. Сбор данных должен быть мультимодальным, то есть поступать сразу из нескольких источников, что является ключом к последующей точной верификации.

Регистрация поведенческих маркеров осуществляется двумя типами датчиков. Во-первых, это инерциальный измерительный блок (IMU), включающий акселерометр и гироскоп. В отличие от видеокамеры, IMU-блок требует минимальной вычислительной мощности и не зависит от условий освещенности. Он непрерывно отслеживает положение тела собаки в пространстве. Алгоритм должен быть обучен мгновенно распознавать специфический кинематический паттерн «сигнальной позы» - резкую остановку после движения, напряжение корпуса и характерную ориентацию головы в направлении источника звука (вверх, в сторону БПЛА). Во-вторых, это направленный микрофон с системой шумоподавления (для фильтрации ветра), который фиксирует вокализацию. Его задача - отделить «сигнальный лай», имеющий специфические акустические характеристики (частоту, ритм, резкость), от бытового или игрового лая.

Регистрация психофизиологических маркеров является ключевым элементом, так как эти маркеры являются непроизвольными (инстинктивными) и часто предшествуют осознанной поведенческой реакции, что дает критический выигрыш во времени. В ремни шлеи, прилегающие к грудной клетке, интегрируются сухие контактные кардио-датчики (по типу ЭКГ). Они непрерывно снимают два жизненно важных показателя: частоту сердечных сокращений (ЧСС) и вариабельность сердечного ритма (ВСР). ВСР, в частности, является точным индикатором состояния вегетативной нервной системы. При обнаружении внезапной, неопознанной угрозы (резкий звук БПЛА) у собаки происходит мгновенная активация симпатической нервной системы. Это

выражается в резком, скачкообразном повышении ЧСС и одновременном снижении ВСР (индикатор стресса и мобилизации).

Весь собранный многомерный поток данных (данные IMU, аудио, ЧСС, ВСР) в реальном времени по защищенному и помехоустойчивому радиоканалу передается в аналитический компонент системы.

Аналитическая подсистема: Верификация угрозы с помощью ИИ. Полученный из биосенсорной подсистемы «сырой» и зашумленный поток данных поступает в аналитическое ядро комплекса - ИИ-классификатор. На этом этапе решается самая сложная задача: верификация сигнала. Необходимо с высочайшей точностью отличить истинную реакцию на БПЛА от множества ложных срабатываний. Отдельно взятый сигнал не является надежным: скачок ЧСС может быть вызван посторонним резким звуком, а сигнальная поза — реакцией на птицу.

Ценность искусственного интеллекта заключается в его способности к комплексному анализу данных (multi-modal data fusion). Он оценивает не отдельные показатели, а их совокупный, синергетический паттерн во времени. Для этой задачи наиболее релевантными являются архитектуры рекуррентных нейронных сетей (RNN), в частности LSTM (Long Short-Term Memory), так как они специализируются на анализе временных последовательностей, каким и является поток биометрических данных.

Эффективность ИИ напрямую зависит от качества его обучения. Перед развертыванием система должна пройти калибровку на обширном эталонном наборе данных. Этот набор должен содержать тысячи часов записей, включающих как «боевые» срабатывания (реакции разных собак на разные типы БПЛА в разной акустической среде), так и «ложные» (реакции на птиц, гражданский транспорт, громкие звуки, другие нерелевантные раздражители).

В процессе обучения ИИ «научается» выделять уникальную многомерную сигнатуру, или «цифровой отпечаток» реальной угрозы. Например, он может установить, что паттерн «БПЛА» – это одновременное возникновение специфической вокализации, скачка ЧСС, падения ВСР и фиксации IMU в «верхней» позе, длящееся более 1,5 секунд. В боевом режиме ИИ непрерывно сопоставляет входящие данные с этими эталонными паттернами и вычисляет вероятность угрозы. Только при превышении заданного порогового значения (например, 95% уверенности) система признает угрозу верифицированной и мгновенно переходит к исполнительной фазе.

Исполнительная подсистема: Автоматизированное реагирование. После того как ИИ-классификатор верифицировал угрозу, он генерирует машиночитаемый сигнал тревоги. Этот сигнал является «спусковым крючком» для исполнительной подсистемы и служит командой для сопряженных средств противодействия. На этом этапе возможно два принципиальных сценария применения комплекса, различающихся степенью вовлеченности человека.

В автоматизированном режиме (human-on-the-loop), который является наиболее предпочтительным с точки зрения безопасности и минимизации

ошибок, сигнал от ИИ не инициирует немедленное поражение. Вместо этого он выполняет задачи когнитивной разгрузки оператора:

1) Мгновенно приводит в готовность и наводит средства поражения (например, турель с автоматической пушкой или систему РЭБ) в сектор, указываемый ориентацией собаки (по данным IMU).

2) Подает сигнал тревоги человеку-оператору, выводя на его пульт уже верифицированную угрозу с азимутом. Таким образом, с оператора снимается самая сложная и медленная задача - первичное обнаружение и распознавание. Ему остается лишь визуально подтвердить цель и нажать кнопку для подтверждения нейтрализации, что сокращает общее время реакции до долей секунды.

В автономном режиме (human-out-of-the-loop), применимом для защиты особо важных стационарных объектов в условиях отсутствия персонала, сигнал ИИ может служить прямой командой на немедленное применение средств поражения. Из этических соображений и во избежание фатальных ошибок, в первую очередь рассматриваются нелетальные системы. Например, комплекс может автоматически активировать направленную систему радиоэлектронного подавления (РЭБ), которая разрывает канал управления БПЛА, или инициировать запуск дрона-перехватчика с сетью. Этот режим полностью исключает человека из контура принятия решения, достигая минимально возможного времени реакции на угрозу.

Проведенное исследование и разработка концептуальной модели позволяют сделать ряд ключевых выводов.

Во-первых, существующая и нарастающая угроза применения малых БПЛА в современных конфликтах требует поиска асимметричных и технологически продвинутых методов противодействия. Было установлено, что традиционные кинологические расчеты, несмотря на уникальные сенсорные возможности служебных собак, демонстрируют критическую уязвимость — низкую скорость реакции, обусловленную «человеческим фактором» при интерпретации сигналов животного.

Во-вторых, в статье предложена и теоретически обоснована концептуальная модель интеллектуально-биологического комплекса «Собака-ИИ», способная решить эту проблему. Модель основана на трехкомпонентной архитектуре (биосенсорной, аналитической, исполнительной). Ее принципиальное отличие заключается в использовании мультимодального подхода к сбору данных. Вместо того чтобы полагаться на один сигнал, система агрегирует явные поведенческие маркеры (поза, вокализация) с произвольными психофизиологическими показателями (частота сердечных сокращений и вариабельность сердечного ритма).

В-третьих, ключевым элементом модели является аналитическая подсистема на базе ИИ. Именно способность нейронной сети к комплексному анализу (data fusion) и распознаванию сложных, синергетических паттернов в реальном времени позволяет верифицировать угрозу с высокой степенью

достоверности, отсекая ложные срабатывания, которые неизбежны при мониторинге только одного показателя [7].

Заключение. Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что нарастающая угроза применения малых БПЛА в современных конфликтах требует поиска асимметричных и технологически продвинутых методов противодействия. Традиционные кинологические расчеты, несмотря на уникальные сенсорные возможности служебных собак, демонстрируют критическую уязвимость – низкую скорость реакции, обусловленную «человеческим фактором» при интерпретации сигналов животного.

В статье разработана и теоретически обоснована концептуальная модель интеллектуально-биологического комплекса «Собака-ИИ», устраняющая этот недостаток. Предложенная модель основана на автоматическом сборе многомерных данных (поведенческих и психофизиологических) с животного и их комплексном анализе с помощью нейросетевого классификатора.

Ключевой результат работы заключается в том, что использование ИИ для верификации паттернов реакции собаки (синтез данных ЧСС, ВСР, вокализации и положения тела) позволяет формализовать сигнал обнаружения и перевести его в машиночитаемую команду. Это дает возможность напрямую сопрягать биосенсор с исполнительными системами (РЭБ или огневого поражения), исключая «медленное» человеческое звено из первичного контура обнаружения. Таким образом, время реакции всего комплекса сокращается с нескольких секунд, необходимых кинологу, до миллисекунд, требуемых ИИ для классификации сигнала. Практическая значимость модели заключается в создании высокоомобильного и высокоскоростного эшелона ПВО малого радиуса действия, способного эффективно работать в сложных условиях, где технические средства ограничены.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Kunertova D. The war in Ukraine shows the game-changing effect of drones depends on the game // Bulletin of the Atomic Scientists. Issue 2: Special issue: “What to do about Taiwan?” – 2023. – Vol. 79, №2. P. 72-77. – URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00963402.2023.2178180#abstract> (дата обращения: 01.11.2025).

2 Seidaliyeva U., Ilipbayeva L., Taissariyeva K., Smailov N., Matson E.T. Advances and challenges in drone detection and classification techniques: A state-of-the-art review // Sensors – 2024. – №1. – P. 125. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/1/125> (дата обращения: 01.11.2025).

3 Shuaijia Shao, Weigang Zhu, Yonggang Li. Radar Detection of Low-Slow-Small UAVs in Complex Environments // 2022 2nd International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE). – 2022. – P. 1386-1391. – DOI:10.1109/ITAIC54216.2022.9836542.

4 Cobb M. The Remarkable Acoustic Abilities of Dogs // Petland Overland Park. – 2024. – URL: <https://www.petlandkansascity.com/2024/03/22/the-remarkable-acoustic-abilities-of-dogs/> (дата обращения: 31.10.2025).

5 Human Factors in Technologically Advanced Warfare // Life of Soldiers – 2025. – 10 March. – URL: <https://www.lifeofsoldiers.com/2025/03/10/human-factors-in-technologically-advanced-warfare/> (дата обращения: 31.10.2025).

6 Paszkowski W., Gola A., Świć A. Acoustic-Based Drone Detection Using Neural Networks – A Comprehensive Analysis // Advances in Science and Technology Research Journal – 2024. – Vol. 18, №1. – P.36-47. – URL: <https://www.ustrj.com/Acoustic-Based-Drone-Detection-Using-Neural-Networks-A-Comprehensive-Analysis,175863,0,2.html>

7 Целицкий С. Применение беспилотных летательных аппаратов в вооруженных конфликтах в Сирии и Нагорном Карабахе // Пути к миру и безопасности. – 2021. – № 1. – С. 38–51.

ОБ ИТОГАХ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННОГО КОМПЛЕКСНОГО ПРОДУКТА В ДРОНОВОЙ ИНДУСТРИИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

PhD, полковник Шандронов Д.Н.
Военно-инженерный институт
радиоэлектроники и связи
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассматриваются результаты выполнения научно-исследовательской работы программно-целевого финансирования на 2024-2026 г. ИРН BR 249015/0224 «Создание инновационного комплексного продукта в дронной индустрии с использованием передовых технологий искусственного интеллекта» (исследование финансируется Комитетом науки Министерства высшего образования и науки Республики Казахстан).

Детально описываются оригинальные патентоспособные отечественные разработки: складывающийся FPV-дрон и ветроустойчивый дисковидный дрон, симулятор «FPV-Flight» и веб-платформа «FPV community». Для созданных FPV-дронов представлено программное обеспечение искусственного интеллекта для автономной навигации без использования GPS и принятия стратегических решений на базе алгоритмов глубокого обучения.

Представленные решения направлены на достижение технологического суверенитета Казахстана (уровень B-TRL-6), импортозамещение в сфере программного обеспечения и укрепление обороноспособности страны в условиях новой технологической реальности.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, FPV-дрон, искусственный интеллект, симулятор полета, онлайн-платформа, онлайн-обучение, автономная навигация, рой дронов.

Индустрия беспилотных авиационных систем (БАС) является одним из наиболее динамично прогрессирующих направлений современной науки и техники. Развитие наукоемких технологий, существенное удешевление их себестоимости позволили снизить затраты на производство беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что повлияло на рост рынка предложений и спроса в данном сегменте, на популярность их использования как в гражданской, так и военной сфере. Наибольшей популярностью пользуются FPV-дроны (First Person View – от англ. – вид от первого лица), что обусловлено сочетанием высокой точности управления, низкой себестоимости, экстремальной маневренности и высокой ремонтопригодности.

Широкое применение БАС сталкивается с рядом системных проблем. Одной из ключевых проблем, является сложность управления FPV-дронами в

реальном времени, особенно в условиях городской застройки и пересеченной местности. Решение данной проблемы видится в автоматизации управления, ключевым фактором которого является интеграция передовых технологий искусственного интеллекта (ИИ) в систему навигации и управления. Данное решение значительно расширяет функциональные возможности аппаратов.

Современные военные конфликты и динамика развития гражданского сектора (мониторинг инфраструктуры, логистика, сельское хозяйство) демонстрируют, что доминирующее положение занимают не просто дистанционно управляемые аппараты, а интеллектуальные системы, способные функционировать в условиях неопределенности и активного противодействия. Поэтому интеграция передовых технологий ИИ в архитектуру FPV-платформ становится одним из ключевых направлений современного развития беспилотных систем [1].

Не менее актуальной проблемой является подготовка операторов дронов. Рост парка БПЛА и массовость их применения диктует необходимость перехода от индивидуальной подготовки к масштабному обучению квалифицированных кадров. Следовательно, требуется разработка единых государственных стандартов, методологий и обучающих программ, охватывающих как базовое пилотирование, так и программирование дронов. Кроме того, для обеспечения технологического суверенитета актуальной необходимостью является создание отечественных обучающих симуляторов и тренажеров, что также позволит адаптировать программы подготовки под специфические национальные требования и значительно снизить стоимость обучения.

Растущий интерес к БПЛА в Республике Казахстан обнажает еще одну системную проблему – отсутствие централизованной цифровой среды для всех участников рынка. Единая платформа должна стать инструментом интеграции сообщества, где будут осуществляться сертификация, обучение и информационная поддержка, взаимодействия между профессионалами, разработчиками и государственными ведомствами. Наличие такой платформы позволит выработать эффективные стратегии масштабирования продуктов, ускорить их внедрение на внутренних и внешних рынках, что, в свою очередь, будет способствовать росту общего объема рынка БПЛА, появлению новых рабочих мест и повышению научно-технического потенциала Казахстана.

Решение указанных проблем требует комплексного подхода, основанного на интеграции технологий ИИ, интеллектуальных систем управления, имитационного моделирования и цифровых платформ взаимодействия.

Таким образом, реализация комплексного подхода, сочетающего разработку дронов с ИИ, внедрение отечественных симуляционных систем обучения, создание единой цифровой платформы, позволит Республике Казахстан не только закрыть текущие потребности в сфере беспилотной авиации, но и выйти по собственным разработкам на уровень технологической готовности B-TRL -6, согласно Методики определения уровней готовности технологий и технологической готовности организаций, утвержденной приказом Министра науки и высшего образования РК от 10 января 2025 года №8 [2]. Это

соответствует стратегическим задачам по укреплению обороноспособности и раскрытию промышленного потенциала страны в условиях новой технологической реальности.

В условиях глобальной конкуренции актуальность решения вышеназванных проблем обусловлена необходимостью перехода от импорта готовых решений к созданию собственных аппаратно-программных комплексов с уровнем локализации более 40% в Республике Казахстан, что является стратегическим императивом для отечественного оборонно-промышленного комплекса и гражданской индустрии.

Объектом исследования явился инновационный комплексный продукт в составе высокотехнологичных FPV дронов, высокоэффективного симулятора полетов дронов и обучающей онлайн-платформы для взаимодействия участников дроновой индустрии.

Предметом исследования стали инновации в технологиях и научно-технических решениях создания FPV дронов, симуляторов, обучающих программ пилотирования, проведения соревнований и взаимодействия участников дроновой индустрии.

Цель проекта заключалась в формировании научно-технических основ и практическая реализация инновационного комплексного продукта, объединяющего интеллектуальный FPV-дрон, обучающий симулятор и единую цифровую платформу отраслевого и образовательного взаимодействия.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

1. Проведение глубокого анализа условий и факторов развития мировых трендов в дроновой индустрии и определены перспективные ниши для отечественных разработок.

2. Разработка конструктивно-технологического облика и анализ математической модели силовой установки FPV-дрона, а также проектирование архитектуры бортового ИИ-модуля для автономной навигации и распознавания объектов.

3. Проектирование и тестирование комплексного программного продукта – симулятора пилотирования FPV-дронов для подготовки специалистов.

4. Разработка и внедрение цифровой платформы взаимодействия участников отрасли беспилотных авиационных систем.

5. Подготовка операторов FPV-дронов.

6. Формирование стратегии масштабирования комплексного продукта и построена Дорожная карта развития отрасли до 2035 года.

Необходимо отметить, что на момент начала работ по проекту в отечественной науке и практике отсутствовали разработки FPV-дрона с использованием технологий ИИ, симулятора для обучения операторов дронов, единой онлайн-платформы для образовательного и научно-технического взаимодействия пользователей. Впервые была сформулирована и научно обоснована концепция триединого инновационного продукта, объединяющего технические, образовательные и цифровые решения которые включают высокотехнологичную аппаратно-программную платформу БПЛА, алгоритмы

бортового искусственного интеллекта и цифровую экосистему подготовки кадров.

Исследование базировалось на системном подходе к проектированию сложных технических систем. В процессе исследования использовались методы математического моделирования, теории управления, алгоритмы машинного обучения, а также полевые испытания опытных образцов.

Материалами исследования послужили научно-технические нормативные и научно-популярные источники, публикуемые на открытых интернет-ресурсах и в периодической печати, научно-исследовательские и конструкторские работы по данной тематике.

В результате проведенного исследования получены следующие результаты.

Первое. Запатентованы две конструкции дронов:

складывающийся FPV-дрон, обеспечивающий 3-кратное снижение габаритного объема при транспортировке без потери пространственной жесткости рамы. Он предназначен для выполнения различных задач, в том числе – для разведки, уничтожения целей и доставки грузов. На данную полезную модель получен патент «Дрон с функцией складывания и пилотирования», выданный Национальным институтом интеллектуальной собственности № 10254 от 28.02.2025 г. [3].

дисковидный дрон, обладающий повышенной ветроустойчивостью и маневренностью в закрытых пространствах. Он оснащен двумя соосными встречно-вращающимися кольцеобразными роторами и внешним защитным корпусом с управляемыми створками. Защищенные лопасти обеспечивают высокую ветроустойчивость, безаварийную маневренность в замкнутых пространствах и городских условиях. Перенаправление воздушного потока через створки юбки позволяет совершать динамичные маневры в горизонтальной плоскости при сниженном лобовом сопротивлении. На данное изобретение получен патент «Дисковидный дрон», выданный Национальным институтом интеллектуальной собственности № 38119 от 12.02.2025 г. [4].

В FPV-дрон интегрирован модуль ИИ, оснащенный системой распознавания образов, которая позволяет дрону самостоятельно определять объекты и оценивать ситуацию в окружающем пространстве, осуществлять навигацию без использования навигационных спутниковых систем в условиях низкой видимости, отсутствия связи и сложной наземной обстановки и планировать маршрут. Такой подход делает дрон эффективным в абсолютно незнакомых или динамически меняющихся пространствах (завалы, леса, городская застройка), так как системе не требуется предварительная загрузка карт местности.

При планировании маршрута алгоритм одновременно учитывает остаточный заряд батареи, динамические препятствия (например, другие БПЛА или птицы), безопасную дистанцию до других аппаратов и ограничения по времени. Система способна мгновенно пересчитывать маршрут при изменении условий внешней среды. Таким образом, ИИ управляет не только движением, но и стратегическим поведением дрона.

Для работы алгоритмов встроенного модуля с ИИ разработано программное обеспечение для управления FPV-дроном (БПЛА) с использованием технологий искусственного интеллекта, которое осуществляет автономную навигацию, моделирование элементов окружающей среды, интеллектуальное планирование маршрута. На данное программное обеспечение получено свидетельство об авторском праве № 62317 от 22.09.2025 г. [5]

Высокотехнологичные системы поддерживают координацию нескольких дронов. Для одновременного управления несколькими дронами («роя дронов»), в рамках исследования, разработано программное обеспечение для группового взаимодействия «Модель программного обеспечения с искусственным интеллектом для предотвращения столкновений при ройном управлении до 10 дронов», на которое получено свидетельство об авторском праве № 62305 от 22.09.2025 г. [6].

Второе. Создан отечественный реалистичный FPV-симулятор «FPV-Flight» с интеллектуальной системой анализа действий пилота и возможностью его размещения на обучающей on-line платформе. Разработанный симулятор позволяет создавать реалистичную визуализацию, физику полета и сценарные задания, что минимизирует «разрыв» между виртуальной тренировкой и реальным полетом.

На полезную модель симулятора для подготовки операторов беспилотных авиационных систем получен патент, выданный Национальным институтом интеллектуальной собственности № 11568 от 19.12.2025 г. [7].

Программное обеспечение симулятора разработано на игровом графическом движке Unreal Engine, которое моделирует виртуальную среду для имитации полета FPV-дрона. На программное обеспечение получено свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом № 62645 от 03.10.2025 г. [8].

Симулятор обеспечивает подготовку операторов в различных условиях, включая ограниченную видимость, помехи связи и нестабильную навигацию.

Научной новизной разработанного симулятора является адаптивная система оценки навыков пилота с помощью ИИ-модуля, который не только фиксирует ошибки, но и вырабатывает рекомендации.

В отличие от зарубежных аналогов («DCL» [9], «Liftoff» [10], «Velocidrone» [11], «AirSim» [12], «Gazebo» [13], «RealFlight» [14], «Zephyr» [15] и др.), разработка включает модули имитации помех связи, специфических метеоусловий и, что критически важно, характеристик отечественных БПЛА. Переход от простой визуализации к глубокой аналитике действий пилота с помощью ИИ делает этот продукт важным элементом цифровой экосистемы дронной индустрии Казахстана.

Использование заявленного решения позволяет:

- повысить реалистичность тренировки и ускорить процесс адаптации новичков;
- имитировать полет как наиболее известных в мире, так и отечественных FPV-дронов;

- моделировать различные погодные, аварийные и экстремальные сценарии с различными типами рельефа местности и инфраструктуры;
- создавать различные тренировочные задания, например, облет препятствий, доставка груза, поиск объекта;
- объективно оценить уровень подготовки операторов за счет использования режима инструктора, где можно удаленно настраивать условия и контролировать ошибки управления в реальном времени;
- интегрировать симулятор с облачными on-line платформами, системой рейтинга пилотов.

Таким образом, разработанный отечественный симулятор полета FPV-дрона для подготовки операторов БАС является современным и конкурентоспособным решением. Разработка имеет как техническое, так и программное отличие от иностранных аналогов. Полученные охранные документы подтверждают его новизну, правовую защищенность и техническую реализацию.

Третье. Реализована отечественная цифровая онлайн-платформа «FPV-community» [16] для участников дроновой индустрии, обеспечивающая образовательные сервисы, обмен знаниями, реализацию и приобретение услуг и товаров и организацию соревнований.

Единая платформа взаимодействия участников дроновой индустрии (ЕПВУ ДИ) – это интегрированная защищенная масштабируемая информационная система, объединяющая отечественных и зарубежных специалистов, производителей и операторов беспилотных авиационных систем, образовательные и научные организации, регулирующие органы, коммерческие компании, инвесторов и конечных пользователей, предназначенная для упрощения коммуникации, обмена знаниями и опытом, организации образовательных и рыночных сервисов, формирования деловых связей и содействия институционализации, инновационному развитию и международной интеграции дроновой индустрии [17].

Техническая реализация онлайн-платформы представляет собой аппаратно-программный комплекс распределенной обработки данных. Основным отличием от других популярных специализированных онлайн-платформ для взаимодействия участников дроновой индустрии и подготовки операторов («Drone.kz» [18] (ПК), «Bas.cifrium.ru» [19], «Dronschoo1.ru» [20], «Drone-operator.ru» [21] (РФ) и «Droneverse.io» [22]) является децентрализованная архитектура сервера приложения, разделенного на специализированные аппаратно-вычислительные блоки:

- блок графического кодирования функционирует параллельно основным процессам, обеспечивая автономное преобразование видеопотоков симулятора без задействования вычислительных циклов центрального процессора. Это снижает количество переключений контекста и высвобождает такты микропроцессора для обработки логики управления;

– аппаратно-выделенный кластер памяти сервера базы данных обеспечивает сегментацию адресного пространства, исключая фрагментацию памяти при одновременной работе множества сессий;

– блок маршрутизации внешних потоков реализует прямую трансляцию транзакционных запросов во внешний (банковский) контур без сохранения и обработки платежных массивов во внутренней шине данных сервера базы данных, что повышает физическую защищенность данных.

Таким образом, отечественная платформа отличается от известных решений архитектурой аппаратно-программного комплекса обработки данных, что обеспечивает повышенную отказоустойчивость системы, пониженные вычислительные нагрузки на серверные узлы и надежную защищенность обработки данных пользователей.

Стоит заметить, что представленный аппаратно-программный комплекс реализован на базе существующих серверных мощностей и стандартных протоколов связи, но обеспечивает устойчивую работу при пиковой нагрузке (более 1000 пользователей одновременно), в отличие от других существующих платформ.

Для функционирования онлайн-платформы разработано программное обеспечение онлайн-сервисов для единой платформы в области дронной индустрии, на которое получено свидетельство об авторском праве №62225 от 17.09.2025 г. [23], включающее различные сервисы взаимодействия: образовательные, коммуникационные, поисковые, информационные, новостные и др.

В образовательные сервисы онлайн-платформы интегрирован FPV-симулятор «FPV-Flight» для дистанционного обучения и совершенствования навыков операторов, где реализованы сценарии различной сложности, адаптивная оценка навыков, а также система сертификации операторов. На данной платформе подготовлено более 100 пилотов.

Созданная онлайн-платформа для дистанционной подготовки операторов БПЛА позволяет в несколько раз увеличить охват одновременно обучаемых операторов. Совмещение онлайн-теории и симуляционного практикума формирует комплексное обучение, где операторы не только знают, но и эффективно применяют полученные знания на практике.

Четвертое. Дорожная карта, построенная на базе модели S-кривой Фостера и SWOT/PESTLE-анализа, обеспечивает научно обоснованный переход от импорта готовых решений к формированию полноценного высокотехнологичного кластера беспилотных авиационных систем в Казахстане.

Стратегия определяет поэтапную локализацию производства FPV-дронов свыше 40%, внедрение отечественного бортового искусственного интеллекта и эффективное кооперационное взаимодействие между вузами, предприятиями ОПК и бизнесом.

Развитие единой цифровой экосистемы, симулятора «FPV-Flight» и онлайн-платформы «FPV community» позволит систематизировать подготовку кадров и увеличить число участников отрасли до 10 тысяч пользователей к 2035 году.

В конечном итоге реализация Дорожной карты выступает гарантией достижения технологического суверенитета Республики Казахстан, снижения рисков внешней зависимости и успешной интеграции БПЛА в экономическую и оборонную сферы страны.

Заключение. В ходе выполнения научной программы поставленные задачи решены, цель достигнута.

Ключевыми итогами работы являются:

1) разработаны и обоснованы оригинальные патентоспособные конструкции БПЛА:

- складывающийся FPV-дрон;
- дисковидный дрон;

2) разработан аппарат с интегрированным модулем искусственного интеллекта, способного к автономной навигации без использования GPS;

3) создан отечественный интеллектуальный тренажер-симулятор «FPV-Flight» с высокой степенью реалистичности, включающий модули физической имитации помех РЭБ, погодных факторов и автоматизированного анализа ошибок и выдачи рекомендаций пилотам;

4) создана и внедрена веб-платформа «FPV community», обеспечивающая информационное и образовательное взаимодействие участников отрасли, а также централизованную подготовку операторов БПЛА в масштабах страны;

5) разработана 11-модульная программа подготовки и трехуровневая система сертификации кадров (Базовый, Профессиональный, Инструктор/Эксперт), обеспечивающая непрерывное повышение квалификации специалистов;

6) разработана научно обоснованная методология формирования инновационной экосистемы БАС в Республике Казахстан и построена Дорожная карта масштабирования отрасли до 2035 года.

Разработанный комплексный продукт позволяет:

- существенно повысить эффективность выполнения задач за счет снижения нагрузки на оператора (автономность).
- сократить время и затраты на подготовку квалифицированных кадров благодаря использованию высокореалистичных симуляторов.
- обеспечить технологическую независимость страны в критически важной сфере беспилотных технологий.

Полученные результаты имеют прямое прикладное значение для предприятий ОПК, силовых структур и гражданских ведомств Республики Казахстан и формируют основу для дальнейшей коммерциализации и внедрения в национальную систему подготовки операторов и развития дронной индустрии Республики Казахстан.

Проект позволяет выйти на уровень технологической готовности B-TRL-6, устранив зависимость от иностранных научно-технических и образовательных ресурсов и обеспечив безопасность данных при массовом обучении.

Результаты исследования вносят прямой практический вклад в реализацию ключевых государственных инициатив Республики Казахстан – Указа Президента РК об объявлении 2026 года Годом цифровизации и ИИ, Концепции развития искусственного интеллекта на 2024-2029 годы, Концепции развития гражданской беспилотной авиации до 2031 года и Национального плана развития РК до 2029 года.

Таким образом, проведенное исследование заложило прочный научно-технический задел для создания отечественных БАС, объединяющих технологии дронной индустрии, симуляционного моделирования и искусственного интеллекта. Разработанный комплексный продукт обладает высокой адаптивностью, масштабируемостью и коммерческим потенциалом, обеспечивая развитие системы подготовки операторов и практическое применение ИИ-технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Отчет о рынке беспилотных летательных аппаратов FPV: тенденции, прогноз и конкурентный анализ до 2030 года. – Текст: электронный // Lucintel. – 2024. – URL: <https://www.lucintel.com/fpv-drone-market.aspx> (дата обращения: 21.09.2024).

2 Об утверждении Методики определения уровней готовности технологий и технологической готовности организаций: приказ Министра науки и высшего образования РК от 10 января 2025 года № 8. [Электронный ресурс]. – 2025 – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2500035634> (дата обращения: 14.04.2026).

3 Байсеитов Г.Н., Қалкабек А.М., Шандронов Д.Н., Семченко А.Г., Несипова С.С. Дрон с функцией складывания и пилотирования. Патент на полезную модель №10254 от 28.02.2025 г.

4 Байсеитов Г.Н., Қалкабек А.М., Сейт А.А., Айгазин Д.А., Косанов А.Д. Дисконидный дрон. Патент на изобретение 38119 от 03.07.2026 г.

5 Кажыбаев К.С., Байсеитов Г.Н., Тулембаев А.Н., Кутпанова З.А., Шандронов Д.Н. Программное обеспечение для управления FPV дроном (БПЛА) с использованием технологий искусственного интеллекта. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским № 62317 от 22.09.2025 года.

6 Кажыбаев К.С., Байсеитов Г.Н., Тулембаев А.Н., Қалкабек А.М., Рамазанов Н.К. Модель программного обеспечения с искусственным интеллектом для предотвращения столкновений при ройном управлении до 10 дронов. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом № 62305 от 22.09.2025.

7 Байсеитов Г.Н., Тулембаев А.Н., Шандронов Д.Н., Қалкабек А.М., Рамазанов Н.К., Кутпанова З.А., Байсеитов М.Н. Симулятор для подготовки

операторов беспилотных авиационных систем и обучающей on-line платформы. Патент на полезную модель № 11568 от 19.12.2025 г.

8 Кажибаяев К.С., Тулембаяев А.Н., Шандронов Д.Н., Рамазанов Н.К. Кутпанова З.А. Программное обеспечение симулятора для подготовки операторов FPV-дронов и обучающей on-line платформы. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №62645 от 03.10.2025.

9 DCL – TheGame [Электронный ресурс] URL: <https://dronechampionsleague.com/game/> (дата обращения 20.03.2026).

10 Liftoff [Электронный ресурс] URL: <https://www.liftoff-game.com/> (дата обращения 20.03.2026).

11 VelociDrone [Электронный ресурс] URL: <https://www.velocidrone.com/> (дата обращения 24.03.2026).

12 Официальный сайт Microsoft [Электронный ресурс] URL: <https://microsoft.github.io/AirSim/> (дата обращения 24.03.2026).

13 Gazebo [Электронный ресурс] URL: <https://gazebo.org/> (дата обращения 23.03.2026).

14 RealFlight [Электронный ресурс] URL: <https://www.realflight.com/> (дата обращения 23.03.2026).

15 Zephyr (LittleArmsStudios) [Электронный ресурс] URL: <https://zephyr-sim.com/> (дата обращения 24.03.2026).

16 FPV communitе [Электронный ресурс] URL: <https://fpv-rdke.online/> (дата обращения 10.04.2026).

17 Единая платформа взаимодействия участников дроновой индустрии (ЕПВУ ДИ): свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом № 62882 / Кажибаяев К.С., Кутпанова З.А., Тулембаяев А.Н., Шандронов Д.Н., Семченко А.Г., Қалкабек А.М. – 10.10.2025.

18 Drone.kz [Электронный ресурс] URL: <https://drone.kz/?ysclid=mnxd5nqhk1605866180> (дата обращения 11.04.2026).

19 Bas.cifrium.ru [Электронный ресурс] URL: <https://bas.cifrium.ru/> (дата обращения 11.04.2026).

20 Dronschoo1 [Электронный ресурс] URL: <https://dronschoo1.ru/?ysclid=mnxd9sddj5409912455> (дата обращения 11.04.2026).

21 Drone-operator.ru [Электронный ресурс] URL: <https://drone-operator.ru/> (дата обращения 11.04.2026).

22 Droneverse.io [Электронный ресурс] URL: <https://droneverse.io/?ysclid=mnxdduwge5158428197> (дата обращения 11.04.2026).

23 Кажибаяев К.С., Тулембаяев А.Н., Кутпанова З.А., Семченко А.Г., Рамазанов Н.К. Программное обеспечение on-line сервисов для единой платформы в области дроновой индустрии. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом №62225 от 17.09.2025.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ БЕСПИЛОТНЫЕ АВИАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ОХРАНЕ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГРАНИЦЫ: НАПРАВЛЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ И ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ

магистр технических наук, капитан Якуба Н.С.
Пограничная академия Комитета национальной безопасности Республики Казахстан,
город Алматы, Республика Казахстан

Аннотация. В статье систематизированы направления применения технологий искусственного интеллекта в беспилотных авиационных системах при охране Государственной границы, рассмотрены их ограничения, предложена модель, связывающая показатели качества обнаружения с нагрузкой на оператора. Обоснованы требования к интеллектуальным беспилотным системам и группы компетенций специалистов, предложены меры по совершенствованию их подготовки.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, искусственный интеллект, компьютерное зрение, охрана Государственной границы, поддержка принятия решений, подготовка специалистов.

Введение. Одной из характерных тенденций последнего десятилетия стало массовое распространение беспилотных авиационных систем (БАС), сопровождающееся не менее стремительным развитием технологий искусственного интеллекта (ИИ). Если на начальном этапе беспилотный летательный аппарат (БПЛА) рассматривался преимущественно как носитель видеокамеры, передающий изображение оператору, то в настоящее время методы глубокого обучения широко применяются для автоматического обнаружения и сопровождения объектов в данных, получаемых с борта БПЛА, в самых разных прикладных задачах [1]. Тем самым БАС из «летающей камеры» превращается в элемент интеллектуальной системы сбора и анализа информации.

Приоритетность развития ИИ для Республики Казахстан подчеркнута в Послании Главы государства народу Казахстана «Казахстан в эпоху искусственного интеллекта: актуальные задачи и их решения через цифровую трансформацию» [2]. Постановлением Правительства Республики Казахстан от 24 июля 2024 года № 592 утверждена Концепция развития искусственного интеллекта на 2024–2029 годы, в которой в качестве ключевых направлений выделены данные, инфраструктура, человеческий капитал и научные исследования [3]. Правовую основу этой сферы составил Закон Республики Казахстан от 17 ноября 2025 года № 230-VIII «Об искусственном интеллекте», закрепивший принципы законности, справедливости и равенства, прозрачности и объяснимости, ответственности и подконтрольности, приоритета

благополучия человека и свободы воли в принятии им решений, защиты данных и конфиденциальности, безопасности и защищенности [4].

Для органов, обеспечивающих охрану Государственной границы, данная проблематика имеет особое значение. Закон Республики Казахстан «О Государственной границе Республики Казахстан» регулирует общественные отношения в области защиты Государственной границы [5], практическая реализация которой осуществляется в условиях значительной протяженности рубежей (свыше 13 тыс. км), разнообразия физико-географических условий – от степных и пустынных районов до высокогорья и побережья Каспийского моря – и резко континентального климата с большими суточными и сезонными перепадами температур. В этих условиях БПЛА позволяют обеспечить обзор участков, труднодоступных для пограничных нарядов (горных троп, перевалов, ущелий), а также оперативный поиск людей и транспортных средств и наблюдение за ними на значительном удалении от мест расположения подразделений.

Вместе с тем широкое применение БАС порождает проблему информационной перегрузки оператора. Каждый полет генерирует многочасовой видеопоток, требующий непрерывного внимания. Классические исследования бдительности показали, что эффективность обнаружения человеком редких сигналов при длительном наблюдении заметно снижается уже после первых получаса работы [6]. Поскольку на большинстве участков объекты интереса появляются редко, а наблюдение ведется длительно, именно возможности оператора становятся фактором, ограничивающим эффективность всей системы. Технологии ИИ способны дать здесь наибольший эффект, взяв на себя первичную обработку информации и оставив человеку проверку результатов и принятие решений.

Целью статьи является систематизация направлений применения технологий ИИ в составе БАС при решении задач охраны Государственной границы, выявление ограничений этих технологий и обоснование требований к подготовке специалистов, способных эффективно их применять. Методологическую основу исследования составили анализ отечественных и зарубежных научных публикаций и нормативных правовых актов, сравнительный анализ и систематизация. Исследование выполнено исключительно на основе открытых источников.

Основная часть. Анализ открытых публикаций позволяет выделить шесть основных направлений применения технологий ИИ в составе БАС применительно к задачам пограничной деятельности (таблица 1).

Первое и наиболее развитое направление – автоматическое обнаружение, классификация и сопровождение объектов (людей, транспортных средств, животных) в видеопотоке оптического и тепловизионного каналов. Его технологическую основу составляют глубокие сверточные нейронные сети [7], прежде всего одностадийные детекторы семейства YOLO, рассматривающие обнаружение объектов как единую задачу регрессии и обрабатывающие

изображение за один проход сети, что обеспечивает работу в реальном масштабе времени [8].

Таблица 1 – Направления применения технологий ИИ в составе БАС при охране Государственной границы

Направление	Решаемые задачи	Основные ограничения
1. Обнаружение, классификация и сопровождение объектов	Выявление людей и транспортных средств в видимом и тепловизионном диапазонах, автоматическое оповещение оператора	Малые размеры объектов, маскировка, растительность, метеоусловия, ложные срабатывания
2. Выявление изменений обстановки	Обнаружение новых следов, троп, повреждений инженерных сооружений по разновременным снимкам	Сезонные изменения фона, различие условий съемки
3. Автономная навигация и планирование маршрутов	Оптимизация маршрутов облета, продолжение полета при потере сигналов спутниковой навигации	Ограниченные бортовые вычислительные ресурсы, накопление ошибки визуальной навигации
4. Комплексирование данных	Формирование единой картины обстановки по данным БАС, камер, наземных датчиков и радиолокационных средств	Разнородность форматов и темпа обновления данных, требования к защищенности каналов
5. Обнаружение несанкционированных БПЛА	Выявление и классификация малоразмерных БПЛА по оптическим, акустическим и радиочастотным признакам	Малая заметность, сходство с птицами, сложная помеховая обстановка
6. Поисково-спасательные и гуманитарные задачи	Поиск людей в горной и пустынной местности, мониторинг паводков и пожаров	Ограниченная продолжительность полета, зависимость от погоды

Обзор современных методов обнаружения и сопровождения объектов с борта БПЛА показывает, что специфическими трудностями этой предметной области являются малые размеры объектов на изображении, большой разброс их масштабов и движение самого носителя [1]. Для объективного сравнения алгоритмов в таких условиях созданы открытые эталонные наборы данных, одним из крупнейших среди которых является VisDrone [9]. Практическая ценность этого направления для пограничной деятельности состоит в том, что система ИИ выполняет роль фильтра, отбирающего из многочасового видеопотока фрагменты с потенциальными объектами интереса и предъявляющего их оператору для проверки.

Второе направление – выявление изменений обстановки путем сравнения разновременных снимков одного и того же участка местности. Алгоритмы машинного обучения позволяют автоматически выделять появление новых следов и троп, повреждения инженерных сооружений, изменения растительного и снежного покрова, что особенно востребовано при регулярном облете

протяженных малонаселенных участков, где визуальное сравнение снимков оператором требует значительных затрат времени.

Третье направление – автономная навигация и планирование маршрутов. Алгоритмы ИИ позволяют формировать маршруты облета с учетом рельефа, метеоусловий и остаточного ресурса источников питания, а методы визуальной навигации, основанные на оценке перемещения носителя по последовательности изображений бортовой камеры [10], обеспечивают продолжение полета при ухудшении или потере сигналов спутниковых навигационных систем. Для приграничной зоны последнее имеет принципиальное значение, поскольку устойчивость спутниковой навигации и радиоканалов управления здесь не может считаться гарантированной.

Четвертое направление – комплексирование данных, то есть объединение информации, поступающей от БАС, стационарных камер наблюдения, наземных датчиков и радиолокационных средств, в единую картину обстановки. Как показано в классических работах по многосенсорному слиянию данных, совместная обработка разнородной информации позволяет повысить точность и достоверность оценок по сравнению с использованием любого отдельного источника [11]. Технологии ИИ автоматизируют сопоставление отметок от разных средств, отсеивают дублирующие сигналы и ранжирование событий по степени важности, благодаря чему должностное лицо получает не поток разрозненных сообщений, а обобщенную картину обстановки.

Пятое направление – обнаружение и классификация несанкционированных малоразмерных БПЛА, которые могут использоваться для перемещения контрабанды через границу или для наблюдения за объектами и действиями пограничных подразделений. Малые размеры, низкая скорость и небольшая высота полета таких аппаратов затрудняют их обнаружение традиционными средствами, а методы ИИ позволяют распознавать их по совокупности оптических, акустических и радиочастотных признаков, в том числе отличать их от птиц.

Шестое направление – поисково-спасательные и гуманитарные задачи: поиск заблудившихся и пострадавших людей в горной и пустынной местности, мониторинг паводковой и пожарной обстановки в приграничных районах. Зарубежные исследователи указывают на двойственный характер пограничных БАС: наряду с усилением контроля они позволяют спасать жизни людей, оказавшихся в опасных условиях в пустыне или на море, но одновременно порождают вопросы защиты частной жизни [12]. Возможности беспилотной авиации в поисково-спасательных операциях подробно рассмотрены также в обзорах ее гражданских применений [13].

Вместе с тем зарубежный опыт свидетельствует, что само по себе оснащение пограничного ведомства БАС не гарантирует роста эффективности охраны границы. Аудит программы БАС Службы таможенной и пограничной охраны США, проведенный Управлением генерального инспектора Министерства внутренней безопасности в 2014 году, показал, что после восьми лет реализации программы ведомство не могло доказать ее эффективность, так

как не разработало показателей результативности. Аппараты, нередко остававшиеся на земле из-за неблагоприятной погоды, выполнили лишь около 22 % запланированного налета, а фактическая стоимость летного часа, по оценке аудиторов, почти в пять раз превысила учитываемую ведомством [14]. Отсюда следует важный для отечественной практики вывод: внедрение интеллектуальных БАС должно сопровождаться разработкой методики оценки их эффективности, учетом полной стоимости жизненного цикла и реалистичной оценкой влияния климатических факторов.

Обобщение открытых источников позволяет сгруппировать ограничения технологий ИИ в составе БАС по четырем группам факторов: условия наблюдения, данные, вычислительные ресурсы и человеческий фактор.

Условия наблюдения. При высоте полета, обеспечивающей приемлемую ширину полосы обзора, человек или транспортное средство занимают на изображении лишь небольшое число пикселей, что резко снижает достоверность распознавания [1]. Дополнительными помехами являются рельеф и растительность, пыльные бури, снегопад и туман, а для тепловизионного канала – периоды суточного выравнивания температур объекта и фона, когда тепловой контраст существенно снижается.

Данные. Нейронная сеть работает надежно лишь в тех условиях, которые представлены в обучающей выборке. Показано, что модели, обученные на одном наборе данных, заметно теряют в качестве при переносе на другой [15]. Так, набор VisDrone сформирован по результатам съемки городских и пригородных территорий 14 городов Китая [9], тогда как для пограничных участков Казахстана характерны степь, пустыня, высокогорье и продолжительный период снежного покрова. Следовательно, для эффективного применения ИИ в пограничной деятельности необходимы собственные размеченные наборы данных и дообучение моделей на них. Это согласуется с требованием Закона «Об искусственном интеллекте» об использовании качественных и репрезентативных наборов данных, полученных с соблюдением законодательства [4].

Вычислительные ресурсы. Обработка видеопотока непосредственно на борту снижает зависимость системы от канала передачи данных и объем передаваемой информации, однако ограничена массой, энергопотреблением и тепловым режимом бортового вычислителя. Это вынуждает искать компромисс между точностью модели и скоростью ее работы, а также рационально распределять функции обработки между бортовым и наземным сегментами.

Человеческий фактор. Любая система обнаружения допускает ошибки двух родов – пропуск объекта и ложное срабатывание, причем соотношение между ними регулируется выбором порога уверенности классификатора. Для количественной иллюстрации рассмотрим полет, в ходе которого в зоне наблюдения находятся M объектов интереса. Если полнота обнаружения системы (доля обнаруженных объектов) равна R , а точность (доля истинных сигналов среди всех выданных) – P , то общее число сигналов, предъявляемых оператору, составит:

$$N = R \cdot M / P, \quad (1)$$

из них ложных:

$$F = R \cdot M \cdot (1 - P) / P, \quad (2)$$

а число пропущенных объектов:

$$L = (1 - R) \cdot M. \quad (3)$$

При среднем времени проверки одного сигнала t суммарное время работы оператора с сигналами составит $T = N \cdot t$.

Пусть, например (условные данные), $M = 20$, $R = 0,9$, $P = 0,6$ и $t = 0,5$ мин. Тогда $N = 30$, $F = 12$, $L = 2$, $T = 15$ мин. Для полета продолжительностью 120 мин это означает восьмикратное сокращение времени, требующего сосредоточенного внимания оператора, по сравнению с непрерывным просмотром видеопотока. Однако два объекта из двадцати будут пропущены системой, и если оператор полностью полагается на автоматические сигналы, они будут пропущены и им. Снижение порога уверенности повышает полноту, но увеличивает число ложных сигналов и нагрузку на оператора; повышение порога дает обратный эффект. Таким образом, выбор режима работы системы ИИ является не чисто техническим, а тактическим решением, которое должно приниматься с учетом обстановки на конкретном участке.

Последнее обстоятельство связывает технические ограничения ИИ с проблемой взаимодействия человека и автоматики. Еще в 1990-е годы было показано, что это взаимодействие может принимать как форму чрезмерного доверия и некритичного следования рекомендациям автоматики, так и форму необоснованного отказа от ее использования [16]. Последующие исследования установили, что благодушие (complacency) и предвзятость в пользу автоматики (automation bias) проявляются как у новичков, так и у опытных операторов, приводят к ошибкам пропуска и к ошибкам следования ложным рекомендациям и не устраняются простой тренировкой или инструктажем [17]. Вместе с тем экспериментально подтверждено, что включение в процесс обучения эпизодов с отказами автоматики существенно снижает благодушие операторов, хотя и не исключает его полностью [18]. Эти данные имеют непосредственное значение для организации подготовки специалистов.

Наконец, существенные ограничения носят правовой и этический характер. Видеосъемка с борта БАС неизбежно связана с получением изображений людей, в том числе не имеющих отношения к нарушениям, что требует соблюдения законодательства о персональных данных [19]. Закон «Об искусственном интеллекте» обязывает собственника, владельца и пользователя обеспечивать постоянный контроль над системой ИИ на всех этапах ее жизненного цикла и сохранение автономии и свободы воли человека в принятии решений [4]. Закон также разделяет системы ИИ по степени автономности: в системах низкой

автономности окончательный выбор и действия всегда осуществляются человеком, в системах средней автономности за человеком сохраняется возможность корректировки или отмены принятых системой решений. Кроме того, для обработки данных, доступ к которым ограничен законами, предусмотрено применение локальных систем ИИ, функционирующих без подключения к сетям телекоммуникаций общего пользования [4].

Как следует из изложенного, эффективность интеллектуальных БАС определяется не только их техническими характеристиками, но и подготовленностью личного состава. Концепция развития искусственного интеллекта на 2024-2029 годы относит человеческий капитал к ключевым направлениям развития отрасли [3]; применительно к пограничному ведомству это означает необходимость целенаправленного формирования у будущих офицеров компетенций, обеспечивающих грамотное применение систем ИИ. На основе анализа функций оператора и должностного лица, использующего результаты работы интеллектуальной БАС, предлагается выделить четыре группы таких компетенций (таблица 2).

Таблица 2 – Группы компетенций специалиста по применению интеллектуальных БАС

Группа компетенций	Содержание	Формы и средства формирования
Эксплуатационно-техническая	Подготовка БАС к применению, планирование задания, управление полетом и целевой нагрузкой в сложных условиях, действия при отказах	Тренажерная подготовка, практические полеты, отработка нештатных ситуаций
Цифровая	Понимание принципов работы нейросетевых моделей, видов их ошибок, смысла порога уверенности, требований к данным	Лабораторные практикумы на открытых наборах данных, расчет показателей качества обнаружения
Аналитическая	Интерпретация и проверка сигналов системы ИИ с учетом обстановки, сопоставление с данными других средств, документирование и доклад	Решение ситуационных задач, тренировки и учения с преднамеренно введенными ошибками ИИ
Нормативно-правовая	Знание законодательства об ИИ и о персональных данных, требований режима секретности и информационной безопасности, понимание персональной ответственности должностного лица	Семинары, разбор практических ситуаций, контроль знания нормативной базы

Обобщение рассмотренных направлений и ограничений позволяет сформулировать ряд функциональных требований к интеллектуальным БАС, создаваемым в интересах пограничного ведомства:

1) функционирование ИИ в режиме поддержки принятия решений с сохранением окончательного решения за должностным лицом, что соответствует системам низкой или средней автономности по классификации Закона «Об искусственном интеллекте»;

2) отображение оператору не только результата распознавания, но и степени уверенности системы, а также возможность оперативного изменения порога чувствительности в зависимости от обстановки;

3) обработка информации на борту и продолжение выполнения задачи при потере каналов связи и сигналов спутниковой навигации;

4) работоспособность в широком диапазоне температур, при пыли, снеге и сильном ветре;

5) замкнутый (локальный) контур обработки и хранения данных, защита моделей и каналов передачи информации от несанкционированного доступа;

6) возможность дообучения моделей на собственных данных ведомства и протоколирование всех автоматически сформированных сигналов и действий оператора для последующего анализа и оценки эффективности.

Выделение цифровой компетенции в самостоятельную группу принципиально важно. Оператор, не понимающий, что система ИИ выдает не «истину», а вероятностную оценку, полученную на основе обучающих данных, склонен либо некритично доверять ей, либо необоснованно отвергать ее рекомендации, то есть попадает именно в те ловушки, которые описаны в исследованиях взаимодействия человека с автоматикой [16, 17]. Формирование этой компетенции не требует углубленной математической подготовки: достаточно, чтобы курсант на практике убедился, как изменяются полнота и точность обнаружения при изменении порога, в каких условиях модель ошибается и почему.

Аналитическая компетенция предполагает умение рассматривать сигнал системы ИИ как гипотезу, требующую проверки, и сопоставлять его с данными других средств наблюдения и сведениями, полученными от пограничных нарядов. Именно она превращает техническое средство в элемент системы принятия решений. Нормативно-правовая компетенция, в свою очередь, обеспечивает понимание того, что ответственность за решение, принятое с использованием ИИ, несет должностное лицо, а не алгоритм.

С учетом изложенного предлагаются следующие организационно-методические меры по совершенствованию подготовки специалистов:

1) включение в образовательные программы сквозного модуля по применению интеллектуальных БАС, интегрированного с тактико-специальными дисциплинами, с тем чтобы вопросы применения ИИ рассматривались не изолированно, а в контексте решения служебных задач;

2) широкое использование тренажеров и виртуальной среды, позволяющих многократно и безопасно отрабатывать действия в сложных метеоусловиях и при отказах оборудования;

3) проведение лабораторных практикумов на основе открытых наборов данных и моделей (например, VisDrone [9]), в ходе которых курсанты самостоятельно рассчитывают показатели полноты и точности обнаружения и анализируют ошибки распознавания;

4) преднамеренное включение в тренировки и учения эпизодов с ошибками системы ИИ – ложными сигналами и пропусками объектов, что, согласно

экспериментальным данным, снижает склонность операторов к некритичному доверию автоматике [18];

5) привлечение курсантов и адъюнктов к научно-исследовательской работе по формированию и разметке наборов данных, отражающих природно-климатические условия пограничных участков, с соблюдением требований режима секретности;

6) развитие сотрудничества с отечественными научными и производственными организациями в части апробации разрабатываемых решений в учебном процессе и получения разработчиками обратной связи от будущих пользователей на ранних стадиях создания изделий;

7) повышение квалификации профессорско-преподавательского состава в области ИИ и анализа данных.

Реализация этих мер позволит сократить разрыв между темпами развития технологий и готовностью личного состава к их применению. При этом тренировки с преднамеренными ошибками ИИ целесообразно дополнять организационными мерами – процедурами обязательной проверки сигналов и продуманным построением интерфейса, поскольку одной лишь подготовкой предвзятость в пользу автоматике полностью не устраняется [17].

Заключение. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

Во-первых, технологии ИИ превращают БАС из носителя видеокамеры в элемент интеллектуальной системы сбора и анализа информации. Применительно к охране Государственной границы выделены шесть основных направлений их применения: обнаружение и классификация объектов, выявление изменений обстановки, автономная навигация, комплексирование данных, обнаружение несанкционированных БПЛА, поисково-спасательные и гуманитарные задачи.

Во-вторых, эффективность этих технологий ограничена условиями наблюдения, несоответствием обучающих данных условиям пограничных участков, бортовыми вычислительными ресурсами и человеческим фактором. Предложенные соотношения (1)–(3) показывают, что выбор порога чувствительности системы определяет баланс между нагрузкой на оператора и риском пропуска объектов и потому должен рассматриваться как тактическое решение.

В-третьих, интеллектуальные БАС для пограничного ведомства целесообразно создавать как системы поддержки принятия решений с сохранением окончательного решения за человеком, что согласуется с положениями Закона Республики Казахстан «Об искусственном интеллекте». Сформулированные функциональные требования могут быть использованы разработчиками при создании соответствующих изделий.

В-четвертых, ключевым условием эффективного внедрения является подготовка специалистов, обладающих наряду с эксплуатационно-техническими также цифровыми, аналитическими и нормативно-правовыми компетенциями; обязательным элементом их подготовки должна стать тренировка с преднамеренно введенными ошибками системы ИИ.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются разработка методики оценки эффективности интеллектуальных БАС в условиях пограничной деятельности, формирование отечественных наборов данных и экспериментальная проверка предложенного учебного модуля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Wu X., Li W., Hong D. [et al.] Deep Learning for Unmanned Aerial Vehicle-Based Object Detection and Tracking: A Survey // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine – 2022. – Vol. 10, № 1. – P. 91–124.

2 Казахстан в эпоху искусственного интеллекта: актуальные задачи и их решения через цифровую трансформацию: Послание Главы государства Касым-Жомарта Токаева народу Казахстана от 8 сентября 2025 года. – URL: <https://www.akorda.kz/ru/poslanie-glavy-gosudarstva-kasym-zhomarta-tokaeva-narodu-kazahstana-kazahstan-v-epohu-iskus> (дата обращения 12.09.2026)

3 Об утверждении Концепции развития искусственного интеллекта на 2024-2029 годы: постановление Правительства Республики Казахстан от 24 июля 2024 года № 592. – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=34317430 (дата обращения 14.09.2026)

4 Об искусственном интеллекте: Закон Республики Казахстан от 17 ноября 2025 года № 230-VIII ЗРК (с изменениями от 24.06.2026 г.). – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z2500000230> (дата обращения 14.09.2026)

5 О Государственной границе Республики Казахстан: Закон Республики Казахстан от 16 января 2013 года № 70-V (с изменениями и дополнениями по состоянию на 11.08.2026 г.). – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=31320511 (дата обращения 14.09.2026)

6 Mackworth N.H. The breakdown of vigilance during prolonged visual search // Quarterly Journal of Experimental Psychology – 1948. – Vol. 1, № 1. P. 6–21.

7 Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А.А. Слинкина. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652 с.

8 Redmon J., Divvala S., Girshick R. [et al.] You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). – Las Vegas, 2016. – P. 779-788.

9 Zhu P., Wen L., Du D. [et al.] Detection and Tracking Meet Drones Challenge // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2022. – Vol. 44, № 11. – P. 7380-7399.

10 Scaramuzza D., Fraundorfer F. Visual Odometry. Part I: The First 30 Years and Fundamentals // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2011. – Vol. 18, № 4. – P. 80-92.

11 Hall D.L., Llinas J. An Introduction to Multisensor Data Fusion // Proceedings of the IEEE. – 1997. – Vol. 85, № 1. – P.6-23.

12 Koslowski R., Schulzke M. Drones Along Borders: Border Security UAVs in the United States and the European Union // *International Studies Perspectives*. – 2018. – Vol. 19, № 4. – P.305-324.

13 Shakhathreh H., Sawalmeh A.H., Al-Fuqaha A. [et al.] Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges // *IEEE Access* – 2019. – Vol. 7. – P. 48572-48634.

14 U.S. Customs and Border Protection's Unmanned Aircraft System Program Does Not Achieve Intended Results or Recognize All Costs of Operations: Report OIG-15-17 / U.S. Department of Homeland Security, Office of Inspector General. – Washington, 2014.

15 Torralba A., Efros A.A. Unbiased Look at Dataset Bias // *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. – Colorado Springs, – 2011. – P. 1521-1528.

16 Parasuraman R., Riley V. Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse // *Human Factors*. – 1997. – Vol. 39, № 2. – P. 230-253.

17 Parasuraman R., Manzey D.H. Complacency and Bias in Human Use of Automation: An Attentional Integration // *Human Factors*. – 2010. – Vol. 52, № 3. – P. 381-410.

18 Bahner J.E., Hüper A.-D., Manzey D. Misuse of Automated Decision Aids: Complacency, Automation Bias and the Impact of Training Experience // *International Journal of Human-Computer Studies* – 2008. – Vol. 66, № 9. – P. 688-699.

19 О персональных данных и их защите: Закон Республики Казахстан от 21 мая 2013 года № 94-V (с изменениями и дополнениями). – URL: https://prg.kz/document/?doc_id=31396226 (дата обращения 12.09.2026)

UAV-BASED FIRE AND SMOKE DETECTION WITH DEEP LEARNING: REVIEW AND EXPERIMENTAL COMPARISON

bachelor Dossymbekov A.,
master Kutpanova Z.,
doctor of Science Biloshchytska S.
Astana IT University
Astana, Republic of Kazakhstan

Abstract. This paper reviews deep learning methods for UAV-based fire and smoke detection, including 2026 lightweight YOLO, RGB–thermal and localization-aware detectors, and compares Faster R-CNN and YOLOv8n on the D-Fire dataset. Faster R-CNN is more sensitive, whereas YOLOv8n gives more stable predictions and suits real-time UAV monitoring.

Keywords: UAV; fire and smoke detection; deep learning; object detection; YOLOv8n; Faster R-CNN

Introduction. Forest fires cause serious environmental, economic, and safety damage, and climate change, human activity, and extreme weather increase this risk. Early detection limits fire spread, but conventional monitoring is weak in remote, large, or hard-to-access areas. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) can cover large territories, reach hazardous zones, and capture images from different altitudes and viewpoints. Recent studies combine UAVs with artificial intelligence, edge computing, multimodal sensing, and lightweight deep learning models [1]-[6], with a growing focus on lightweight YOLO variants, RGB-thermal fusion, and onboard localization [7]-[14]. Practical deployment is still limited by the variable appearance of fire and smoke, lighting, complex backgrounds, UAV motion, and scarce onboard computing resources. This paper reviews AI-based fire and smoke detection for UAVs, from traditional image processing to CNN, transformer, and multimodal models, and experimentally compares Faster R-CNN and YOLOv8n on the D-Fire dataset in terms of detection stability, false positives, and suitability for real-time UAV deployment.

Literature Review / Related Work

Traditional Fire Detection Methods

Classical methods detect fire pixels with image processing techniques such as thresholding and color-based segmentation. They run in real time but do not account for changing environmental conditions, and studies on wildfire detection show that they are inadequate in such environments [15].

Main part. Deep Learning-Based Approaches. Convolutional neural networks (CNNs) learn discriminative image features automatically and have become the dominant approach to fire and smoke detection; reviews show that they generally outperform conventional image processing [16]. CNNs and object detectors have been applied to wildfire monitoring from aerial and UAV viewpoints [17]-[19]. YOLO

detectors are among the most widely used because of their single-stage design, real-time speed, and suitability for resource-constrained systems [19], [20], and newer YOLO versions further improve accuracy and efficiency [20], [21]. Recent work adapts compact YOLO models to the small, non-rigid, and low-contrast targets of UAV fire imagery. UAV-FlameNet [7] extends YOLOv11 with lossless downsampling, deformable feature aggregation, and the MPDIoU loss; PWM-Net [8] adds a PartialNet backbone, wavelet convolution, and multi-spectral attention to YOLOv11n; ASCA-YOLO [9] builds adaptive multi-scale convolution and context-aware attention on YOLO26; and TriRHC-YOLO [10] adds RepVGG blocks, hierarchical feature attention, and a cascaded star block to YOLOv8n. All four improve small-target sensitivity with fewer than 8 M parameters (Table 2).

Transformer-Based and Advanced Architectures

Vision transformers and hybrid CNN-Transformer models capture long-range visual dependencies and improve the contextual understanding of fire and smoke [22], but their computational cost limits their use on UAVs. Multimodal systems add infrared or thermal cameras, stereovision, or wireless sensor networks (WSN) to overcome the limitations of RGB cameras in difficult lighting [23]–[25], at the price of higher cost, payload weight, energy consumption, and system complexity. Recent RGB–thermal detectors try to reduce this cost. DNFNet [11] adapts the fusion weights to image brightness for day–night segmentation and runs at about 25 FPS on a Jetson Orin NX with 12.06 M parameters, while RTA-FireNet [12] uses the visible branch as the main feature extractor and adds thermal cues only at selected stages, reaching 95.2% AP50 with 2.2 M parameters.

UAV-based deployment challenges.

Deploying fire detection models on UAVs remains challenging. The appearance of fire and smoke depends on fire size and color, lighting, background, weather, and UAV motion [26], while UAVs are limited in computing power, battery life, payload, and communication, yet must detect fires in real time. Models therefore have to balance accuracy against computational cost. Geospatial analysis, edge computing, and additional sensors can improve the operator's situational awareness, but the detector itself must stay lightweight and reliable [27]. BGC-LiteNet [13] embeds the BeiDou Grid Code into the network and uses latency-aware architecture search to produce detection and geographic localization together (92.4% geolocation accuracy, 38.2 ms latency on embedded hardware). Vazquez et al. [14] show that transfer learning from FASDD or MS COCO helps lightweight YOLO models when labeled aerial data are scarce, and evaluate them by FPS, power, and energy in addition to mAP.

Methods. Model Selection and Architecture.

The review shows that lightweight single-stage detectors offer the best balance between accuracy and computational efficiency for UAV-based fire detection [21], [26], [27]. Because YOLO models provide fast inference [19], [20] and most recent UAV fire detectors extend compact YOLO models [7]–[10], YOLOv8n was chosen as the baseline. YOLOv8 consists of a backbone, neck, and detection head, and its anchor-free design helps detect objects at different scales [20].

Dataset Description.

The experiments use the D-Fire dataset, which contains 21,527 images annotated with two classes, fire and smoke. The images were collected under varied conditions and include low-contrast smoke and irregularly shaped fire, challenges also reported for UAV-based fire detection [26]. The dataset was divided into training, validation, and test subsets to evaluate performance on unseen data.

Training Procedure and Optimization.

Detection and Loss Formulation.

The model is initialized with weights pre-trained on the Common Objects in Context (COCO) dataset. YOLOv8 treats detection as a joint optimization of localization, objectness, and classification. Let an input image be represented as:

$$x \in \mathbb{R}^{H \times W \times 3} \quad (1)$$

The model outputs a set of predictions:

$$\hat{Y} = \{(\hat{b}_i, \hat{p}_i, \hat{c}_i)\}_{i=1}^N \quad (2)$$

where $\hat{b}_i = (x_i, y_i, w_i, h_i)$ – predicted bounding box;

$\hat{p}_i$ – objectness score;

$\hat{c}_i$ – class probability vector,

Bounding Box Regression

Bounding box prediction is formulated as a regression task minimizing the Complete Intersection over Union (CIoU) loss:

$$L_{\text{CIoU}} = 1 - \text{IoU}(b, b^{gt}) + \frac{\rho^2(b, b^{gt})}{c^2} + \alpha v \quad (3)$$

where:

$$\text{IoU}(b, b^{gt}) = \frac{|b \cap b^{gt}|}{|b \cup b^{gt}|}$$

$$\rho(b, b^{gt}) = \|(x, y) - (x^{gt}, y^{gt})\|_2$$

c – diagonal of the smallest enclosing box;

v – aspect ratio consistency term:

$$v = \frac{4}{\pi^2} \left(\arctan \frac{w^{gt}}{h^{gt}} - \arctan \frac{w}{h} \right)^2,$$

$$\alpha = \frac{v}{(1 - \text{IoU}) + v}.$$

Besides maximizing the overlap with the ground truth, CIoU penalizes the distance between box centers and the difference in aspect ratio, which matters for irregular fire shapes and smoke regions of varying aspect ratios.

Objectness Loss

Objectness prediction is modeled using binary cross-entropy BCE:

$$L_{\text{obj}} = -[y\log(\hat{p}) + (1 - y)\log(1 - \hat{p})] \quad (4)$$

Where $y \in \{0,1\}$ indicates presence of object.

Classification Loss

For multi-class prediction (fire vs smoke), classification loss is also computed using BCE:

$$L_{\text{cls}} = -\sum_{k=1}^K y_k \log(\hat{c}_k) \quad (5)$$

Total Loss Function.

The overall optimization objective is:

$$L = \lambda_1 L_{\text{CIoU}} + \lambda_2 L_{\text{obj}} + \lambda_3 L_{\text{cls}} \quad (6)$$

where $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ are weighting coefficients.

Note that the anchor-free YOLO head used here has no separate objectness branch; its loss combines BCE for classes with CIoU and distribution focal loss for boxes [8].

Eqs. (4)-(6) should therefore be read as a general formulation.

Training Configuration

The training process was configured as follows:

- Input resolution: 512×512 ;
- Batch size: 4;
- Number of epochs: 20
- Initialization: COCO pre-trained weights

The 512×512 input was used as a standardized setting. D-Fire images are commonly provided at 416×416 , but the YOLOv8 preprocessing pipeline resizes them to the selected size; 512×512 was chosen to improve the visibility of small fire and smoke regions and to keep experiments consistent. This study does not claim that it is the most power-efficient configuration.

Evaluation Protocol

Performance was evaluated with mean Average Precision (mAP). The mAP@0.5 metric uses a fixed IoU threshold:

$$\text{IoU} \geq 0.5.$$

while mAP@0.5:0.95 averages performance across multiple thresholds:

$$\text{IoU} \in [0.5, 0.55, \dots, 0.95]$$

Together, these widely used metrics measure both detection accuracy and localization precision and allow comparison with existing methods.

Experimental Scenarios and Simulation Setup

Experimental Design and Implementation

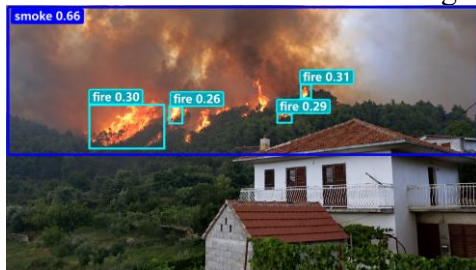
Faster R-CNN and YOLOv8n were trained and tested under the same conditions on the training, validation, and test subsets of D-Fire, using Google Colab with an NVIDIA Tesla T4 GPU. Both models were initialized with pre-trained weights and trained with the same number of epochs, batch size, and input resolution.

The pipeline included dataset splitting, model initialization, training with validation, inference on test images, calculation of precision, recall, mAP, and F1-score, and qualitative and quantitative comparison of the results.

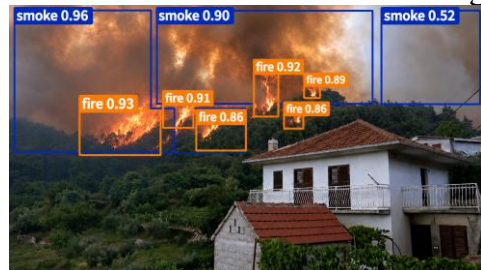
Qualitative Evaluation of Detection Performance

Faster R-CNN detects more fire and smoke candidates, including small fire regions, but produces many false positives. YOLOv8n gives fewer false positives and performs better on non-fire scenes, but it can miss small or low-smoke fires and sometimes mistakes smoke-like background patterns for smoke. Thus, Faster R-CNN is more sensitive, while YOLOv8n is more stable and better suited to real-time UAV applications (Figure 1).

YOLOv8n detection results on image 1



Faster R-CNN detection results on image 1



YOLOv8n detection results on image 2



Faster R-CNN detection results on image 2

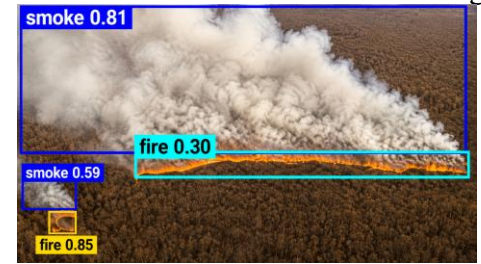


Figure 1 – Side-by-side comparison of detection outputs for Faster R-CNN and YOLOv8n on representative test images

Quantitative Performance Analysis. YOLOv8n achieved an mAP@0.5 of 0.673, with class-wise average precision of 0.740 for smoke and 0.606 for fire. The F1-confidence curve peaks at an F1 score of about 0.65 at a confidence threshold of about 0.25 (Figure 2). The normalized confusion matrix shows that 71% of smoke and 53% of fire instances were classified correctly (Figure 3). Most errors are missed small or low-intensity fires and a few false smoke detections in images with background smoke.

Compared with Faster R-CNN, YOLOv8n produces fewer false positives and detects small fires more stably, although Faster R-CNN detects them with higher sensitivity.

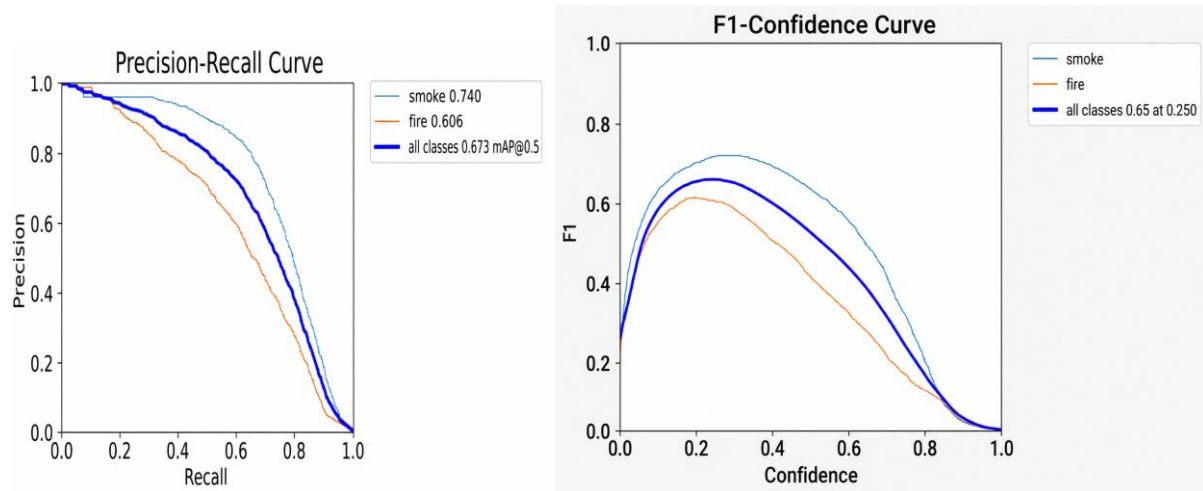


Figure 2 – Precision-Recall curve for YOLOv8n and F1-Confidence curve illustrating optimal threshold selection

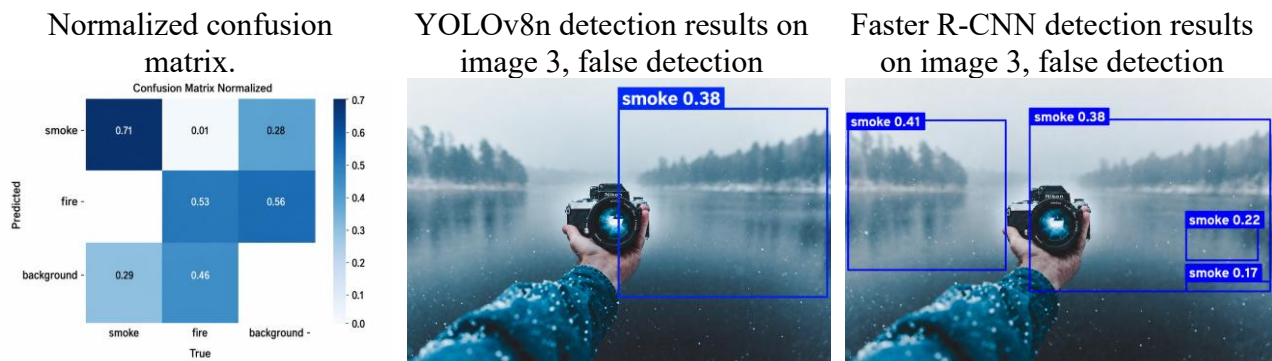


Figure 3 – Normalized confusion matrix and examples of failure cases

Comparative Analysis of Detection Models

Overall, Faster R-CNN is more sensitive to small fire regions, while YOLOv8n is more computationally efficient (Table 1). Given the real-time and resource requirements of UAV fire monitoring, YOLOv8n is the more favorable option: it may miss some low-intensity fires, but its lower false-positive rate and faster processing make it more suitable for deployment.

Table 1 – Comparison of Faster R-CNN and YOLOv8n across key performance and deployment criteria

Criterion	Faster R-CNN	YOLOv8n
Detection type	Two-stage	Single-stage
Sensitivity (small objects)	High	Moderate
Number of detections	High (redundant)	Low (compact)
False positives	Higher	Lower
Prediction stability	Lower (overlapping boxes)	Higher

Smoke detection performance	Good	Strong
Fire detection performance	Strong (but noisy)	Moderate
Computational cost	High	Low
Inference speed	Slow	Real-time
Suitability for UAV deployment	Limited	High

Discussion and Future Directions.

YOLOv8n provides a better balance between detection stability and computational efficiency for UAV deployment, at the cost of lower sensitivity to small fires. This agrees with recent independent benchmarks. On D-Fire, the authors of PWM-Net report 64.8% mAP@50 and 47 FPS for Faster R-CNN against 79.4% and 197 FPS for YOLOv8n [8]; on another wildfire dataset, the authors of ASCA-YOLO report higher recall for Faster R-CNN than for YOLOv8 (0.859 vs 0.775) at 41.3 M versus 3.0 M parameters [9]. Their absolute mAP is higher than the 0.673 obtained here, probably because of longer training (300 epochs in [8] versus 20 here) and different splits and settings, so only the ordering of the two models is comparable. Table 4 lists recent lightweight detectors as reported by their authors; since datasets and protocols differ, the values are not directly comparable. Future work can improve sensitivity to small fires with other architectures, compress models for onboard deployment, and test robustness in adverse conditions. Recent work also suggests RGB-thermal fusion for night and smoke-obscured scenes [11], [12] and combining detection with geographic localization and energy-aware edge evaluation [13], [14]. Finally, input resolutions such as 416×416 and 512×512 should be compared in terms of accuracy, inference speed, and energy consumption on UAV edge hardware.

Table 2 – Recent lightweight UAV fire detectors as reported by their authors (n/r: not reported; values are not directly comparable).

Model	Base / input	Dataset	Reported result	Params; speed
UAV-FlameNet [7]	YOLOv11; RGB	LAWD	mAP@0.5 83.2%	2.72 M; 121 FPS (GPU)
PWM-Net [8]	YOLOv11n; RGB	D-Fire	mAP@50 81.3%	7.8 M; 145 FPS (RTX 4090)
ASCA-YOLO [9]	YOLO26; RGB	M4SFWD + Roboflow	mAP50 0.895	1.87 M; 122.5 FPS (GPU)
TriRHC-YOLO [10]	YOLOv8n; RGB	FLAME + FLAME_VISION	mAP@0.5 0.848; recall 0.769	3.18 M; 168 FPS (Jetson Orin NX)
RTA-FireNet [12]	YOLO11; RGB + thermal	RGBT-3M	AP50 95.2%; F1 94.0%	2.2 M; ~25 FPS (Jetson Orin Nano)
DNFNet [11]	MiT-B0; RGB + thermal; segmentation	DNFire + RGB-T wildfire	IoU 0.854; F1 0.921	12.06 M; 25 FPS (Jetson Orin NX)
BGC-LiteNet [13]	NAS-based; infrared + grid code	Multi-scenario UAV	mAP 88.9%; geolocation 92.4%	0.87 M; 38.2 ms (embedded)
This study	YOLOv8n; RGB	D-Fire	mAP@0.5 0.673	n/r

Conclusion. This study reviewed AI-based approaches for UAV-assisted fire and smoke detection and compared Faster R-CNN and YOLOv8n on the D-Fire dataset. YOLOv8n achieved an mAP@0.5 of 0.673 and showed more stable predictions, fewer false positives, and lower computational cost, making it more suitable for real-time UAV deployment, whereas Faster R-CNN was more sensitive to small fire regions. YOLOv8n detected smoke better than fire, so reliable detection of small and low-intensity fires in complex conditions still requires improvement. Recent lightweight YOLO variants, RGB–thermal fusion, and localization-aware architectures offer promising ways to achieve this.

REFERENCES

- 1 Seidel L., Gehringer S., Raczok T., Ivens S.-N., Eckardt B., Maerz M. Advancing early wildfire detection: integration of vision language models with unmanned aerial vehicle remote sensing for enhanced situational awareness // *Drones* – 2025. – Vol. 9, No. 5. Art. 347. – DOI: 10.3390/drones9050347.
- 2 Sun H., Xu R., Luo J., Cheng H. Review of the application of UAV edge computing in fire rescue // *Sensors* – 2025. – Vol. 25, No. 11. Art. 3304. – DOI: 10.3390/s25113304.
- 3 Abu Ali H., Ever E., Kizilkaya B., Raza Khan M.T., Ur Rehman M., Ansari S., Imran M.A., Yazici A. An edge-intelligent three-tier framework for real-time forest fire detection, integrating WSNs, WMSNs, and UAVs // *Internet of Things* – 2025. – Vol. 36. Art. 101861. – DOI: 10.1016/j.iot.2025.101861.
- 4 Shianios D., Kolios P., Kyrkou C. MultiFire20K: a semi-supervised enhanced large-scale UAV-based benchmark for advancing multi-task learning in fire monitoring // *Computer Vision and Image Understanding* – 2025. – Vol. 254. Art. 104318. – DOI: 10.1016/j.cviu.2025.104318.
- 5 Zhang Y., Rui X., Song W. A UAV-based multi-scenario RGB-thermal dataset and fusion model for enhanced forest fire detection // *Remote Sensing* – 2025. – Vol. 17, No. 15. Art. 2593. – DOI: 10.3390/rs17152593.
- 6 Başarslan M.S., Canlı H. UAV-based forest fire early warning and intervention simulation system with high-accuracy hybrid AI model // *Applied Sciences* – 2026. – Vol. 16, No. 3. Art. 1201. – DOI: 10.3390/app16031201.
- 7 Hu J., Lin Q., Jiao W., Liu H., Jia K., Liu J., Lv J. UAV-FlameNet: a lightweight and high-precision flame detection model for UAV aerial fire monitoring // *Frontiers in Plant Science* – 2026. – Vol. 17. Art. 1892035. – DOI: 10.3389/fpls.2026.1892035.
- 8 Xiang J., Xiang Y., Ni S. PWM-net for frequency-domain enhanced forest fire detection in unmanned aerial vehicle imagery // *Discover Computing* – 2026. – Vol. 29. Art. 624. – DOI: 10.1007/s10791-026-10508-z.
- 9 Hao Y., Wang K., Zhang L., Yuan Z. ASCA-YOLO: adaptive sparse and context-aware YOLO algorithm for forest wildfire detection // *Sensors* – 2026. – Vol. 26, No. 11. Art. 3444. – DOI: 10.3390/s26113444.
- 10 Song B., Li B., Zhang Z., Chen Y., Wang Q., Zhang X., Cao Z., Yue T., Jiang J. TriRHC-YOLO: a method for early forest fire detection in complex environments

based on UAV images // Fire – 2026. – Vol. 9, No. 8. Art. 338. – DOI: 10.3390/fire9080338.

11 Cheng P., Zhang L., Wang B., Liu J., Sui H. DNFNet: a brightness-adaptive lightweight RGB–thermal network for day–night UAV wildfire segmentation // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation – 2026. – Vol. 153. Art. 105572. – DOI: 10.1016/j.jag.2026.105572.

12 Yang D., Wu J., Yu Y. RTA-FireNet: a lightweight RGB-thermal asymmetric detector for early forest fire detection from UAV imagery // Geomatics, Natural Hazards and Risk – 2026. – Vol. 17, No. 1. Art. 2698968. – DOI: 10.1080/19475705.2026.2698968.

13 Yin H., Yu Y., Hong A., Hu M., Wang S., Zhang Z. BGC-LiteNet: BeiDou grid code embedded lightweight neural architecture for real-time UAV fire detection and localization // Scientific Reports – 2026. – DOI: 10.1038/s41598-026-44728-6.

14 Vazquez G., Zhai S.P., Yang M. Edge-friendly UAV wildfire smoke and flame detection using transfer learning-enhanced lightweight deep learning models // Sensors – 2026. – Vol. 26, No. 10. – Art. 3197. – DOI: 10.3390/s26103197.

15 Jain P., Coogan S.C.P., Subramanian S.G., Crowley M., Taylor S., Flannigan M.D. A review of machine learning applications in wildfire science and management // Environmental Reviews – 2020. – Vol. 28, No. 4. – P. 478-505. – DOI: 10.1139/er-2020-0019.

16 Elhanashi A., Essahraoui S., Dini P., Saponara S. Early fire and smoke detection using deep learning: a comprehensive review of models, datasets, and challenges // Applied Sciences – 2025. – Vol. 15, No. 18. – Art. 10255. – DOI: 10.3390/app151810255.

17 Rahman H.I., Saad A.F., Yani A. Drone-based fire detection system based on convolutional neural network // International Journal of Artificial Intelligence – 2024. – Vol. 11, No. 1. P. 26-36. – DOI: 10.36079/lamintang.ijai-01101.669.

18 Biswas A., Ghosh S.K., Ghosh A. Early fire detection and alert system using modified Inception-v3 under deep learning framework // Procedia Computer Science – 2023. – Vol. 218. – P. 2243-2252. – DOI: 10.1016/j.procs.2023.01.200.

19 Bahhar C., Ksibi A., Ayadi M., Jamjoom M.M., Ullah Z., Soufiene B.O., Sakli H. Wildfire and smoke detection using staged YOLO model and ensemble CNN // Electronics. – 2023. – Vol. 12, No. 1. Art. 228. – DOI: 10.3390/electronics12010228.

20 Zheng Y., Tao F., Gao Z., Li J. FGYOLO: an integrated feature enhancement lightweight unmanned aerial vehicle forest fire detection framework based on YOLOv8n // Forests – 2024. – Vol. 15, No. 10. Art. 1823. – DOI: 10.3390/f15101823.

21 Bayraktar I., Bakirci M. Harnessing UAV technology and YOLOv9 algorithm for real-time forest fire detection // 2024 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2024. – P.95-100. – DOI: 10.1109/RusAutoCon61949.2024.10694663.

22 Wang X., Li M., Gao M., Liu Q., Li Z., Kou L. Early smoke and flame detection based on transformer // Journal of Safety Science and Resilience – 2023. – Vol. 4. – P. 294-304. – DOI: 10.1016/j.jnlssr.2023.06.002.

23 Ciullo V., Pieri A., Rossi L. Experimental fire measurement with UAV multimodal stereovision // Remote Sensing – 2020. – Vol. 12, No. 21. – Art. 3546. – DOI: 10.3390/rs12213546.

24 Benzekri W., El Moussati A., Moussaoui O., Berrajaa M. Early forest fire detection system using wireless sensor network and deep learning // International Journal of Advanced Computer Science and Applications – 2020. – Vol. 11, No. 5. – P. 496–503. – DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110564.

25 Shamsoshoara A., Afghah F., Razi A., Zheng L., Fulé P.Z., Blasch E. Aerial imagery pile burn detection using deep learning: the FLAME dataset // Computer Networks – 2021. – Vol. 193. Art. 108001. – DOI: 10.1016/j.comnet.2021.108001.

26 Partheepan S., Sanati F., Hassan J. Autonomous unmanned aerial vehicles in bushfire management: challenges and opportunities // Drones – 2023. – Vol. 7, No. 1. Art. 47. – DOI: 10.3390/drones7010047.

27 Titu M.F.S., Pavel M.A., Michael G.K.O., Babar H., Aman U., Khan R. Real-time fire detection: integrating lightweight deep learning models on drones with edge computing // Drones – 2024. – Vol. 8, No. 9. Art. 483. – DOI: 10.3390/drones8090483.

ADAPTIVE FLIGHT CONTROL OF MULTIROTOR UAVS UNDER PAYLOAD VARIATION AND EXTERNAL DISTURBANCES: FROM CLASSICAL ADAPTIVE METHODS TO LEARNING-BASED CONTROL

master's student Khambarov A.,
master Kutpanova Z.,
doctor of Science Biloshchytska S.
Astana IT University,
Astana, Republic of Kazakhstan

Abstract. This review examines adaptive flight control of multirotor UAVs under payload variation, wind, battery voltage sag and rotor faults. It compares current autopilot practice, classical adaptive and robust methods (MRAC, L_1 , INDI, disturbance observers) and learning-based controllers, and identifies open problems and research directions.

Keywords: multirotor UAV; adaptive control; payload variation; disturbance rejection; reinforcement learning; cable-suspended payload; sim-to-real transfer

Introduction. Multirotor UAVs now perform routine civilian work in agriculture, delivery, inspection and search and rescue. DJI alone estimates that 400,000 of its agricultural drones were in use worldwide at the end of 2024 [1]. In these missions the vehicle often differs from the one the autopilot was tuned for: a sprayer's tank empties, a delivery drone picks up or releases a parcel, gusts and ground effect act near structures, the battery voltage falls and propellers wear. Autopilots in practice still rely mainly on cascaded PID controllers with fixed gains [2], which have no explicit mechanism for tracking such changes, while adaptive and learning-based controllers that tolerate large model mismatch have rarely reached production.

This review asks which control architectures keep a multirotor stable and accurate when its mass, inertia, centre of gravity (CoG), actuator effectiveness or payload change in flight, and what real-world evidence supports them. It classifies the variations, compares autopilot practice with the research state of the art, summarises the method classes in Table 1 and identifies open problems. It covers work published from 2018 onwards and cites earlier studies only where they are foundational.

Main part. Problem taxonomy. Parametric changes keep the structure of the rigid-body model but alter its coefficients: mass (payload pickup or release, tank depletion), inertia, CoG offset, thrust per command (battery voltage) and rotor effectiveness (damaged propellers). They act mainly as a bias in the thrust-to-acceleration map or as a slowly varying moment, and can in principle be compensated by estimating a few parameters online.

Structural changes alter the model itself. A cable-suspended load adds pendulum dynamics and switches between a taut mode, in which the quadrotor–load system is

differentially flat [3], and a slack mode, in which the vehicle and the load move independently. Losing two opposing rotors makes yaw uncontrollable, so the vehicle has to be stabilised while spinning [4].

External disturbances and unmodelled aerodynamics, such as gusts, ground effect [5] and speed-dependent drag, are state-dependent and time-varying, and call for fast disturbance estimation or learned residual models.

State of practice in autopilots. PX4 uses cascaded P and PID loops with state estimates from an extended Kalman filter [6]. Its main adaptive element is a hover thrust estimator that tracks a single normalised hover-thrust value, bounded to [0.1, 0.9], and uses it as a thrust feed-forward term [7]; it therefore compensates for mass and voltage changes along the vertical axis only. ArduPilot reduces slung-payload oscillation with a Lua script that requires a second autopilot, GPS and telemetry radio on the payload, streaming its position at 10 Hz [8]. This is a hardware workaround rather than model-based anti-swing control. The FPV firmware Betaflight boosts the integral term during fast throttle changes (Anti-Gravity) and stops it accumulating during fast manoeuvres (I-term relax) [9]; both are hand-designed gain schedules. Among commercial systems, the DJI FlyCart 30 delivery drone offers a weighing function, a payload of up to 30 kg with two batteries, a 20 m winch, swing control and emergency cable cutting [10], but its algorithms are unpublished. Fielded stacks thus absorb slow biases through integral action but not abrupt mass or CoG changes, cable dynamics or rotor failures.

Classical adaptive and robust control. MRAC and L_1 adaptive control. Model reference adaptive control (MRAC) tunes controller parameters so that the closed loop follows a reference model, but fast adaptation needs high gains that cause oscillation and loss of robustness. L_1 adaptive control low-pass filters the adaptive signal, which decouples estimation speed from control bandwidth and guarantees transient bounds [11]. L_1 Quad augments a geometric controller on SE (3) with an L_1 loop, guarantees uniformly bounded transients and was tested experimentally against eleven types of uncertainty [12]. Hanover et al. cascaded nonlinear model predictive control (NMPC) with an L_1 module and reported more than 90% lower tracking error than non-adaptive NMPC under large unknown disturbances; the same controller flew racing trajectories at up to 70 km/h [13].

Incremental nonlinear dynamic inversion (INDI) computes control increments from measured angular acceleration instead of relying on a detailed model. Smeur et al. added online estimation of control effectiveness [14], and Sun et al. used INDI to stabilise a quadrotor that had lost two opposing rotors at speeds above 8 m/s in a wind tunnel [4]. It needs low-latency acceleration and rotor-speed feedback.

Disturbance observers. Disturbance-observer-based control, extended state observers and active disturbance rejection control lump all model mismatch into a total disturbance, estimate it and cancel it [15]; sliding-mode control adds robustness at the cost of chattering. These methods are cheap, but the observer bandwidth trades estimation speed against noise sensitivity. Model predictive control can embed such estimates in its prediction model but needs an accurate model and usually a companion computer.

Learning-based approaches. Learned residual models keep a physics model and learn only its error. Neural Lander used a spectrally normalised network to model ground-effect forces, and its Lipschitz bound allowed a stability proof [5]. Gaussian-process residual models inside MPC reduced tracking error by up to 70% at speeds of up to 14 m/s [16].

Meta-learning. Neural-Fly learns wind-invariant aerodynamic basis functions offline from 12 minutes of flight data and adapts only their linear coefficients online [17]. In winds of up to 12.1 m/s it tracked trajectories with substantially smaller error than state-of-the-art nonlinear and adaptive controllers, with exponential stability guarantees.

Latent adaptation. Zhang et al. trained a low-level policy that infers a latent vector of system parameters from recent states and actions [18]. On real quadcopters it handled mass differences of 3.7 times, propeller constants varying by more than 100 times, off-centre payloads and motor failures.

Reinforcement learning (RL) at the *limit*. Swift beat world-champion FPV pilots by combining RL in simulation with residual models identified from real data [19]. Song et al. argued that RL outperforms optimal control because it optimises a better objective, and their policy reached accelerations above 12 g [20]. However, Kunapuli et al. showed that many such comparisons give RL unequal access to the objective, tuning data and feed-forward information. Under a levelled protocol, geometric control matched or beat RL in most practical settings, while RL had better transients at the cost of steady-state error [21].

Suspended payloads. A cable-slung load is the hardest case because it changes the model structure. Beyond the flat taut-cable model [3], Belkhale et al. used model-based meta-RL to learn the dynamics of an unknown suspended payload within seconds of flight data collected after it was attached [22]. RoVerFly, still a preprint, trains a single RL policy that acts as an implicit hybrid controller across no-payload, slack and taut configurations without switching controllers [23].

Evaluation practice. GPU-parallel simulators such as OmniDrones [24] and Aerial Gym [25] allow payload and aerodynamic parameters to be randomised across thousands of environments. Studies should report transient and steady-state tracking error separately, recovery time after a step change in mass or CoG, success rate inside and outside the training distribution, swing angle for slung loads and onboard computational cost, and should give all compared controllers the same objective, tuning data and feed-forward information [21].

As Table 1 shows, formal guarantees come mostly from model-based structure, while breadth of adaptation comes mostly from learning. The strongest results combine the two: an L_1 layer around NMPC [13], learned features inside an adaptive law [17] or learned residuals behind a Lipschitz bound [5].

Open problems and future directions

Safety of learned controllers. RL policies have no stability certificates outside their training distribution, which motivates safety filters, certified fallback controllers and designs that confine learning to features or residuals [5, 17].

Onboard compute. Flight-controller microcontrollers need small, low-latency networks rather than companion computers. Comparative analysis.

Table 1 – Comparison of adaptive and learning-based control classes for multirotor UAVs

Method class	Adaptation speed	Model requirement	Onboard compute	Guarantees	Real-world evidence
Fixed-gain PID + hover-thrust estimate	Slow (integrator, one scalar)	Minimal	Very low (microcontroller)	Local robustness only	Standard in fielded systems [6, 7, 9]
MRAC / L_1 augmentation	Fast (L_1 : decoupled from bandwidth)	Nominal model	Low	Lyapunov stability; L_1 : bounded transients	Payloads, damaged propellers [12, 13]
INDI	Very fast (sensor-based)	Control effectiveness only	Low; needs acceleration sensing	Local, under sensing assumptions	Two-rotor loss at high speed [4, 14]
DOBC / ESO / ADRC / SMC	Fast	Nominal model	Low	Bounded error for bounded disturbance	Widely used in motion control [15]
Learned residual models (NN, GP-MPC)	Learned offline	Model + flight data	Low to medium–high (MPC)	Lipschitz-based (Neural Lander)	Ground effect, high speed [5, 16]
Meta-learned features + adaptive law	Fast (seconds)	Model + multi-condition data	Low–medium	Exponential stability	Winds up to 12.1 m/s [17]
RL (latent adaptation, domain randomisation)	Fast (history-based) or implicit	Randomised simulator	Medium	None formal	3.7× mass; racing at the limit [18–20]
Slung-load control (flatness, meta-RL, RL)	Moderate to fast	Cable model or randomised simulator	Medium–high	Flatness-based (taut cable)	Unknown payloads [22]; preprint [23]

Benchmarks. The field needs shared scenarios, such as step mass changes, CoG shifts, rotor degradation and slack–taut transitions, evaluated against levelled baselines [21].

Integration. The shortest path to impact is to add L_1 or disturbance-observer layers, or a full mass and CoG estimator, to PX4 and ArduPilot.

Link to FPV navigation. For the author's dissertation on deep RL for autonomous FPV navigation and collision avoidance, a navigation policy trained under randomised payload and battery conditions and paired with an adaptive inner loop [18] could keep FPV-class agility when the drone carries sensors or cargo.

Conclusion. Fielded autopilots handle slow payload changes through fixed-gain PID, integral action and a single hover-thrust estimate, but not abrupt mass or CoG changes, rotor faults or suspended loads. Proven alternatives exist: L_1 and INDI control, adaptive and learned-residual MPC, meta-learned adaptive laws and RL-based

latent adaptation. The most deployable near-term architecture is hybrid: a certified nominal controller, a fast adaptive layer, and learning confined to well-bounded roles.

REFERENCES

- 1 DJI Agriculture. DJI Agriculture's annual report reveals drone-powered farming revolution at Brazil's Agrishow 2025. – 30.04.2025. – URL: <https://www.dji.com/media-center/announcements/dji-agricultural-annual-report-2025/> ./ (дата обращения 15.09.2026).
- 2 Lopez-Sanchez I., Moreno-Valenzuela J. PID control of quadrotor UAVs: A survey // Annual Reviews in Control – 2023. – Vol. 56. Art. 100900. – DOI: 10.1016/j.arcontrol.2023.100900.
- 3 Sreenath K., Lee T., Kumar V. Geometric control and differential flatness of a quadrotor UAV with a cable-suspended load // Proc. 52nd IEEE Conference on Decision and Control (CDC) – 2013. – P.2269-2274. – DOI: 10.1109/CDC.2013.6760219.
- 4 Sun S., Wang X., Chu Q., de Visser C. Incremental nonlinear fault-tolerant control of a quadrotor with complete loss of two opposing rotors // IEEE Transactions on Robotics – 2021. – Vol. 37, No. 1. – P.116-130. – DOI: 10.1109/TRO.2020.3010626.
- 5 Shi G., Shi X., O'Connell M., Yu R., Azizzadenesheli K., Anandkumar A., Yue Y., Chung S.-J. Neural Lander: Stable drone landing control using learned dynamics // Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) – 2019. – P. 9784-9790. – DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794351.
- 6 PX4 Autopilot. Controller diagrams // PX4 Guide. – URL: https://docs.px4.io/main/en/flight_stack/controller_diagrams/ (дата обращения 15.09.2026).
- 7 PX4 Autopilot. HoverThrustEstimate (uORB message) // PX4 Guide – URL: https://docs.px4.io/main/en/msg_docs/HoverThrustEstimate. ./ (дата обращения 15.09.2026).
- 8 ArduPilot Dev Team. Slung payload // Copter documentation – URL: <https://ardupilot.org/copter/docs/slung-payload.html> ./ (дата обращения 15.09.2026).
- 9 Betaflight. Freestyle tuning principles // Betaflight documentation – URL: <https://betaflight.com/docs/wiki/guides/current/Freestyle-Tuning-Principles/> (дата обращения 15.09.2026).
- 10 DJI. Support for DJI FlyCart 30 – URL: <https://www.dji.com/support/product/flycart-30/> (дата обращения 15.09.2026).
- 11 Hovakimyan N., Cao C. L_1 adaptive control theory: Guaranteed robustness with fast adaptation – Philadelphia: SIAM – 2010. – P. 367.
- 12 Wu Z., Cheng S., Zhao P., Gahlawat A., Ackerman K.A., Lakshmanan A., Yang C., Yu J., Hovakimyan N. L_1 Quad: L_1 adaptive augmentation of geometric control for agile quadrotors with performance guarantees // IEEE Transactions on Control Systems Technology – 2025. – Vol. 33, No. 2. – P.597–612. – DOI: 10.1109/TCST.2024.3521182.

- 13 Hanover D., Foehn P., Sun S., Kaufmann E., Scaramuzza D. Performance, precision, and payloads: Adaptive nonlinear MPC for quadrotors // *IEEE Robotics and Automation Letters* – 2022. – Vol. 7, No. 2. – P.690-697. – DOI: 10.1109/LRA.2021.3131690.
- 14 Smeur E.J.J., Chu Q., de Croon G.C.H.E. Adaptive incremental nonlinear dynamic inversion for attitude control of micro air vehicles // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* – 2016. – Vol. 39, No. 3. – P. 450-461. – DOI: 10.2514/1.G001490.
- 15 Chen W.-H., Yang J., Guo L., Li S. Disturbance-observer-based control and related methods – An overview // *IEEE Transactions on Industrial Electronics* – 2016. – Vol. 63, No. 2. – P. 1083-1095. – DOI: 10.1109/TIE.2015.2478397.
- 16 Torrente G., Kaufmann E., Foehn P., Scaramuzza D. Data-driven MPC for quadrotors // *IEEE Robotics and Automation Letters* – 2021. – Vol. 6, No. 2. – P. 3769-3776. – DOI: 10.1109/LRA.2021.3061307.
- 17 O'Connell M., Shi G., Shi X., Azizzadenesheli K., Anandkumar A., Yue Y., Chung S.-J. Neural-Fly enables rapid learning for agile flight in strong winds // *Science Robotics*. – 2022. – Vol. 7, No. 66. Art. eabm6597. – DOI: 10.1126/scirobotics.abm6597.
- 18 Zhang D., Loquercio A., Tang J., Wang T.-H., Malik J., Mueller M.W. A learning-based quadcopter controller with extreme adaptation // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2025. – Vol. 41. – P. 3948-3964. – DOI: 10.1109/TRO.2025.3577037.
- 19 Kaufmann E., Bauersfeld L., Loquercio A., Müller M., Koltun V., Scaramuzza D. Champion-level drone racing using deep reinforcement learning // *Nature* – 2023. – Vol. 620, No. 7976. – P.982-987. – DOI: 10.1038/s41586-023-06419-4.
- 20 Song Y., Romero A., Müller M., Koltun V., Scaramuzza D. Reaching the limit in autonomous racing: Optimal control versus reinforcement learning // *Science Robotics* – 2023. – Vol. 8, No. 82. Art. eadg1462. – DOI: 10.1126/scirobotics.adg1462.
- 21 Kunapuli P., Welde J., Jayaraman D., Kumar V. Leveling the playing field: Carefully comparing classical and learned controllers for quadrotor trajectory tracking // *Robotics: Science and Systems XXI* – 2025. – arXiv:2506.17832.
- 22 Belkhale S., Li R., Kahn G., McAllister R., Calandra R., Levine S. Model-based meta-reinforcement learning for flight with suspended payloads // *IEEE Robotics and Automation Letters* – 2021. – Vol. 6, No. 2. – P.1471-1478. – DOI: 10.1109/LRA.2021.3057046.
- 23 Kim M., Cai J., Sreenath K. RoVerFly: Robust and versatile implicit hybrid control of quadrotor-payload systems [Preprint] // *arXiv* – 2025. – arXiv:2509.11149.
- 24 Xu B., Gao F., Yu C., Zhang R., Wu Y., Wang Y. OmniDrones: An efficient and flexible platform for reinforcement learning in drone control // *IEEE Robotics and Automation Letters* – 2024. – Vol. 9, No. 3. – P.2838-2844. – DOI: 10.1109/LRA.2024.3356168.
- 25 Kulkarni M., Rehberg W., Alexis K. Aerial Gym Simulator: A framework for highly parallelized simulation of aerial robots // *IEEE Robotics and Automation Letters* – 2025. – Vol. 10, No. 4. P. 4093–4100. – DOI: 10.1109/LRA.2025.3548507.

ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

Шандронов Д.Н.

соруководитель научного проекта,
доктор философии (PhD), полковник

Уважаемые участники Межведомственной научно-практической конференции!

Подходит к завершению наша совместная работа на Межведомственной научно-практической конференции «Создание инновационного комплексного продукта в дроновой индустрии с использованием передовых технологий искусственного интеллекта».

Искренне благодарю всех участников конференции за плодотворное взаимодействие нашего научного сообщества и обсуждение перспектив его развития в этой стратегической отрасли.

Уверен, что детальное рассмотрение актуальных вопросов реализации государственной политики в сфере беспилотных систем, обеспечения опережающего развития ИИ-технологий, а также координации общих усилий по разработке и производству отечественных БПЛА в Республике Казахстан внесет существенный вклад не только в формирование современного, высокотехнологичного облика наших Вооруженных сил, но и даст мощный импульс развитию прикладных научных исследований.

Нам необходимо принять резолюцию по итогам проведения конференции, в которую предлагается включить следующие пункты:

– отметить актуальность и ценность выполненных исследований в рамках программно-целевого финансирования на 2024-2026 годы по теме ИРН BR 249015/0224 «Создание инновационного комплексного продукта в дроновой индустрии с использованием передовых технологий искусственного интеллекта»;

– редакционной коллегии подготовить к изданию сборник статей с докладами участников конференции.

Предлагаю данный проект резолюции утвердить общим собранием участников конференции.

В завершении, хочу пожелать всем участникам конференции дальнейших научных достижений и творческих успехов.

Благодарю всех за дружную и плодотворную работу на межведомственной научно-практической конференции!

До новых встреч!

СОДЕРЖАНИЕ

Байсеитов Г.Н. Приветственное слово к участникам конференции.....	3
Ахметов К.Р. Цифровая эмпатия в человекоцентричных интеллектуальных беспилотных системах: роль искусственного интеллекта во взаимодействии оператора и автономного агента.....	5
Әбдуәлім Ә.Т. Интеграция технологий искусственного интеллекта в комплексные беспилотные системы обеспечения безопасности охраняемых объектов и лиц.....	11
Бекишев Е.Ж. Зарубежный опыт подготовки военных специалистов в области беспилотных авиационных систем.....	21
Гревцов А.В., Тойбазаров Д.О., Зверев Н.Н., Калипанов М.М., Кажипбаев К.С. Исследование аппаратуры передачи данных лёгкого беспилотного летательного аппарата с учётом характеристик радиоканала.....	28
Джакупов К.М. Формирование облика инновационного комплексного продукта в дроновой индустрии на основе технологий искусственного интеллекта.....	38
Джусупбеков Т.Х., Колумбетов Б.Д., Балкишев К.Т. Технология интеграция боевой части противотанкового управляемого ракетного комплекса 9м14 на беспилотные летательные аппараты.....	45
Джусупбеков Т.Х., Куандыков А.А., Каширбеков А.О. Обоснование концепции многофункционального беспилотного летательного аппарата трансформируемой конструкции.....	50
Естемесов А.Б. От дрона к автономному интеллектуальному агенту: роль генеративного ИИ и больших языковых моделей в развитии беспилотных систем.....	56
Есетов А. Д., Құлжанбаев С.Т. Влияние ошибок классификации LOS/NLOS на точность INS/UWB-навигации малоразмерного БПЛА при различных траекториях движения и конфигурациях радиомаяков.....	62
Жумадиллаева А.К., Негутаров А.М., Сайфулин Р.В. Метод ALLIC коррекции слабоосвещённых изображений как ИИ-компонент предобработки видеопотока для детекции объектов в дроновых системах.....	73
Жакин А.Е., Ундаганов Б.Ж. Озық жасанды интеллект технологияларын пайдалана отырып, дрон индустриясында инновациялық кешенді өнімді тыл бөлімшесінде жасау.....	80
Железнова И.О. От виртуальной среды к физической лаборатории: Duckietown в подготовке специалистов по ИИ и автономным системам.....	86
Зверев Н.Н. Многокритериальный выбор архитектуры EDGE AI для беспилотных авиационных систем с учетом условий применения в Республике Казахстан.....	93
Зверев Н.Н., Тойбазаров Д.О., Гревцов А.В., Калипанов М.М., Кажипбаев К. С. Интеллектуальное управление БПЛА-ретранслятором для повышения доступности сети УКВ радиосвязи.....	103
Захаров И.А., Альменбаев М.М., Кусайнов А.Б. Разработка инновационного метода к мониторингу и прогнозированию лесных пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов.....	119
Истимесов М.Б. Работа исполнительного устройства по радио и радиорелейным и электро - проводным, каналам связи.....	123
Кажипбаев К. С. Разработка программно-аппаратного комплекса «Барс-Рой» на основе технологий искусственного интеллекта для противодействия роевым атакам беспилотных летательных аппаратов.....	130
Кутпанова З. А., Сагнаева С.К., Игнатьев Д.И. Анализ современных методов управления группой беспилотных летательных аппаратов.....	147
Мырзабеков К.М., Ораз Ф.Б., Кеңес Д.Н., Фазылова А.Р. Классификация подповерхностных объектов методом георадарного зондирования для обнаружения наземных мин с применением алгоритмов машинного обучения.....	160

Мырзагалиев К.Т. Применение беспилотных летательных аппаратов в качестве ретрансляторов связи: обзор и перспективы.....	171
Мустафаев М.Н., Чистяков Н.Ф. Роль вестибулярного аппарата в подготовке операторов беспилотных авиационных систем.....	177
Мустафаев М.Н. Техническое регулирование тяжелых беспилотных систем в Республике Казахстан: анализ пробелов и адаптация стандартов НАТО.....	184
Оразалы А.Н. Адам – жасанды интеллект өзара әрекеттесуінің психологиялық ерекшеліктері.....	191
Рамаданов Ж.Н. Искусственный интеллект в групповом применении беспилотных летательных аппаратов для мониторинга государственной границы.....	198
Салимжанов Р.А. Возможности интеграции привязных БПЛА в систему управления артиллерийскими подразделениями.....	207
Серікхан С.С., Грищенко В.Ф., Мукушев А.А., Исабаев К.Ж. Обзор исследований по разработке методов и средств радиоэлектронного противодействия низкоорбитальным спутниковым системам связи: современное состояние и перспективы.....	225
Саурбаев Т.К., Кемалов Б.К. Мониторинг и прогнозирование информационных угроз в условиях цифровизации вооруженных конфликтов: современное состояние и направления развития.....	234
Саурбаев Т.К., Бельгибеков Н.А. Предиктивная аналитика и технологии искусственного интеллекта в системе психологического обеспечения военнослужащих: зарубежный опыт и современные тенденции.....	242
Семченко А.Г., Шандронов Д.Н., Кутпанова З.А., Рамазанов Н.К. От отдельных технологий к комплексной беспилотной системе: результаты системного исследования	249
Умбетов Р.Ж. Концепция беспилотного надводного комплекса интеллектуального мониторинга и обеспечения безопасности прибрежной акватории.....	264
Хитматов А.М. Концептуальная модель интеллектуально-биологического комплекса «собака-искусственный интеллект» для автоматизации обнаружения малых беспилотных летательных аппаратов.....	270
Шандронов Д.Н. Об итогах создания инновационного комплексного продукта в дронной индустрии Республики Казахстан с использованием передовых технологий искусственного интеллекта.....	279
Якуба Н.С. Интеллектуальные беспилотные авиационные системы в охране государственной границы: направления применения и подготовка специалистов.....	289
Dossymbekov A., Kutpanova Z., Biloshchytska S. UAV-based fire and smoke detection with deep learning: review and experimental comparison.....	300
Khambarov A., Kutpanova Z., Biloshchytska S. Adaptive flight control of multirotor UAVS under payload variation and external disturbances: from classical adaptive methods to learning-based control.....	310
Шандронов Д.Н. Заключительное слово	316

**СОЗДАНИЕ ИННОВАЦИОННОГО КОМПЛЕКСНОГО
ПРОДУКТА В ДРОНОВОЙ ИНДУСТРИИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Сборник межведомственной научно-практической конференции
((в рамках программно-целевого финансирования на 2024-2026 гг.))
ИРН BR 249015/0224

Редакционно-издательское отделение
ТОО «R&D центр «Казахстан инжиниринг»