

УДК 517.977:629.735:629.783

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Б. Р. Андриевский, А. М. Попов, В. А. Михайлов, Ф. А. Попов**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

**Аннотация.** Методы искусственного интеллекта активно развиваются и широко применяются в различных областях техники, промышленного производства, безопасности, обработки информации, лингвистики, научных исследований и т. д. Технологии искусственного интеллекта являются определяющим направлением в задаче создания современных систем управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Характерные признаки интеллектуальной системы: наличие целевой установки; возможность управления ресурсами системы для построения стратегии достижения цели; обратная связь для контроля результатов своих действий. Представлен обзор следующих применений искусственного интеллекта: планирование миссий БПЛА; для БПЛА, занятых в гражданском строительстве и сельском хозяйстве, космических системах; планирование траекторий БПЛА; обеспечение надежности и автономности БПЛА; для реализации бортовых систем управления, вычислительных аспектов управления БПЛА и их группами, включая организацию связи между ними.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, БПЛА, гражданское строительство, сельское хозяйство, космические системы, планирование траекторий, надежность, автономность, бортовое управление, вычисления, связь, образование.

**Для цитирования:** Андриевский Б. Р., Попов А. М., Михайлов В. А., Попов Ф. А. Применение методов искусственного интеллекта для управления полетом беспилотных летательных аппаратов // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. Т. 1. № 2. С. 72–107.

---

## APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR UAV FLIGHT CONTROL

**B. R. Andrievsky, A. M. Popov, V. A. Mikhailov, F. A. Popov**

*Baltic State Technical University “VOENMEH”,  
Saint Petersburg, Russian Federation*

**Abstract.** Artificial intelligence methods have been actively developed in recent decades and are widely used in various fields of technology, industrial production, security, information processing, linguistics, scientific research, and many others. Currently, AI technology is the defining direction in the task of creating modern UAV control systems. Characteristic features of an intelligent system are the presence of a goal setting, the ability to manage system resources to build a strategy to achieve the goal, and feedback to control the results of their actions. This article presents an overview of such AI applications as UAV mission planning, application of AI methods for UAVs engaged in civil engineering and agriculture, space sys-

tems, UAV trajectory planning, ensuring UAV reliability and autonomy, for implementation of onboard control systems, computing aspects of UAV control and their groups, including organization of communication between them.

**Keywords:** artificial Intelligence, UAV, civil engineering, agriculture, space systems, trajectories planning, reliability, autonomy, onboard control, computations, communication, education.

**For citation:** Andrievsky B. R., Popov A. M., Mikhailov V. A., Popov F. A. Application of artificial intelligence methods for UAV flight control. *Aerospace Engineering and Technology*. 2023. Vol. 1. No. 2, pp. 72–107.

### Введение

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) – это летательный аппарат, который не имеет на борту пилота (человека-оператора); использует аэродинамические силы для обеспечения подъемной силы; может летать автономно или управляться дистанционно; может быть одноразовым или восстанавливаемым и нести гражданскую или летальную полезную нагрузку. В [1] отмечено, что БПЛА лучше подходит для «скучных, грязных или опасных» миссий, чем пилотируемый самолет. В мире наблюдается большой интерес к применению БПЛА для ряда гражданских и военных миссий: разведывательных операций; правовой охране; помощи при стихийных бедствиях; ретрансляции телекоммуникаций; пограничного наблюдения; сельскохозяйственной съемки; мониторинга линий электропередач; контроля археологических памятников и др. Такие системы предназначены для выполнения задач в условиях значительных неопределенностей в системе и среде в течение длительного времени. Отсутствие пилота в контуре БПЛА существенно усложняет использование летательного аппарата (ЛА), так как пилот позволяет исследовать, интерпретировать и реагировать на изменения в ЛА и окружающей среде. Безопасность, надежность и возможности, демонстрируемые БПЛА, требуют значительного улучшения, чтобы соответствовать пилотируемым ЛА. Они должны иметь возможность компенсировать системные сбои без внешнего вмешательства. Отсутствие человека на борту БПЛА не означает, что он не может управляться с участием человека, от которого требуется специальная подготовка и концентрация, что является для оператора утомительным процессом [2–4].

Любое развитие в научной, технической или общественной сфере происходит по спирали с выходом на более высокий уровень на следующем витке спирали («ступеньке») [5]. Такой «ступенькой» в развитии беспилотных авиационных систем является искусственный интеллект (ИИ). Искусственный интеллект характеризует способность машин, умеющих выполнять сложные задачи, и включает такие категории, как рассуждение, решение проблем, планирование, изучение, понимание и чтение человеческих языков.

Авиакосмическая отрасль – одна из самых высокотехнологичных и предъявляет повышенные требования к качеству принимаемых решений, энергоэффективности, экономичности и надежности. Поэтому привлечение в эту отрасль методов ИИ, в частности, рассматриваемых систем управления БПЛА, оказалось естественным. Как отмечено в [6], технологии ИИ являются определяющим направлением в задаче создания современных систем управления БПЛА. Необходимость использования методов ИИ в системах управления диктуется прогрессом в области средств противодействия информационным системам и неопределенностью, многозначностью возникающих ситуаций, их слабой формализацией и зависимостью от многих параметров, многовариантностью принимаемых решений в сложных динамических ситуациях. Предпосылкой для внедрения современных методов ИИ служит технический прогресс в области вычислительной техники, микроэлектронных средств и алгоритмов обработки сигналов. Использование методов ИИ повышает эффективность решения не только частных задач аппаратуры на отдельных этапах функционирования, но и эффективность сопровождения комплексов приборов на всех этапах жизненного цикла. Принципиальной предпосылкой работы БПЛА является наличие сигнала глобальной спутниковой навигации (ГСН – ГЛОНАСС, GPS), что делает его очень уязвимым и зависимым от внешних обстоятельств. При отсутствии сигнала ГСН управление положением БПЛА ухудшается или теряется. От точности управления зависит качество выполнения многих задач БПЛА. Поэтому малая скорость полета, использование грубых навигационных систем и несовершенство управления на борту существенно ограничивают возможности использования БПЛА при воздействии ветровых возмущений, параметрических возмущений, вызванных изменением условий полета и массы БПЛА. Для достижения требуемой автономности системы управления БПЛА разрабатываются на основе обычных с использованием методов из области ИИ путем добавления интеллектуальных компонентов, созданных в результате междисциплинарных исследований [1, 7]. В системе Scopus насчитывается более 700 публикаций на эту тему, и их число растет [8–23].

Охват различных аспектов, относящихся к БПЛА, от разработки до логистики и этических вопросов представлен в [24], который включает: задачи планирования миссий и маршрута; автономность БПЛА; сетевые БПЛА и их рои; интерфейсы БПЛА-человек; системы поддержки принятия решений.

## **Планирование миссий БПЛА**

В работе [14] представлена процедура для  $N$  БПЛА, чтобы совместно проводить параллельный поиск конкретных целей в географической области. Управление БПЛА децентрализовано и основывается на поведении агентов. Глобальная связь для БПЛА недоступна; они полагаются на пассивные датчики и небольшие объемы информации, которыми обмениваются в краткосрочных сеансах связи. Модель успешно продемонстрирована в основанной на агентах

среде, моделирующей поле боя. Результаты моделирования показали, что предложенная процедура поиска БПЛА на основе поведения эффективна, надежна, масштабируема и особенно хорошо подходит для многочисленных, небольших, недорогих БПЛА разового пользования.

В рамках анализа создания вооруженных сил будущего авторы [15] представили трехуровневую архитектуру автономного управления БПЛА. В [15] предложен и подробно рассмотрен алгоритм планирования миссии на основе Plan-Goal Graph (PGG). Показано его использование для успешного решения задачи планирования миссии Suppress Enemy Air Defense (SEAD) для БПЛА.

В [25] представлен обзор на основе 125 источников, где основное внимание уделяется обзору алгоритмов, решающих задачу планирования траектории движения БПЛА при динамических ограничениях в среде с препятствиями. Рассмотрена также задача нахождения траектории, минимизирующей некоторый целевой функционал. Отмечено, что в силу сложностей аналитического решения возникающей задачи вариационного исчисления все алгоритмы, используемые для решения этой задачи в трехмерном пространстве, являются приближенными. Многие из них основаны на подходе декомпозиции, при котором сначала решается задача планирования траектории, с последующим построением контура управления для следования этой траектории. Основное внимание в [26] уделено методам планирования движения в условиях неопределенности с акцентом на их применение для автономных БПЛА. Описываются основные источники неопределенности, возникающие при наведении БПЛА, и соответствующие практические методы. Показано отличие между вкладом в области робототехники и ИИ, а также в области динамических систем и средств управления.

В [27] предлагается интеллектуальный самоорганизующийся алгоритм (Intelligent Self-Organized Algorithm – ISOA) для решения задачи планирования совместной поисково-атакующей миссии для нескольких БПЛА, использующий архитектуру распределенного управления. Каждый БПЛА может решить свою локальную задачу оптимизации, а затем принять оптимальное решение для системы с несколькими БПЛА посредством обмена межагентной информацией. Для перепланировки путей в [27] предлагается метод предотвращения онлайн-угроз.

Работа [6] посвящена использованию методов ИИ для повышения эффективности использования БПЛА для систем мониторинга и управления техническими средствами судов по направлениям: информационное обеспечение выполнения полетного задания, выбор параметров зондирующих сигналов, обработка эхо-сигналов, опознание наблюдаемых объектов для повышения помехозащищенности бортовой аппаратуры, а также особенностей групповой работы БПЛА. Отмечено, что решение указанных задач выполняется в жестких временных рамках и в условиях противодействия. Для них требуется применение методов ИИ, алгоритмы которого должны эффективно работать в следующих условиях:

- постоянных изменений характеристик среды, обусловленных появлением новых типов объектов-целей и скоростных объектов, совершенствованием средств противодействия и пр.;
- увеличения скорости БПЛА, появления гиперзвуковых средств поражения, уменьшения времени на анализ ситуации и принятие решения;
- уменьшения численности экипажа на кораблях и судах вплоть до появления безэкипажных носителей БПЛА;
- невозможности предусмотреть все ситуации использования БПЛА;
- отсутствия достоверных знаний об отличительных признаках целей и технических характеристиках средств противодействия БПЛА и методиках их применения.

Благодаря развитию средств обработки информации появляется возможность формирования и использования баз знаний об объектах среды, что открывает возможность применения современных технологий ИИ в задачах, решаемых комплексами БПЛА.

В [28] изучаются проблемы, связанные с взаимодействием человека и машины в операциях роя БПЛА против роя БПЛА. Ставится задача повышения эффективности таких операций. Статья имеет справочное значение для изучения новых методов и расширения нового мышления операций противовоздушной обороны.

### **Применение БПЛА в гражданском строительстве и сельском хозяйстве**

В работе [29] продемонстрировано применение беспилотных авиационных систем и машинного обучения для осуществимой, точной и легкой оценки инвазивных трав в засушливых и полузасушливых землях. Предложена интегрированная методология для картирования растительности и инвазивных трав на засушливых землях с использованием БПЛА на примере буйволиной травы и спинафека. Представленный подход продемонстрировал уровень обнаружения 96,75 и 96,00 % для одиночного картирования буйволиной травы и спинафека соответственно. Это показывает, что сбор данных БПЛА может быть полезен для обнаружения инвазивных трав на ранних стадиях.

В работе [30] представлен обзор около 140 статей, посвященных разработке и применению винтокрылых БПЛА в гражданском строительстве. Дано подробное описание типичного БПЛА вертолетного типа с такими составляющими, как рамная конструкция, электромеханика, системы управления полетом и телеметрического управления. Автономия без вмешательства человека достижима при применении технологии управления по всей системе, использующей модельно-базовое (основанное на модели динамики БПЛА) управление, при котором динамические характеристики БПЛА представлены совокупностью обыкновенных дифференциальных уравнений, либо управление без моделей, включающее интеллектуальные методы управления: нечеткую логику, искусственные нейронные сети (ИНС) и эволюционные вычисления (или их комби-



нации). Поскольку несколько БПЛА имеют преимущества большей эффективности и операционной гибкости, по сравнению с одним, когда присутствует скоординированное поведение среди команды, отдельные транспортные средства должны иметь представление об общих целях и их отношениях с окружающей средой. Надлежащий обмен информацией по зашумленной изменяющейся во времени топологии сети называется информационным консенсусом. Для оптимизации времени полета БПЛА при ограниченной мощности требуется экономное расходование энергии или пополнение ее в процессе полета, например за счет солнечной энергии. Важным аспектом является навигация БПЛА – необходимо использовать технологии автоматической и полуавтоматической навигации. Известны два основных метода: планирование движения и картографирование. Методы планирования движений представляют собой вычислительные методы определения непрерывного маршрута транспортного средства от начального положения до конечного при избегании столкновения с известными препятствиями. В картографических методах автономный БПЛА должен построить или использовать карту, чтобы определить свое положение. Одним из самых популярных и передовых методов, используемых автономными БПЛА для создания карты в неизвестной среде, является одновременная локализация и картографирование (Simultaneous Localization and Mapping – SLAM), при котором можно обновлять карту в известной среде, отслеживая текущее местоположение. Основное преимущество БПЛА – гибкая возможность получения пространственных наблюдений в различных сценариях. Изображения являются наиболее частым выбором для приложений БПЛА, поскольку они обеспечивают полное и интуитивно понятное представление об исследуемом объекте. Известны качественный и количественный анализ на основе обработки изображений. Количественный анализ изображений БПЛА необходим для определения геометрии наблюдаемого объекта. В качественном анализе информация о спектре используется для идентификации конкретных целей на изображении и (или) для отслеживания их изменений во времени.

В [30] рассматриваются различные применения БПЛА в гражданском строительстве: оценка сейсмического риска, транспортировка возможности, реагирование на бедствия, управление строительством, геодезия и картографирование, мониторинг и оценка наводнений.

В [31] представлен широкий обзор разработок последних 10 лет для коммерческих БПЛА. В рассмотренных статьях наиболее представленными методологиями и приложениями являются: планирование пути, нейронные сети, ИИ, проверка, наблюдение, отслеживание и идентификация. Обзор [31] содержит сведения о недавно разработанных дронах с их компонентами, типами используемых контроллеров, языками программирования и применяемыми методами. Отмечено, что в будущем предстоят большие работы по гибридной воздушной робототехнике, БПЛА «воздух-земля», дронам для дальнего полета с интеллектуальными батареями и дронам вертикального взлета и посадки с высокой точностью и др. Предложены следующие направления исследований: связь с БПЛА;

динамическое планирование пути; конфиденциальность и безопасность; интеграция различных сегментов для сетевой связи между воздушными, наземными и космическими БПЛА; эффективное использование энергии для БПЛА; сочетание БПЛА и ИИ; локальное программирование БПЛА для решения многочисленных проблем в наблюдении, связи и по предотвращению столкновений. Предстоит провести значительный объем исследований в области БПЛА и воздушной робототехники.

В статье [32] представлен обзор современного состояния использования систем датчиков БПЛА (например: платформ БПЛА, внешних датчиков) и алгоритмов ИИ (в основном алгоритмы обучения под наблюдением) в приложениях точного земледелия (Precision Agriculture – PA), которое может служить для повышения урожайности сельскохозяйственных культур при одновременном снижении затрат и воздействия на окружающую среду. Отмечено, что благодаря своим уникальным преимуществам (низкая стоимость, высокое пространственно-временное разрешение, гибкость, функции автоматизации и минимальный риск при эксплуатации) системы обнаружения БПЛА широко применяются во многих гражданских приложениях, включая точное земледелие с 2010 г. Также алгоритмы ИИ привлекают все больше внимания в различных областях, поскольку они способны анализировать беспрецедентный объем/скорость/разнообразие данных. В [32] приводится систематизация существующих обзоров по использованию БПЛА, сенсорных технологий и ИИ в сельском хозяйстве, куда входят работы [33–45].

Для сельскохозяйственных приложений в [34] рассматриваются регуляризированные решения для интеллектуального земледелия, включая использование БПЛА, сочетающих в себе информационные и коммуникационные технологии, роботов, ИИ, большие данные и интернет. Изучены тенденции и области применения передовых технологий, связанных с сельскохозяйственными БПЛА, технологиями управления, оборудованием и разработками.

В [46] отмечено, что при наблюдении за сложной городской территорией с помощью роя БПЛА обычно полагаются на входные данные, не основанные на датчиках и предварительных знаниях об окружающей среде или целях. Чтобы преодолеть эти ограничения, предложена двухуровневая квазираспределенная структура управления, основанная на моделях городских кварталов для управления роем БПЛА на двух этапах наблюдения. С помощью хорошо обученной и скорректированной ИНС в низкоуровневом управлении маневрами БПЛА, для наведения на цель и предотвращения столкновений разработано несколько предварительных высокоуровневых стратегий распределения целей для совместной общей цели, основанной на синхронизации данных наблюдения за местностью.

Работа [32] посвящена поддержке точного земледелия, стратегия которого опирается на различные передовые технологии, включая системы обнаружения БПЛА и алгоритмы ИИ. Благодаря своим уникальным преимуществам – низкой стоимости, высокому пространственно-временному разрешению, гибкости,

функции автоматизации и минимизированному риску эксплуатации – системы обнаружения БПЛА с 2010 г. широко применяются во многих гражданских приложениях, включая точное земледелие. Проводится тщательный обзор недавнего использования систем обнаружения БПЛА (например: платформ БПЛА, внешних датчиков) и алгоритмов ИИ (в основном алгоритмов контролируемого обучения).

В работе [47] представлен один из сложных сценариев миссии аварийно-спасательных служб, включающий поиск и спасение раненых гражданских лиц с помощью БПЛА. На первом этапе миссии БПЛА сканируют обозначенные районы и пытаются идентифицировать раненых мирных жителей. На втором этапе предпринимается попытка доставить медикаменты и другие предметы идентифицированным жертвам.

В [48] предложена система картирования сорняков с использованием БПЛА. В точном земледелии ключевым компонентом являются точные и своевременные карты сорняков. Сверхвысокое пространственное разрешение, обеспечиваемое БПЛА, может быть вполне эффективным. Предлагаемый метод картирования сорняков разделяет изображение и дополняет спектральную информацию другими источниками информации. Кроме известных вегетационных индексов предлагается метод определения рядов посевов, а также включает в себя методы классификации для характеристики пикселей урожая, почвы и сорняков. Приведены результаты экспериментов, которые показывают, что высокая производительность может быть обеспечена использованием небольшого количества помеченных данных. Развитие этих результатов представлено в работе [49].

### Космические системы

В работах [50–52] рассматривается задача построения роя наноспутников сразу после их отделения от ракеты-носителя. Для ее решения в [50] предложено децентрализованное управление с использованием силы аэродинамического сопротивления для устранения дрейфа между спутниками. Алгоритм управления спутниками не выписан в замкнутой форме, а представлен в виде длительности постоянного управляющего воздействия в зависимости от начальных условий так, чтобы исключить линейную по времени составляющую взаимного отклонения, игнорируя колебательную. С прикладной точки зрения решение задачи управления в «форме синтеза» (по данным текущих измерений) предпочтительнее и охватывается использованным в [53, 54] способом приведения модели системы к форме Жордана.

В [55] рассматривается система из двух спутников. Как и в [50], считается, что в начальный момент времени спутники движутся в соответствии с заданными условиями отделения. Предполагается, что спутники находятся на низкой круговой околоземной орбите, и их орбитальное движение управляется изменением аэродинамической силы сопротивления поворотом относительно набегающего потока с помощью маховичной системы ориентации. Для рассматривае-



мой задачи предложено и исследовано несколько алгоритмов управления в форме обратной связи, обеспечивающих асимптотическую или частичную стабилизацию относительного расположения спутников. Результаты развиты в [56], где рассмотрен обмен навигационной информацией между спутниками. Предложена и исследована процедура адаптивного двоичного кодирования (декодирования) для передачи спутниковой навигационной информации по каналу связи с ограниченной пропускной способностью для случаев идеального и стертого каналов. Показано, что как ошибка передачи данных, так и время регулирования примерно обратно пропорциональны битовой скорости связи. Численным моделированием получено, что стирание данных в канале с вероятностью до 0,3 при высокой битовой скорости передачи данных не влияет на время регулирования.

В источнике [57] исследуется возможность достижения заданной конфигурации группировки спутников за счет децентрализованного аэродинамического управления, реализуемого за счет ориентации отражателей солнечного света относительно набегающего воздушного потока. Считается, что каждый спутник в формации оснащен отражателем солнечного света. При соответствующем освещении такое образование может быть видно с Земли и давать графические изображения на небе.

Статья [58] посвящена задаче о сближении со множеством околоземных астероидов с помощью солнечных парусов. Рассмотрена возможность и эффективность отображения времени перехода солнечных парусов из орбитальных характеристик с использованием глубоких нейронных сетей. В рассмотренном примере путем настройки параметров происходит обучение глубокой нейронной сети с пятью скрытыми слоями и 120 нейронами в каждом слое. По результатам испытаний методом Монте-Карло получено, что обученная глубокая нейронная сеть достигает отличной эффективности отображения от орбитальных характеристик до времени перехода для солнечных парусов.

Авторы [59] предложили метод управления кластером спутников с помощью набора искусственных потенциальных функций, в котором спутники могут автономно сходиться к заданному граничному диапазону, а не к набору точной конфигурации орбиты. Получены аналитические границы относительного движения через относительные элементы орбиты, используемые в качестве переменных для потенциальных функций. Чтобы избежать столкновений, в искусственную потенциальную функцию отталкивания вводится не текущая относительная дистанция между спутниками, а минимальная граница межспутникового перелета. Корректировка усилий агентами по управлению, в соответствии с ближайшими спутниками, соответствует наличию у группы спутников роевого интеллекта. Приведены результаты моделирования, показывающие превосходство предлагаемой системы по предотвращению столкновений и расходу топлива.

В [60] рассмотрена задача поддержания заданного вида формации малых спутников на околоземных круговых орбитах. С использованием и поддержа-

нием метода пассивации получены законы управления реконфигурацией спутникового строя и предложены комбинированные алгоритмы управления, включающие протокол консенсуса. Для относительного движения пары спутников на эллиптических орбитах получен алгоритм, обеспечивающий устойчивое движение ведомого спутника относительно орбиты ведущего. Показано, что результирующее управление с обратной связью по выходу обеспечивает более высокую точность, чем стандартные ПД-регулятор, а использование консенсусного протокола дополнительно повышает точность позиционирования спутников в группе.

### Планирование траекторий

В [20] представлена архитектура для скоординированного управления несколькими БПЛА и теоретико-дифференциальный подход к управлению строем и предотвращению столкновений. Иерархическая архитектура имеет верхний уровень с глобальным пониманием ситуации и групповым планированием миссий, средний уровень с локальными знаниями, управлением строем и обходом препятствий, а также нижний уровень, который взаимодействует с бортовыми базовыми контроллерами, датчиками, системами связи и вооружения. Каждый уровень состоит из нескольких взаимодействующих агентов с выделенными функциями. Задача управления строем рассматривается как игра  $N$  преследователей и  $N$  убегающих. Устойчивость формации агентов гарантируется, если эти агенты могут достичь пунктов назначения за заданное время при условии, что они обходят пункты назначения оптимальным образом.

Активно развиваются исследования по применению методов коллективного движения животных для сложных задач управления распределением в искусственных системах, таких как стая автономных БПЛА. В этом направлении, вдохновленная иерархическими стратегиями почтовых голубей, в [61] предложена структура распределенного управления БПЛА. При этом подходе сочетаются преимущества корреляции скоростей, взаимодействия лидера и ведомого и иерархической сети лидерства с алгоритмом согласованного управления высотой, используемым в стае БПЛА. Использована реалистичная модель динамики БПЛА самолетного типа (БПЛА с «неподвижным крылом») с учетом имеющихся ограничений.

В обзоре [62] обсуждаются основы, принципы работы и основные характеристики подходов, основанных на математической оптимизации и обучении к применению ИИ в автономной навигации БПЛА. Выделены характеристики, типы, навигационные модели и приложения БПЛА, обсуждаются перспективные направления исследований в области применения ИИ к навигации БПЛА. В список цитирования входят обзоры [63–73], для которых в [62] отмечена область и глубина проработки соответствующих направлений исследования. Некоторые параметры автономной навигации БПЛА задаются с помощью эвристических уравнений, потому что строгих решений в замкнутой форме не существует ли-

бо их поиск требует больших вычислительных ресурсов. Для решения этих проблем использование ИИ может быть эффективным. Также ИНС, тип техники ИИ, можно использовать для моделирования целевых функций нелинейных задач, связанных с оптимизацией или аппроксимацией. В обзоре отмечены проблемы с применением ИИ в автономной навигации: требование сокращения времени обучения, снижение вычислительной мощности и сложности, обновление информации в течение длительных периодов времени и быстрой адаптации к новым условиям.

Метод планирования траекторий БПЛА вертолетного типа, основанный на мультистратегическом алгоритме эволюционного обучения искусственной пчелиной колонии, предложен в [74]. Эволюционная структура обучения (Multi-Strategy Evolutionary Learning Mechanism – MSEL-ABC) объединяет интеллект роя и человеческий когнитивный механизм. Вероятность эволюционного поведенческого отбора обновляется за счет накопления опыта и изучения новых знаний. Приведенные [74] сравнительные результаты моделирования показали, что созданные по этому алгоритму траектории имеют лучшую экономию топлива и более безопасны, чем у других взятых для сравнения алгоритмов. Для проверки эффективности алгоритма MSEL-ABC в [74] проведено сравнение с другими существующими алгоритмами: PSO [75], ABC [76–78], IL-ABC [79], BAS-ABC [80]. Результаты подтверждают осуществимость и эффективность предложенного метода [74].

### **Обеспечение надежности и автономности БПЛА**

В работе [9] представили «надежные автономные технологии управления» (Reliable Autonomous Control Technologies – REACT) – программу, спонсируемую НАСА в рамках инициативы Revolutionary Concepts, RevCon. Цель REACT – продемонстрировать принципиально другой подход к управлению БПЛА. Эта программа направлена на разработку высоконадежных и адаптируемых воздушных транспортных средств, которые способны безопасно и прозрачно действовать в контролируемом воздушном пространстве (гражданском или военном) так же, как это делают пилотируемые самолеты. В рамках REACT намечалось проведение испытаний на самолете F-16. В области коммерческой авиации одновременно делается упор на повышении безопасности, увеличении пропускной способности и снижении затрат за счет повышения эффективности и технического обслуживания, а также уменьшения состава экипажа. Авторы [9] предложили подход к достижению этой цели, основанный на заимствованной из психологии концепции модели активного состояния (Active State Model – ASM), согласно которому система становится «активной», когда она обладает: представлением о себе, самосознанием, способностью принимать самостоятельные решения. В рамках REACT диагностические и прогностические компоненты обеспечивают транспортному средству представление о себе и самосознание. Интеллектуальное принятие решений в сочетании с исполнением и мо-

нитингом компоненты планирования предлагают возможности для дальнейшего расширения самосознания агента.

Подобные задачи и требования для автономных транспортных средств (Autonomous Vehicles – AVs) рассматриваются в [81]. Разработке алгоритмов и программного обеспечения для перепрограммируемого, скоординированного управления и контроля команд AVs посвящена работа [10], в которой область распределенного ИИ используется, чтобы позволить разработчикам создавать и тестировать группы AV, совместно выполняющих задачи разведки и наблюдения, с минимальным контролем в динамичных и неструктурированных средах. Управлению формацией группы мобильных транспортных средств посвящена и работа [19], где предлагаются почти оптимальные средства управления строем для транспортных средств, чтобы отслеживать с сохранением требуемого строя. Предложенные управления близки к оптимальным в том смысле, что расстояние до оптимального управления максимально минимизируется в замкнутой форме. Элементы управления реализуемы в режиме реального времени, глобально и экспоненциально устойчивы.

В [11] обсуждается целесообразность группового подхода к управлению БПЛА – нужно ли использовать более одного БПЛА либо несколько БПЛА, управляемых индивидуально, а не в группе. Ставится долгосрочная цель – получить систематическое понимание стратегий распределенного управления и количественную методологию для оценки производительности роев БПЛА в различных условиях.

Авторы [12] обсуждали возможности для сил морского патрулирования и разведки (MPR) ВМФ США поддерживать и развивать широкое конкурентное преимущество перед возникающими угрозами XXI в. Отмечено, что MPR должно укреплять основные возможности миссии с помощью средств разведки, рекогносцировки и наблюдения, которые поддерживают дорожную карту трансформации ВМФ под названием Sea Power 21 [82, 83]. Трансформация сил MPR будет осуществляться за счет совместного развития концепций операций, изменений в организационной структуре и инновационного применения устаревших возможностей и новых технологий, связанных с многоцелевыми морскими самолетами (Multi-mission Maritime Aircraft – MMA), БПЛА и высокоточными тренажерами. MMA в сочетании с надежными и комбинированными возможностями БПЛА может стать основой для радикальных изменений в ведении боевых действий на море.

В [21] отмечено, что из-за внедрения более сложных БПЛА в структуру вооруженных сил США когнитивная нагрузка оператора увеличивается с технической сложностью робота. Подход к сокращению количества операторов к БПЛА можно найти имитацией встречающихся в природе таких систем, как роевание. В [21] исследовали возможности сведения теории роботизированного роя к практике использования БПЛА путем определения алгоритмов роя-кандидатов, примеров их полезности для военной робототехники и проблем, связанных с программированием роя.

Авторы работы [22] представили программу DARPA/Air Force/Navy J-UCAS, направленную на демонстрацию технической осуществимости, военную полезность и эксплуатационную ценность сетевой системы высокопроизводительных БПЛА с вооружением. По мнению авторов, будущие исследования повысят возможности автономного полета, но акцент сместится с простого маневрирования на управление целенаправленным движением группы.

В [23] представили проект автономной надежной авионики как часть проекта автономной надежной авионики в рамках программы транспортных систем (Vehicle Systems Program's Autonomous Robust Avionics Project), направленный на интеллектуальное управление полетом (Intelligent Mission Management – IMM) БПЛА. Как отмечено в [23], непредвиденные научные цели, неопределенные условия и изменяющиеся требования миссии могут потребовать вмешательства человека во время полета, но возможности вмешательства оператора по многим причинам ограничены. Прорабатывается возможность перенаправлять полет в зависимости от текущих условий и целей полета сочетанием: встроенной интеллектуальной агентной архитектуры (IAA) и наземной среды совместного принятия решений (CDE).

В [1] дан обзор задач и методов автономного управления БПЛА, относящихся к публикациям до 2007 г. включительно. Представлены концепция и уровни автономного управления БПЛА, дана архитектура автономного управления для БПЛА, которая делится на уровни: исполнения, координации, организации, а также описаны ключевые технологии автономного управления БПЛА. Выделены функции автономной системы БПЛА на поле боя: планирование боевых и летных задач, мониторинг состояния здоровья, обнаружение неисправностей, диагностика, изоляция и допуск; перепланирование миссий и траекторий, автономный взлет и посадка, управление ориентацией в полете, отслеживание пути, связь с наземной станцией и другими БПЛА; способности справляться с неожиданными ситуациями и к обучению.

Статья [84] посвящена повышению уровня безопасности и эффективности посадки для десантирования группы самолетов на авианосец. В качестве решения этой задачи рассматривается оптимизация последовательности посадки. Проблема последовательности посадки группы самолетов (Sequencing Problem for Landing a Team of Aircraft – SPLTA) описывается путем введения каждой процедуры десантной миссии. Общая задача SPLTA сформулирована в [84] как задача оптимизации с целевой функцией при реалистичных ограничениях. Для ее решения предлагается алгоритм динамической последовательности с использованием метода колонии муравьев (Dynamic Sequencing Algorithm Using Ant Colony Method – DSAAC), позволяющего группе самолетов приземлиться с оптимальной последовательностью. Приведены результаты численных исследований решения задачи SPLTA с использованием метода, основанного на принципе «наименьшее количество топлива в первую очередь» (Least Fuel First Service – LFFS), метода на основе алгоритма оптимизации колонии муравьев (Ant Colony Optimization Algorithm – ACO), алгоритма статической последо-



вательности колонии муравьев (Static Sequencing Algorithm of Ant Colony – SSAAC) и DSAAC. Получено, что DSAAC работает лучше, чем другие методы, в минимизации стоимости и потребления времени посадки, а также гарантирует более высокий уровень безопасности полета и обеспечивает эффективное реагирование на динамически меняющиеся ситуации.

В [85] сообщается о разработке бионического БПЛА самолета-трансформера в качестве исследовательской модели. Для быстрого автономного преобразования и оптимизации аэродинамических характеристик БПЛА в различных миссиях и условиях полета, использованы глубокие нейронные сети и методы обучения с подкреплением. Применялся алгоритм градиента глубокой детерминированной политики (Deep Deterministic Policy Gradient – DDPG) [86], основанный на методе актер-критик без модели. После подтверждения его результативности на модельной тестовой задаче алгоритм DDPG был реализован для трансформируемой модели самолета.

Задача диагностики гиперзвукового ЛА (Hypersonic Air Vehicle – HAV) с неисправностью датчика рассмотрена в [87]. Предложен интеллектуальный алгоритм диагностики неисправностей в реальном времени для автоматического построения более точной и быстрой модели за короткое время. На основе временной сверточной сети (Temporal Convolutional Network – TCN) с оптимизацией параметров настройки с помощью усиленного элитарного генетического алгоритма (Strengthen Elitist Genetic Algorithm – SEGA) предложена так называемая автоматическая временная сверточная сеть (Auto Temporal Convolutional Network – AutoTCN). Приведены экспериментальные результаты модели HAV с управлением системой управления реакцией (Reaction Control System – RCS), смоделированной при отказе датчика. Показано, что при типичных неисправностях датчиков более 8,89 % точность диагностики неисправностей в режиме реального времени предлагаемым методом может превышать 96 %, а задержка диагностики составляет менее 0,05 с.

Задачам эксплуатации и обслуживания аэрокосмических систем посвящена работа [88], в которой представлено интегрированное управление состоянием системы (Integrated System Health Management – ISHM) – технология, которая объединяет данные датчиков и накопленную информацию о состоянии компонентов и подсистем, чтобы предоставить полезную информацию и обеспечить разумное принятие решений, касающихся эксплуатации и обслуживания аэрокосмических систем. Преимущества ISHM включают: повышение ремонтнопригодности, надежности, безопасности и производительности систем. Системы ИНММ вводят возможность прогнозирования ухудшения функциональных характеристик подсистем с достаточным временем для динамического определения того, какие действия по восстановлению или реконфигурации необходимо предпринять.

Безопасность БПЛА в полете анализируется в работе [89], где отмечено, что из-за увеличения плотности трафика возникает возможность столкновений с более чем двумя БПЛА. Проблему разрешения конфликтов с участием нескольких

БПЛА трактовали, как проблему обучения с подкреплением для нескольких агентов, предлагая алгоритм, основанный на графовых нейронных сетях (Graph Neural Networks), в котором взаимодействующие агенты могут общаться для совместной генерации маневров разрешения.

### **Бортовые системы управления БПЛА**

В работах [16–18] представлены разработки по применению ИИ для управления полетом БПЛА. Описан метод, который позволяет использовать приложение базового уровня для применения ИИ, нечеткой логики в применении к логике управления для полета БПЛА. Один из элементов полета БПЛА – автоматическое удержание высоты – уже реализован [16], и получены предварительные результаты.

В [90] исследуется задача робастной устойчивости для интервальных нейронных сетей Коэна – Гроссберга [91] с неизвестными и переменными во времени задержками. Получены новые достаточные условия, не зависящие от изменяющихся во времени задержек, гарантирующие уникальность и глобальную робастную устойчивость точки равновесия интервальных нейронных сетей Коэна – Гроссберга с изменяющимися во времени задержками.

В работе [92] представили подход к задаче управления положением БПЛА самолетного типа. Отмечено, что применение метода потенциальных полей невозможно для такого типа БПЛА, так как они имеют ограниченный радиус разворота и минимальную скорость полета, потребную для наличия подъемной силы. Чтобы БПЛА достигал скорости и курсового угла реального или виртуального лидера строя, предлагается новое асимметричное локальное потенциальное поле, управляющее БПЛА в групповом полете таким образом, чтобы его воздушная скорость и курсовой угол асимптотически стремились к воздушной скорости и курсу лидера. Это гарантирует как точность слежения за положением, так и стабильность полета каждого БПЛА и всего строя. Простота этого подхода позволяет легко реализовать его на реальных БПЛА.

В [93] разработан и продемонстрирован как моделированием, так и на основе экспериментально полученных данных, метод оценки аэродинамических параметров БПЛА при наличии возмущений и шума измерений. В основу подхода положено слияние двух основанных на ИИ методов. Один из них имитирует интеллектуальное поведение роя медоносных пчел (Artificial Bee Colony – ABC) при поиске пищи [94], другой использует адаптивную нейро-нечеткую систему (Adaptive Neuro-Fuzzy System – ANFIS) [95], которая имитирует работу единицы мозга. Показано, что такое сочетание представляет собой многообещающий новый подход к проблеме аэродинамического моделирования и оценки параметров БПЛА при наличии ошибок измерения. Демонстрирована эффективность предложенного алгоритма по сравнению со стандартными алгоритмами параметрической идентификации.

Статья [96] посвящена разработке системы обнаружения аномалий для предотвращения работы двигателя БПЛА при аномальных температурах. Рассматривается применение датчиков DS18B20. Используя обучение с подкреплением, вычислительный блок Raspberry Pi определяет, что двигатель работает ненормально. Предлагаемая система обеспечивает возможность посадки дрона, когда температура двигателя превышает автоматически сгенерированный порог.

Как отмечено в [97], дешевый приемник глобальной навигационной спутниковой системы (GNSS) имеет решающее значение для недорогой системы управления полетом квадрокоптеров. Точность позиционирования GNSS сильно снижается в городских условиях из-за многолучевого эффекта. Для смягчения его влияния в [97] предложен адаптивный фильтр Калмана для настройки ковариации шума измерений GNSS при различной точности позиционирования. Для уменьшения количества случаев неправильной классификации точности GNSS используется алгоритм нечеткой логики. В [97] сравниваются точность позиционирования предлагаемого адаптивного фильтра с обычным фильтром Калмана и коммерческой системой позиционирования для управления полетом Pixhawk 2. Результаты показали, что предложенный адаптивный фильтр Калмана может повысить точность классификации GNSS. По сравнению с бортовым решением общий результат позиционирования улучшился примерно на 50 %.

Неуправляемые колебания по крену при больших углах атаки опасны и вызывают серьезные проблемы в управлении полетом [98–101]. Статья [102] посвящена исследованию возможности применения такого метода ИИ, как «обучение с подкреплением без моделей» (Model-Free Reinforcement Learning – MFRL). В отличие от [101], модель [102] несколько упрощена: не учитывается динамика приводов элеронов. При моделировании использовались два алгоритма – «двойная отсроченная DDPG» (Twin Delayed DDPG, TD3; Deep Deterministic Policy Gradient – DDPG) и мягкий критик актера (Soft Actor Critic – SAC) для изучения способа подавления колебаний по крену ЛА. Эксперименты проводились в низкоскоростной периодической открытой аэродинамической трубе в Нанкинском университете авиации и астронавтики. Размеры испытательного участка составляли  $1,9 \times 1,5 \times 1$  м. Максимальное и минимальное значения установившейся скорости ветра составили 30 и 3 м/с соответственно. Все эксперименты проводились при скорости ветра 10 м/с. В экспериментах два алгоритма использовались для изучения политики подавления колебаний по крену модели летающего крыла, в которой в качестве эффекторов крена использовался обдув по размаху. Обученные агенты продемонстрировали в тестах «умное» поведение.

Обзор методов адаптивного управления с точки зрения перспектив машинного обучения приведен в работе [103]. В [104] отмечено, что если параметры закона управления непрерывно обновляются, то можно считать классическое адаптивное управление интеллектуальным, а такую систему пограничной с точки зрения классификации. В мехатронике и робототехнике используются раз-

личные методы и области ИИ, включая ИНС, машинное обучение, алгоритмы эволюционных вычислений и нечеткую логику. В [104] проследили развитие интеллектуальных методов управления мехатронными системами, продемонстрировав развитие методов адаптивного управления и их развитие в направлении воссоздания поведения живых организмов, используя ИИ в алгоритмах. Будущие исследования ставят задачу, называемую «обучением для обучения», когда агентам необходимо выбирать стратегии обучения и настраивать метапараметры.

Задача управления строем малых БПЛА с неподвижным крылом (Fixed-Wing – FW; иначе – БПЛА самолетного типа) рассмотрена в [105], где используется каскадное управление, при котором тяга и углы ориентации рассматриваются как промежуточные входные данные на основе разделения динамики на медленную и быструю. Работа направлена на преодоление влияния порывов ветра и атмосферной турбулентности. На основе линеаризации обратной связью, с использованием упрощенной аэродинамической модели для описания поступательной динамики БПЛА [105], получена линейная модель роя с неоднородными неопределенностями, зависящими, в частности, не только от переменного состояния, но и от управлений. Сообщается о результатах успешных полевых летных экспериментов на четырех малых БПЛА. Система управления полетом разработана на основе автопилота Pixhawk и бортового компьютера Raspberry Pi3.

Авторы [106] рассмотрели задачу децентрализованного управления строем БПЛА в условиях параметрической неопределенности. В [106] предлагается новая версия метода линеаризации обратной связью, которая используется для преобразования динамической модели БПЛА с точечной массой. В результате получается линейная модель, содержащая неизвестное значение массы БПЛА. Используя метод скоростного градиента (SG) и концепцию неявной эталонной модели (IRM), получен алгоритм адаптивного управления одиночным БПЛА с неизвестной массой. На основе алгоритма консенсуса, адаптивный алгоритм распространен на задачу децентрализованного управления формацией БПЛА.

В работе [107] сообщили о разработанной онлайн-платформе управления воздушным судном, основанной на PX4 с открытым исходным кодом. Платформа включает: алгоритмы оценки, применяющие теории ИИ для оценки положения и ориентации самолета по данным датчиков; алгоритмы управления, использующие классические регуляторы (PID), для управления положением и ориентацией; симулятор, который позволяет пользователям более безопасно и удобно интуитивно изучать свои работы.

В [108] на примере квадрокоптера представлен гибридный контроллер для стабилизации БПЛА. Методом Ньютона – Эйлера найдены уравнения движения для динамической модели квадromоторной системы с учетом эффектов аэродинамического, гироскопического, возмущений и трения. В предложенной структуре регулятора, включающей ПИД-регулятор, использован также регулятор управления активной силой (Active Force Control – AFC), для настройки кото-

рого использован ИИ в виде алгоритма итеративного обучения (Iterative Learning Algorithm – ILA). Для оценки возможности предложенной схемы управления использовано гармоническое возмущение в качестве примера внешнего возмущения. Также представлены результаты анализа чувствительности с учетом дисперсии расчетного значения инерции, неопределенности модели.

### **Организация памяти, вычислений и связи на борту БПЛА**

Авторы [8] рассматривали память с адресацией содержимого (CAMS), которая хранит как ключевые, так и ассоциативные данные. В статье представлена краткая история и руководство по CAMS, их многочисленным применениям и преимуществам, также описана архитектура и функциональность нескольких CAM-устройств MUSIC Semiconductors. Рассмотрено использование ассоциативной обработки, чтобы приспособиться к постоянному увеличению разрешения сенсора, количества спектральных полос, необходимого охвата, стремления реализовать целеуказание в реальном времени, а также потока данных и обработки изображений, необходимых для оптимальной производительности разведки и наблюдения со стороны БПЛА. Продемонстрировано использование коммерческой готовой (COTS) технологии, финансируемой DARPA и Министерством обороны США, для интеграции ассоциативной обработки на основе CAM в гетерогенную многопроцессорную систему в реальном времени для БПЛА и других платформ с ограниченным бюджетом веса, объема и мощности.

В [13] обсуждалось использование роевого поведения насекомых в сетевом программном обеспечении. Отмечено, что насекомые используют низкоуровневые правила для своих задач, когда отдельные особи выполняют разные задачи. Использование скопления в сетях может помочь в модификации коммутационного узла для маршрутизации пакетов из пробки. Также рассмотрено использование метода роевания для поиска и наблюдения в воздухе.

Представлены обзоры методов применения ИИ для новых роботизированных коммуникаций [109, 110]. В [110] систематизировали методы ИИ, которые используются для улучшения связи роботов и обеспечения адаптивности их производительности. Преимуществами использования ИИ в этой области являются координация обязанностей отдельных роботов, защита от столкновений и повышение производительности команды, ускорение процесса и упрощение работы. Дан обзор методов ИИ и связи в робототехнике; представлены интеллектуальные связь аэрокосмических роботов и роевая робототехника. Приведено обсуждение результатов в направлении создания «интернета роботизированных вещей» (Internet of Robotic Things – IoRT), относящегося к использованию ИИ в качестве метода общения между роботами и людьми через интернет – перспективной технологии, позволяющей разумным вещам общаться друг с другом и человеком.

В статье [111] представлены результаты и направления применения методов ИИ в развертывании сетей связи уровня 6G. Рассматривается интеграция ИИ



в 6G как в области приложений, так и в области архитектуры. Отмечено, что влияние ИИ проявляется во всех областях, и 6G будет постепенно использовать весь потенциал методов ИИ при постепенном развертывании. В [111] предложили архитектуру 6G с поддержкой ИИ, использующую различные технологии ИИ; обсудили различные возможные приложения, имеющие значительные улучшения по сравнению с традиционной архитектурой. Дополнительно представлен вариант использования интеллектуальной транспортной системы (Intelligent Transportation System – ITS) с поддержкой БПЛА, дан анализ возможных недостатков и проблемы реализации в таких интеллектуальных сетях и приложениях, которые можно реализовать (доработать) с их помощью.

Обзор методов глубокого обучения для обнаружения транспортных средств на изображениях с БПЛА представлен в [112]. На основе классификации выделены сходства и различия этих методов. Отмечено, что при обработке изображений с БПЛА на Земле, несмотря на большие вычислительные возможности, появляются проблемы, вызванные, например: задержкой, сложностью с обеспечением безопасности, исключением возможности своевременного реагирования. Для обработки изображений на борту БПЛА потребуются усовершенствования когнитивных алгоритмов и вычислительных систем. Потребуется новые алгоритмы компьютерного зрения, предназначенные для аэрофотосъемки. Точность обнаружения может быть значительно повышена за счет объединения информации, полученной от датчиков зрения, с той, которая получена от других датчиков, таких как радиообнаружение и определение дальности (Radio Detection and Ranging – RADAR), обнаружение света и определение дальности (Light Detection and Ranging – LIDAR), звуковая навигация и определение дальности (Sound Navigation and Ranging – SONAR).

В публикации [113] представлен обзор протоколов маршрутизации с поддержкой ИИ для сетей БПЛА, включая их тенденции, проблемы и перспективы на будущее. Рассмотрены характеристики сетей БПЛА, включая технологию БПЛА, сетевые протоколы и группы. Особое внимание уделено характеристике влияния мобильности на топологию сети, возможности подключения и показателям производительности сети. Показана важность наличия точной системы прогнозирования мобильности для более эффективного сетевого взаимодействия. Рассмотрены протоколы маршрутизации, разработанные для сетей БПЛА, особенно с поддержкой ИИ, а также модели мобильности для сетей БПЛА, инструментов моделирования и общедоступных наборов данных, а также отношения к скоплению БПЛА, которые служат для выбора правильного алгоритма для каждого сценария.

Обзор по конвергенции периферийных вычислений и ИИ для БПЛА, их возможностей и проблем представлен в [114]. Основное внимание уделяется гражданским приложениям интернета вещей (Internet of Things – IoT): системам доставки, проверке гражданской инфраструктуры, точному земледелию, поисково-спасательным операциям (Search and Rescue – SAR), действиям в качестве воздушных беспроводных базовых станций (Base Stations – BS) и световым шоу

дронов. Такие приложения и БПЛА можно сделать более эффективными за счет использования ИИ, который может оперировать с большими объемами данных, производимых группами БПЛА, которые будучи оснащенными граничными серверами могут обеспечивать сервисы для наземного пользовательского обслуживания. Также БПЛА могут выступать в роли самих пользователей и переносить задачи на пограничные серверы. Даны ссылки на обзорные статьи [39, 115–120] и в виде таблицы представлена сравнительная характеристика освещения в этих публикациях основных направлений: БПЛА; периферийные вычисления; ИИ; граничный ИИ как «возможность, которая позволяет периферийным устройствам выполнять алгоритмы ИИ»; технические проблемы систем БПЛА; роль ИИ и периферийного ИИ для каждой задачи; приложения БПЛА; проблемы реализации периферийного ИИ.

В [121] представлен обзор ключевых технологий связи БПЛА и рассмотрено текущее состояние исследований в различных аспектах, включая передачу связи между БПЛА, управление формированием связи роя БПЛА, распределение их ресурсов и интеллектуальную связь на основе алгоритмов ИИ. Исходя из обзора литературы, сделан вывод о необходимости исследований, объединяющих интеллектуальную и эффективную связь роя БПЛА, управление формированием, совместную сеть и распределение ресурсов.

### Заключение

В обзоре представлены публикации в развивающейся области научных исследований и практических разработок по применению методов и алгоритмов ИИ в различных задачах управления БПЛА. Они имеют высокую актуальность для различных гражданских и военных применений, таких как разведывательные операции, юридическая защита, помощь при стихийных бедствиях, ретрансляция телекоммуникаций, пограничное видеонаблюдение, сельскохозяйственная фотосъемка, мониторинг линий электропередач, контроль археологических памятников и др. Отсутствие пилота-человека в схеме БПЛА значительно усложняет использование ЛА, так как пилот позволяет исследовать, интерпретировать и реагировать на изменения в ЛА и окружающей среде. Безопасность, надежность и возможности, продемонстрированные БПЛА, требуют значительного улучшения, чтобы соответствовать пилотируемым самолетам.

**Благодарность.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2020-045/2).

### Библиографический список

1. Chen H. A survey of autonomous control for UAV / H. Chen, X.-M. Wang, Y. Li // International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI 2009), 7–8 November 2009, Shanghai, China. – 2009. – Vol. 2. – Pp. 267–271. – <https://doi.org/10.1109/AICI.2009.147>

2. Замятин П. А. Классификационные признаки беспилотных летательных аппаратов аэродромного базирования // Chronos. – 2020. – № 4 (43). – С. 76–84.
3. Замятин П. А. Системы управления беспилотными летательными аппаратами // Инновационная наука. – 2020. – № 4. – С. 37–42.
4. Малинина Н. В. Управления БПЛА при помощи искусственного интеллекта // Инновации. Наука. Образование. – 2021. – № 32. – С. 1408–1418.
5. Матюха С. В. Искусственный интеллект в беспилотных авиационных системах. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-bespilotnyh-aviatsionnyh-sistemah> (дата обращения: 14.03.2023).
6. Интеллектуальные информационные управляющие системы беспилотных летательных аппаратов / Ю. Ф. Подоплекин, В. В. Соловьева, С. Г. Толмачев, С. Н. Шаров // X Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика», 28 сентября – 2 октября 2021, Нижний Архыз, Россия. – 2021. – С. 91–98
7. Antsaklis P. J. An Introduction to Autonomous Control Systems / P. J. Antsaklis, K. M. Passino, S. J. Wang // 5-th IEEE International Symposium on Intelligent Control, 5–7 September 1990, Philadelphia, Pennsylvania. – IEEE, 1990. – Pp. 21–26. – <https://doi.org/10.1109/37.88585>
8. Lewis Jr. H. New generation of Content Addressable Memories for Associative Processing / Jr. H. Lewis, P. Giambalov // Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering. – 2000. – Vol. 3905. – Pp. 164–172.
9. Reliable Autonomous Control Technologies (ReACT) for uninhabited air vehicles / P. Schaefer, R. Colgren, R. Abbott [et al.] // IEEE Aerospace Conference Proceedings. – 2001. – Vol. 2. – Pp. 2677–2683. – <https://doi.org/10.1109/AERO.2001.931247>
10. Multi-level adaptation in teams of unmanned air and ground vehicles / Jr. C. Ortiz, A. Agno, P. Berry, R. Vincent // 1st UAV Conference, 20–23 May 2002, Portsmouth, Virginia. – 2002. – <https://doi.org/10.2514/6.2002-3474>
11. Control of UAV Swarms: What the bugs can teach us / P. Gaudiano, B. Shargel, E. Bona-beau, B. Clough // 2nd AIAA «Unmanned Unlimited» Conference and Workshop and Exhibit, September 2003, San Diego. – 2003. – Pp. 1–11.
12. Osborne S. Transforming Maritime Patrol and Reconnaissance / S. Osborne, B. Prindle // Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory). – 2003. – Vol. 24. – № 3. – Pp. 276–283.
13. Hughes D. Swarming: Sting Like a Bee // Aviation Week and Space Technology (New York). – 2003. – Vol. 159. – № 13. – Pp. 52–54.
14. Decentralized search by unmanned air vehicles using local communication / J. Schlecht, K. Altenburg, B. Ahmed, K. Nygard // Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence IC-AI, 23–26 June 2003, Las Vegas, Nevada, USA. – 2003. – Vol. 2. – Pp. 757–762.
15. Yu Z., Zhou R., Chen Z. Mission planning algorithm for autonomous control system of unmanned air vehicle / Yu Z., Zhou R., Chen Z. // Fifth International Symposium on Instrumentation and Control Technology, 24–27 October 2003, Beijing, China. – 2003. – Vol. 5253. – Pp. 572–576. – <https://doi.org/10.1117/12.521937>
16. Dufrene W. R. Application of artificial intelligence techniques in uninhabited aerial vehicle flight // AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference Proceedings, 12–16 October 2003, Indianapolis, IN, USA. – 2003. – Vol. 2. – Pp. 8.C.3–8.1–6. – <https://doi.org/10.1109/DASC.2003.1245901>
17. Dufrene W. R. Approach for autonomous control of unmanned aerial vehicle using intelligent agents for knowledge creation // The 23rd Digital Avionics Systems Conference (IEEE Cat. No. 04CH37576), 28–28 October 2004, Salt Lake City, UT, USA. – 2004. – Pp. 12.E.3–12.1. – <https://doi.org/10.1109/DASC.2004.1390846>
18. Dufrene W. R. AI techniques in uninhabited aerial vehicle flight // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2004. – Vol. 19. – № 8. – Pp. 8–12. – <https://doi.org/10.1109/MAES.2004.1346887>

19. Qu Z. Strategies for and analytical solutions to near-optimal formation control of nonholonomic mobile vehicles / Z. Qu, J. Wang, C. Plaisted // Collection of Technical Papers AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 16–19 August 2004, Providence, Rhode Island. – 2004. – Vol. 5. – Pp. 3468–3483. – <https://doi.org/10.2514/6.2004-5425>
20. Vachtsevanos G. An intelligent approach to coordinated control of multiple unmanned aerial vehicles / G. Vachtsevanos, L. Tang, J. Reimann // American Helicopter Society 60th Annual Forum, Baltimore, 7–10 June 2004, Baltimore, Maryland, USA. – 2004. – Vol. 2. – Pp. 2128–2136.
21. Hart D. Reducing swarming theory to practice for UAV control / D. Hart, P. Craig-Hart // IEEE Aerospace Conference Proceedings, 06–13 March 2004, Big Sky, MT, USA. – Vol. 5. – 2004. – Pp. 3050–3063. – <https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1368111>
22. Development & flight testing of an intelligent, autonomous UAV capability / A. Lucas, R. Ronnquist, P. Rechter [et al.] // AIAA 3rd «Unmanned-Unlimited» Technical Conference, Workshop, and Exhibit, 20–23 September 2004, Chicago, Illinois. – 2004. – Vol. 2. – Pp. 900–905. – <https://doi.org/10.2514/6.2004-6574>
23. Intelligent mission management for uninhabited aerial vehicles / D. Sullivan, J. Totah, S. Wegener [et al.] // Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 2–6 August 2004, Denver, CO, USA. – 2004. – Vol. 5661. – Pp. 121–131. – <https://doi.org/10.1117/12.582446>
24. Valavanis K. Handbook of unmanned aerial vehicles / K. Valavanis, G. Vachtsevanos. – Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2015. – Pp. 1–3022. – <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>
25. Goerzen C., Kong Z., Mettler B. A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance / C. Goerzen, Z. Kong, B. Mettler // Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications. – 2010. – Vol. 57. – № 1–4. – Pp. 65–100. – <https://doi.org/10.1007/s10846-009-9383-1>
26. Dadkhah N. Survey of motion planning literature in the presence of uncertainty: Considerations for UAV guidance / N. Dadkhah, B. Mettler // Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications. – 2012. – Vol. 65. – № 1–4. – Pp. 233–246. – <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9642-9>
27. Zhen Z. Cooperative search-attack mission planning for multi-UAV based on intelligent self-organized algorithm / Z. Zhen, D. Xing, C. Gao // Aerospace Science and Technology. – 2018. – Vol. 76. – Pp. 402–411. – <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.01.035>
28. The Research on the Efficiency of UAV Swarm Anti-UAV Swarm Operations / H. Ou, D. Wu, S. Wang [et al.] // Lecture Notes in Electrical Engineering. – 2022. – Vol. 800. – Pp. 341–346. – [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5963-8\\_48](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5963-8_48)
29. UAVs and machine learning revolutionising invasive grass and vegetation surveys in remote arid lands / J. Sandino, F. Gonzalez, K. Mengersen, K. Gaston // Sensors (Switzerland). – 2018. – Vol. 18. – № 2. – Pp. 605. – <https://doi.org/10.3390/s18020605>
30. A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering / P. Liu, A. Chen, Y.-N. Huang [et al.] // Smart Structures and Systems. – 2014. – Vol. 13. – № 6. – Pp. 1065–1094. – <https://doi.org/10.12989/sss.2014.13.6.1065>
31. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review / F. Ahmed, J. Mohanta, A. Keshari, P. Yadav // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2022. – Vol. 47. – № 7. – Pp. 7963–7984. – <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06738-0>
32. AI meets UAVs: A survey on AI empowered UAV perception systems for precision agriculture / J. Su, X. Zhu, S. Li, W.-H. Chen // Neurocomputing. – 2023. – Vol. 518. – Pp. 242–270. – <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.020>
33. A review of deep learning methods and applications for unmanned aerial vehicles / A. Carrio, C. Sampedro, A. Rodriguez-Ramos, P. Campoy // Journal of Sensors. – 2017. – Vol. 2017. – Pp. 1–13. – <https://doi.org/10.1155/2017/3296874>



34. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications / J. Kim, S. Kim, C. Ju, H. Son // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – Pp. 105100–105115. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932119>
35. Deep learning techniques to classify agricultural crops through UAV imagery: A review / A. Bouguettaya, H. Zarzour, A. Kechida, A. M. Taberkit // *Neural Computing and Applications*. – 2022. – Vol. 34. – № 12. – Pp. 9511–9536. – <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07104-9>
36. Unmanned Aerial Vehicles in Smart Agriculture: Applications, Requirements, and Challenges / P. K. Reddy Maddikunta, S. Hakak, M. Alazab [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. – 2021. – Vol. 21. – № 16. – Pp. 17608–17619. – <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3049471>
37. Dimosthenis C. Tsouros. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture / Dimosthenis C. Tsouros, Stamatia Bibi, Panagiotis G. Sarigiannidis // *Information*. – 2019. – Vol. 10. – № 11. – Pp. 1–26. – <https://doi.org/10.3390/info10110349>
38. Maes W. H. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture / W. H. Maes, K. Steppe // *Trends in Plant Science*. – 2019. – Vol. 24. – № 2. – Pp. 152–164. – <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
39. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges / H. Shakhathreh, A. H. Sawalmeh, A. Al-Fuqaha [et al.] // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7. – Pp. 48572–48634. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
40. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: Current status and perspectives / G. Yang, J. Liu, C. Zhao [et al.] // *Frontiers in Plant Science*. – 2017. – Vol. 8. – Pp. 1–26. – <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01111>
41. Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review / A. D. Boursianis, M. S. Papadopoulou, P. Diamantoulakis [et al.] // *Internet of Things*. – 2022. – Vol. 18. – Pp. 100187. – <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>
42. Mukherjee A. A survey of unmanned aerial sensing solutions in precision agriculture / A. Mukherjee, S. Misra, N. S. Raghuvanshi // *Journal of Network and Computer Applications*. – 2019. – Vol. 148. – Pp. 102461. – <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102461>
43. A Technical Study on UAV Characteristics for Precision Agriculture Applications and Associated Practical Challenges / N. Delavarpour, C. Koparan, J. Nowatzki [et al.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – № 6. – Pp. 1–25. – <https://doi.org/10.3390/rs13061204>
44. Yao H. Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications: A Review / H. Yao, R. Qin, X. Chen // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11. – № 12. – Pp. 1–22. – <https://doi.org/10.3390/rs11121443>
45. A review on deep learning in UAV remote sensing / L. P. Osco, J. Marcato Junior, A. P. Marques Ramos [et al.] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2021. – Vol. 102. – Pp. 102456. – <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102456>
46. Reinforcement learning based two-level control framework of UAV swarm for cooperative persistent surveillance in an unknown urban area / Y. Liu, H. Liu, Y. Tian, C. Sun // *Aerospace Science and Technology*. – 2020. – Vol. 98. – № 105671. – <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105671>
47. Doherty P. A UAV search and rescue scenario with human body detection and geolocalization / P. Doherty, P. Rudol // *AI 2007: Advances in Artificial Intelligence 20th, Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, 2–6 December 2007, Gold Coast, Australia*. – 2007. – Vol. 4830. – Pp. 1–13. – [https://doi.org/10.1007/978-3-540-76928-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76928-6_1)
48. A semi-supervised system for weed mapping in sunflower crops using unmanned aerial vehicles and a crop row detection method / M. Perez-Ortiz, J. M. Pena, P. A. Gutierrez [et al.] // *Applied Soft Computing Journal*. – 2015. – Vol. 37. – Pp. 533–544. – <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.08.027>
49. Selecting patterns and features for between and with incrop-row weed mapping using UAV-imagery / M. Perez-Ortiz, J. M. Pena, P. A. Gutierrez [et al.] // *Expert Systems with Applications*. – 2016. – Vol. 47. – Pp. 85–94. – <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.10.043>



50. Монахова У. В. Формирование роя наноспутников с помощью децентрализованного аэродинамического управления с учетом коммуникационных ограничений / У. В. Монахова, Д. С. Иванов // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2018. – № 151. – С. 1–32.
51. Monakhova U. Magnetorquers attitude control for differential aerodynamic force application to nanosatellite formation flying construction and maintenance / U. Monakhova, D. Ivanov, D. Roldugin // *Advances in the Astronautical Sciences*. – 2020. – Vol. 170. – Pp. 385–397.
52. Ivanov D. Nanosatellites swarm deployment using decentralized differential drag-based control with communicational constraints / D. Ivanov, U. Monakhova, M. Ovchinnikov // *Acta Astronautica*. – 2019. – Vol. 159. – Pp. 646–657. – <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.02.006>
53. Leonard C. Formation keeping of Spacecraft via Differential Drag // Master's thesis *Maneuvers by Differential Drag and Low Thrust Engines*, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 1986, Cambridge, MA, USA. – 2010. – Vol. 106. – Pp. 69–88.
54. Bevilacqua R. Rendezvous Maneuvers of Multiple Spacecraft by Differential Drag under J2 Perturbation / R. Bevilacqua, M. Romano // *Journal Guidance, Control and Dynamics*. – 2008. – Vol. 31. – № 6. – Pp. 1595–1607. – <https://doi.org/10.2514/6.2008-6828>
55. Андриевский Б. Р. Алгоритмы аэродинамического управления относительным движением двух спутников по околокруговой орбите / Б. Р. Андриевский, Н. В. Кузнецов, А. М. Попов // *Дифференциальные уравнения и процессы управления*. – 2020. – № 4. – URL: <https://diffjournal.spbu.ru/pdf/20402-jdecpr-andrievsky.pdf> (дата обращения: 03.02.2023).
56. Andrievsky B. Control of two satellites relative motion over the packet erasure communication channel with limited transmission rate based on adaptive coder / B. Andrievsky, A. Fradkov, E. Kudryashova // *Electronics (Switzerland)*. – 2020. – Vol. 9. – № 12. – Pp. 1–21. – <https://doi.org/10.3390/electronics9122032>
57. Writing with Sunlight: Cubesat formation control using aerodynamic forces / D. Ivanov, S. Biktimirov, K. Chernov [et al.] // 70th International Astronautical Congress (IAC), 21–25 October 2019, Washington, USA. – 2019. – Pp. 1–10.
58. Song Y. Solar-sail trajectory design for multiple near-Earth asteroid exploration based on deep neural networks / Y. Song, S. Gong // *Aerospace Science and Technology*. – 2019. – Vol. 91. – Pp. 28–40. – <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.04.056>
59. Xu Y. Bounded flight and collision avoidance control for satellite clusters using intersatellite flight bounds / Y. Xu, Z. Wang, Y. Zhang // *Aerospace Science and Technology*. – 2019. – Vol. 94. – № 105425. – <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105425>
60. Development and simulation of motion control system for small satellites formation / A. M. Popov, I. Kostin, J. Fadeeva, B. Andrievsky // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10. – No. 24. – Pp. 1–22. – <https://doi.org/10.3390/electronics10243111>
61. Luo Q. Distributed UAV flocking control based on homing pigeon hierarchical strategies / Q. Luo, H. Duan // *Aerospace Science and Technology*. – 2017. – Vol. 70. – Pp. 257–264. – <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.08.010>
62. Rezwan S. Artificial Intelligence Approaches for UAV Navigation: Recent Advances and Future Challenges / S. Rezwan, W. Choi // *IEEE Access*. – 2022. – Vol. 10. – Pp. 26320–26339. – <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157626>
63. Path planning: A 2013 survey / O. Souissi, R. Benatitallah, D. Duvivier [et al.] // *IEEE-IESM*, 28–30 October 2013, Rabat, Morocco. – 2013. – Pp. 1–8.
64. Sujit P. Unmanned Aerial Vehicle Path Following: A Survey and Analysis of Algorithms for Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicleless / P. Sujit, S. Saripalli, J. B. Sousa // *IEEE Control Systems Magazine*. – 2014. – Vol. 34. – № 1. – Pp. 42–59. – <https://doi.org/10.1109/MCS.2013.2287568>
65. Pandey P. Aerial path planning using metaheuristics: A survey / P. Pandey, A. Shukla, R. Tiwari // 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 22–24 February 2017, Coimbatore, India. – 2017. – Pp. 1–7. – <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8118040>

66. A comparative study of meta-heuristic algorithms for solving UAV path planning / S. Ghambari, J. Lepagnot, L. Vermeulen-Jourdan, L. Idoumghar // 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). – 2018. – Pp. 174–181.
67. Zhao Y. Survey on computational-intelligence based UAV path planning / Y. Zhao, Z. Zheng, Y. Liu // Knowledge-Based Systems. – 2018. – Vol. 158. – Pp. 54–64. – <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.05.033>
68. Overview of Path-Planning and Obstacle Avoidance Algorithms for UAVs: A Comparative Study / M. Radmanesh, M. Kumar, P. H. Guentert, M. Sarim // Unmanned Systems. – 2018. – Vol. 6. – Pp. 95–118. – <https://doi.org/10.1142/S2301385018400022>
69. A Survey on Machine-Learning Techniques for UAV-Based Communications / P. S. Bithas, E. T. Michailidis, N. Nomikos [et al.] // Sensors. – 2019. – Vol. 19. – № 23. – Pp. 1–39. – <https://doi.org/10.3390/s19235170>
70. Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges / A. Fotouhi, H. Qiang, M. Ding [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21. – № 4. – Pp. 3417–3442. – <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2906228>
71. A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems / M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis [et al.] // IEEE Communications Surveys & Tutorials. – 2019. – Vol. 21. – № 3. – Pp. 2334–2360. – <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>
72. Mishra D. A survey on cellular-connected UAVs: Design challenges, enabling 5G/B5G innovations, and experimental advancements / D. Mishra, E. Natalizio // Computer Networks. – 2020. – Vol. 182. – Pp. 107451. – <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107451>
73. Artificial Intelligence Aided Next Generation Networks Relying on UAVs / X. Liu, M. Chen, Y. Liu [et al.] // IEEE Wireless Communications. – 2021. – Vol. 28. – № 1. – Pp. 120–127. – <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000174>
74. Improved artificial bee colony algorithm-based path planning of unmanned autonomous helicopter using multi-strategy evolutionary learning / Z. Han, M. Chen, S. Shao, Q. Wu // Aerospace Science and Technology. – 2022. – Vol. 122. – № 107374. – <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107374>
75. Route planning for unmanned aerial vehicle (UAV) on the sea using hybrid differential evolution and quantum-behaved particle swarm optimization / Y. Fu, M. Ding, C. Zhou, H. Hu // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. – 2013. – Vol. 43. – № 6. – Pp. 1451–1465. – <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2248146>
76. Yin Z. A multiuser detector based on artificial bee colony algorithm for DS-UWB systems / Z. Yin, X. Liu, Z. Wu // The Scientific World Journal. – 2013. – Vol. 2013. – Pp. 1–8. – <https://doi.org/10.1155/2013/547656>
77. Karaboga D. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm / D. Karaboga, B. Basturk // Journal of Global Optimization. – 2007. – Vol. 39. – Iss. 3. – Pp. 459–471. – <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>
78. He C. A pseudo-label guided artificial bee colony algorithm for hyperspectral band selection / C. He, Y. Zhang, D. Gong // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12. – No. 20. – Pp. 34–56.
79. Artificial bee colony algorithm based on information learning / W.-F. Gao, L.-L. Huang, S.-Y. Liu, C. Dai // IEEE Transactions on Cybernetics. – 2015. – Vol. 45. – № 12. – Pp. 2827–2839.
80. An Improved Artificial Bee Colony Algorithm based on Beetle Antennae Search / L. Cheng, M. Yu, J. Yang, Y. Wang // 2019 Chinese Control Conference (CCC), 27–30 July 2019, Guangzhou, China. – 2019. – Pp. 2312–2316.
81. A Review on Autonomous Vehicles: Progress, Methods and Challenges / D. Parekh, N. Poddar, A. Rajpurkar [et al.] // Electronics. – 2022. – Vol. 11. – № 14. – Pp. 1–18.

82. Clark V. Sea Power 21: Projecting Decisive Joint Capabilities. – URL: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2002/october/sea-power-21-projecting-decisivejoint-capabilities> (дата обращения: 03.02.2023).
83. Burt K. Manackable Power Systems: An Assessment of Current & Future Fuel Cell Technologies. – URL: <http://www.crane.navy.mil> (дата обращения: 03.02.2023).
84. Wu Y. A sequencing model for a team of aircraft landing on the carrier / Y. Wu, L. Sun, X. Qu // *Aerospace Science and Technology*. – 2016. – Vol. 54. – Pp. 72–87.
85. Morphing control of a new bionic morphing UAV with deep reinforcement learning / D. Xu, Z. Hui, Y. Liu, G. Chen // *Aerospace Science and Technology*. – 2019. – Vol. 92. – Pp. 232–243.
86. Deterministic policy gradient algorithms / D. Silver, G. Lever, N. Heess [et al.] // *31st International Conference on Machine Learning, Beijing, China.* – 2014. – Vol. 32. – Pp. 387–395.
87. Ai S. A real-time fault diagnosis method for hypersonic air vehicle with sensor fault based on the auto temporal convolutional network / S. Ai, J. Song, G. Cai // *Aerospace Science and Technology*. – 2021. – Vol. 119. – № 107220.
88. Advances in Integrated System Health Management for mission-essential and safety-critical aerospace applications / K. Ranasinghe, R. Sabatini, A. Gardi [et al.] // *Progress in Aerospace Sciences*. – 2022. – Vol. 128. – № 100758.
89. Isufaj R. Multi-UAV Conflict Resolution with Graph Convolutional Reinforcement Learning / R. Isufaj, M. Omeri, M. Piera // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – № 2. – Pp. 1–14.
90. Zhang H. Robust stability analysis for interval Cohen-Grossberg neural networks with unknown time-varying delays / H. Zhang, Z. Wang, D. Liu // *IEEE Transactions on Neural Networks*. – 2008. – Vol. 19. – № 11. – Pp. 1942–1955.
91. Song Q. Stability analysis of Cohenen «Grossberg neural network with both time-varying and continuously distributed delays» / Q. Song, J. Cao // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2006. – Vol. 197. – № 1. – Pp. 188–203.
92. Kownacki C. Local and asymmetrical potential field approach to leader tracking problem in rigid formations of fixed-wing UAVs / C. Kownacki, L. Ambroziak // *Aerospace Science and Technology*. – 2017. – Vol. 68. – Pp. 465–474.
93. Ghosh Roy A. Aircraft parameter estimation using Hybrid Neuro Fuzzy and Artificial Bee Colony optimization (HNFABC) algorithm / A. Ghosh Roy, N. Peyada // *Aerospace Science and Technology*. – 2017. – Vol. 71. – Pp. 772–782.
94. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization (Technical report–TR06). – 2005 – Pp. 1–10.
95. Takagi T. Derivation of Fuzzy Control Rules from Human Operator's Control Actions / T. Takagi, M. Sugeno // *IFAC Proceedings Volumes Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis, 19–21 July 1983, Marseille, France.* – 1983. – Vol. 16. – № 13. – Pp. 55–60.
96. Motor anomaly detection for unmanned aerial vehicles using reinforcement learning / H. Lu, Y. Li, S. Mu [et al.] // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2018. – Vol. 5. – № 4. – Pp. 2315–2322.
97. Zhang G. Intelligent GNSS/INS integrated navigation system for a commercial UAV flight control system / G. Zhang, L.-T. Hsu // *Aerospace Science and Technology*. – 2018. – Vol. 80. – Pp. 368–380.
98. Huang R. Adaptive tracking control of uncertain switched non-linear systems with application to aircraft wing rock / R. Huang, J. Zhang, X. Zhang // *IET Control Theory & Applications*. – 2016. – Vol. 10. – № 15. – Pp. 1755–1762.
99. Dynamic rig for validation of control algorithms at high angles of attack / D. Ignatyev, M. Sidoruk, K. Kolinko, A. Khrabrov // *Journal of Aircraft*. – 2017. – Vol. 54. – № 5. – Pp. 1760–1771.
100. Cho N. Analytic solution of continuous-time algebraic Riccati equation for two-dimensional systems and its application to wing-rock regulation / N. Cho, J. Lee, Y. Kim // *2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 8–12 January 2018, Kissimmee, Florida, USA.* – 2018. – № 210039.

101. Aircraft wing rock oscillations suppression by simple adaptive control / B. Andrievsky, E. V. Kudryashova, N. V. Kuznetsov, O. A. Kuznetsova // *Aerospace Science and Technology*. – 2020. – Vol. 105. – № 106049.
102. Self-learned suppression of roll oscillations based on model-free reinforcement learning / Y. Dong, Z. Shi, K. Chen, Z. Yao // *Aerospace Science and Technology*. – 2021. – Vol. 116.
103. Annaswamy A. M. A historical perspective of adaptive control and learning / A. M. Annaswamy, A. L. Fradkov // *Annual Reviews in Control*. – 2021. – Vol. 52. – Pp. 18–41.
104. Hashemi A. A Review on the Feasibility of Artificial Intelligence in Mechatronics / A. Hashemi, M. B. Dowlatshahi // *Artificial Intelligence in Mechatronics and Civil Engineering: Bridging the Gap*. – Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. – Pp. 79–92.
105. Robust horizontal-plane formation control for small fixed-wing UAVs / J. Chen, W. Yang, Z. Shi, Y. Zhong // *Aerospace Science and Technology*. – 2022. – Vol. 131. – Pp. 107958.
106. Speed-Gradient Adaptive Control for Parametrically Uncertain UAVs in Formation / A. Popov, D. Kostygin, A. Shevchik, B. Andrievsky // *Electronics*. – 2022. – Vol. 11. – № 24. – Pp. 4187. – <https://doi.org/10.3390/electronics11244187>
107. Yu Y. An Online Aircraft Control Platform for the Online Artificial Intelligence Education / Y. Yu, F. Kang, F. Duan // *Lecture Notes in Electrical Engineering*. – 2022. – Vol. 644. – Pp. 3125–3133.
108. Abdelmaksoud S. Sensitivity Analysis of Intelligent Active Force Control Applied to a Quadrotor System / S. Abdelmaksoud, M. Mailah, A. Abdallah // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2022. – Vol. 322. – Pp. 153–163.
109. Alsamhi S. H. Artificial Intelligence Based Techniques for Emerging Robotics Communication: A Survey and Future Perspectives. – URL: <https://arxiv.org/abs/1804.09671> (дата обращения: 19.02.2023).
110. Alsamhi S. H. Survey on artificial intelligence based techniques for emerging robotic communication / S. H. Alsamhi, O. Ma, M. S. Ansari // *Telecommunication Systems*. – 2019. – Vol. 72. – № 3. – Pp. 483–503. – <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00561-z>
111. A taxonomy of AI techniques for 6G communication networks / K. Sheth, K. Patel, H. Shah [et al.] // *Computer Communications*. – 2020. – Vol. 161. – Pp. 279–303.
112. Srivastava S. A survey of deep learning techniques for vehicle detection from UAV images / S. Srivastava, S. Narayan, S. Mittal // *Journal of Systems Architecture*. – 2021. – Vol. 117. – № 11. – Pp. 1–34.
113. A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: Trends, challenges, and future outlook / A. Rovira-Sugranes, A. Razi, F. Afghah, J. Chakareski // *Ad Hoc Networks*. – 2022. – Vol. 130. – № 102790.
114. McEnroe P. A Survey on the Convergence of Edge Computing and AI for UAVs: Opportunities and Challenges / P. McEnroe, S. Wang, M. Liyanage // *IEEE Internet of Things Journal*. – 2022. – Vol. 9. – № 17. – Pp. 15435–15459.
115. Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence With Edge Computing / Z. Zhou, X. Chen, E. Li [et al.] // *Proceedings of the IEEE*. – 2019. – Vol. 107. – № 8. – Pp. 1738–1762.
116. 6G White Paper on Edge Intelligence. – URL: <https://arxiv.org/abs/2004.14850> (дата обращения: 05.03.2023).
117. UAV Enabled Mobile Edge-Computing for IoT Based on AI: A Comprehensive Review / Y. Yazid, I. Ez-Zazi, A. Guerrero-Gonzalez [et al.] // *Drones*. – 2021. – Vol. 5. – № 4. – <https://doi.org/10.3390/drones5040148>
118. Gupta R. 6G-enabled Edge Intelligence for Ultra-Reliable Low Latency Applications: Vision and Mission / R. Gupta, D. Reebadiya, S. Tanwar // *Computer Standards & Interfaces*. – 2021. – Vol. 77. – Pp. 103521.
119. Edge Intelligence: Architectures, Challenges, and Applications. – URL: <https://arxiv.org/abs/2003.12172> (дата обращения: 16.03.2023).



120. Huda S. A. Survey on computation offloading in UAV Enabled mobile edge computing / S. A. Huda, S. Moh // Journal of Network and Computer Applications. – 2022. – Vol. 201. – Pp. 103341.

121. UAV-Based Physical-Layer Intelligent Technologies for 5G-Enabled Internet of Things: A Survey / C. Wang, W. Yu, J. Lu [et al.] // Wireless Communications and Mobile Computing. – 2022. – Vol. 2022.

**Дата поступления:** 24.04.2023

**Решение о публикации:** 25.04.2023

### Контактная информация:

АНДРИЕВСКИЙ Борис Ростиславич – д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник (Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1), boris.andrievsky@gmail.com

ПОПОВ Александр Михайлович – канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник (Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1), popov\_am@voenmeh.ru

МИХАЙЛОВ Владимир Александрович – инженер (Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1), p79213038668@gmail.com

ПОПОВ Филипп Александрович – инженер (Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская ул., д. 1), filipp.popov@gmail.com

---

## References

1. Chen H., Wang X.-M., Li Y. A survey of autonomous control for UAV. International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI 2009), 7–8 November 2009. Shanghai, China, 2009. Vol. 2, pp. 267–271. <https://doi.org/10.1109/AICI.2009.147>

2. Zamyatin P. A. Klassifikatsionnyye priznaki bespilotnykh letatel'nykh apparatov aerodromnogo bazirovaniya [Classification features of airfield-based unmanned aerial vehicles]. *Chronos*. 2020. No. 4 (43), pp. 76–84. (In Russian)

3. Zamyatin P. A. Sistemy upravleniya bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Control systems for unmanned aerial vehicles]. *Innovation Science*. 2020. No. 4, pp. 37–42. (In Russian)

4. Malinina N. V. Upravleniya BPLA pri pomoshchi iskusstvennogo intellekta [UAV control using artificial intelligence]. *Innovations. Science. Education*. 2021. No. 32, pp. 1408–1418. (In Russian)

5. Matyukha S. V. Iskustvennyy intellekt v bespilotnykh aviatsionnykh sistemakh [Artificial intelligence in unmanned aerial systems].

URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/iskusstvennyy-intellekt-v-bespilotnyh-aviatsionnyh-sistemah> (accessed: March 14, 2023).



6. Podoplekin Yu. F., Solovieva V. V., Tolmachev S. G., Sharov S. N. Intellectual'nyye informatsionnyye upravlyayushchiye sistemy bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Intelligent information control systems for unmanned aerial vehicles]. X Vserossiyskaya nauchnaya konferentsiya "Sistemnyy sintez i prikladnaya sinergetika" [10th All-Russian Scientific Conference "System Synthesis and Applied Synergetics"], September 28 – October 2, 2021, Nizhny Arkhyz, Russia. 2021, pp. 91–98. (In Russian)
7. Antsaklis P. J., Passino K. M., Wang S. J. An Introduction to Autonomous Control Systems. 5-th IEEE International Symposium on Intelligent Control, 5–7 September 1990, Philadelphia, Pennsylvania. IEEE, 1990, pp. 21–26. <https://doi.org/10.1109/37.88585>
8. Lewis Jr. H., Giambalov P. New generation of Content Addressable Memories for Associative Processing. Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering. 2000. Vol. 3905, pp. 164–172.
9. Schaefer P., Colgren R., Abbott R. [et al.]. Reliable Autonomous Control Technologies (ReACT) for uninhabited air vehicles. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*. 2001. Vol. 2, pp. 2677–2683. <https://doi.org/10.1109/AERO.2001.931247>.
10. Ortiz Jr. C., Agno A., Berry P., Vincent R. Multi-level adaptation in teams of unmanned air and ground vehicles. 1st UAV Conference, 20–23 May 2002, Portsmouth, Virginia, 2002. <https://doi.org/10.2514/6.2002-3474>
11. Gaudiano P., Shargel B., Bonabeau E., Clough B. Control of UAV Swarms: What the bugs can teach us. 2nd AIAA "Unmanned Unlimited" Conference and Workshop and Exhibit, September 2003, San Diego. 2003, pp. 1–11.
12. Osborne S., Prindle B. Transforming Maritime Patrol and Reconnaissance. *Johns Hopkins APL Technical Digest (Applied Physics Laboratory)*. 2003. Vol. 24. No. 3, pp. 276–283.
13. Hughes D. Swarming: Sting Like a Bee. *Aviation Week and Space Technology (New York)*. 2003. Vol. 159. No. 13, pp. 52–54.
14. Schlecht J., Altenburg K., Ahmed B., Nygard K. Decentralized search by unmanned air vehicles using local communication. Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence IC-AI, 23–26 June 2003, Las Vegas, Nevada, USA. 2003. Vol. 2, pp. 757–762.
15. Yu Z., Zhou R., Chen Z. Mission planning algorithm for autonomous control system of unmanned air vehicle. Fifth International Symposium on Instrumentation and Control Technology, 24–27 October 2003, Beijing, China. 2003. Vol. 5253, pp. 572–576. <https://doi.org/10.1117/12.521937>
16. Dufrene W. R. Application of artificial intelligence techniques in uninhabited aerial vehicle flight. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference Proceedings, 12–16 October 2003, Indianapolis, IN, USA. 2003. Vol. 2, pp. 8.C.3–8.1–6. <https://doi.org/10.1109/DASC.2003.1245901>
17. Dufrene W. R. Approach for autonomous control of unmanned aerial vehicle using intelligent agents for knowledge creation. The 23rd Digital Avionics Systems Conference (IEEE Cat. No. 04CH37576), 28–28 October 2004, Salt Lake City, UT, USA. 2004, pp. 12.E.3–12.1. <https://doi.org/10.1109/DASC.2004.1390846>
18. Dufrene W. R. AI techniques in uninhabited aerial vehicle flight. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2004. Vol. 19. No. 8, pp. 8–12. <https://doi.org/10.1109/MAES.2004.1346887>
19. Qu Z., Wang J., Plaisted C. Strategies for and analytical solutions to near-optimal formation control of nonholonomic mobile vehicles. Collection of Technical Papers AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 16–19 August 2004, Providence, Rhode Island. 2004. Vol. 5, pp. 3468–3483. <https://doi.org/10.2514/6.2004-5425>
20. Vachtsevanos G., Tang L., Reimann J. An intelligent approach to coordinated control of multiple unmanned aerial vehicles. American Helicopter Society 60th Annual Forum, Baltimore, 7–10 June 2004, Baltimore, Maryland, USA. 2004. Vol. 2, pp. 2128–2136.

21. Hart D., Craig-Hart P. Reducing swarming theory to practice for UAV control. IEEE Aerospace Conference Proceedings, 06–13 March 2004, Big Sky, MT, USA. 2004. Vol. 5, pp. 3050–3063. <https://doi.org/10.1109/AERO.2004.1368111>
22. Lucas A., Ronnquist R., Rechter P. [et al.]. Development & flight testing of an intelligent, autonomous UAV capability. AIAA 3rd “Unmanned Unlimited” Technical Conference, Workshop, and Exhibit, 20–23 September 2004, Chicago, Illinois. 2004. Vol. 2, pp. 900–905. <https://doi.org/10.2514/6.2004-6574>
23. Sullivan D., Totah J., Wegener S. [et al.]. Intelligent mission management for uninhabited aerial vehicles. Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 2–6 August 2004, Denver, CO, USA. 2004. Vol. 5661, pp. 121–131. <https://doi.org/10.1117/12.582446>
24. Valavanis K., Vachtsevanos G. Handbook of unmanned aerial vehicles. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2015, pp. 1–3022. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9707-1>
25. Goerzen C., Kong Z., Mettler B. A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. 2010. Vol. 57. No. 1–4, pp. 65–100. <https://doi.org/10.1007/s10846-009-9383-1>
26. Dadkhah N., Mettler B. Survey of motion planning literature in the presence of uncertainty: Considerations for UAV guidance. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*. 2012. Vol. 65. No. 1–4. pp. 233–246. <https://doi.org/10.1007/s10846-011-9642-9>
27. Zhen Z., Xing D., Gao C. Cooperative search-attack mission planning for multi-UAV based on intelligent self-organized algorithm. *Aerospace Science and Technology*. 2018. Vol. 76, pp. 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.01.035>
28. Ou H., Wu D., Wang S. et al. The Research on the Efficiency of UAV Swarm Anti-UAV Swarm Operations. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. Vol. 800, pp. 341–346. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-5963-8\\_48](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5963-8_48)
29. Sandino J., Gonzalez F., Mengersen K., Gaston K. UAVs and machine learning revolutionising invasive grass and vegetation surveys in remote arid lands. *Sensors (Switzerland)*. 2018. Vol. 18. No. 2, pp. 605. <https://doi.org/10.3390/s18020605>
30. Liu P., Chen A., Huang Y.-N. [et al.]. A review of rotorcraft unmanned aerial vehicle (UAV) developments and applications in civil engineering. *Smart Structures and Systems*. 2014. Vol. 13. No. 6, pp. 1065–1094. <https://doi.org/10.12989/sss.2014.13.6.1065>
31. Ahmed F., Mohanta J., Keshari A., Yadav P. Recent Advances in Unmanned Aerial Vehicles: A Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2022. Vol. 47. No. 7, pp. 7963–7984. <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06738-0>
32. Su J., Zhu X., Li S., Chen W.-H. AI meets UAVs: A survey on AI empowered UAV perception systems for precision agriculture. *Neurocomputing*. 2023. Vol. 518, pp. 242–270. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.11.020>
33. Carrio A., Sampedro C., Rodriguez-Ramos A., Campoy P. A review of deep learning methods and applications for unmanned aerial vehicles. *Journal of Sensors*. 2017. Vol. 2017, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1155/2017/3296874>
34. Kim J., Kim S., Ju C., Son H. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A review of perspective of platform, control, and applications. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7, pp. 105100–105115. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932119>
35. Bouguettaya A., Zarzour H., Kechida A., Taberkit A. M. Deep learning techniques to classify agricultural crops through UAV imagery: A review. *Neural Computing and Applications*. 2022. Vol. 34. No. 12, pp. 9511–9536. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07104-9>
36. Reddy Maddikunta P. K., Hakak S., Alazab M. [et al.]. Unmanned Aerial Vehicles in Smart Agriculture: Applications, Requirements, and Challenges. *IEEE Sensors Journal*. 2021. Vol. 21. No. 16, pp. 17608–17619. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3049471>

37. Dimosthenis C. Tsouros, Bibi Stamatia, Sarigiannidis Panagiotis G. A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information*. 2019. Vol. 10. No. 11, pp. 1–26. <https://doi.org/10.3390/info10110349>
38. Maes W. H., Steppe K. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*. 2019. Vol. 24. No. 2, pp. 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>
39. 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, pp. 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
40. Yang G., Liu J., Zhao C. et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: Current status and perspectives. *Frontiers in Plant Science*. 2017. Vol. 8, pp. 1–26. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01111>
41. Boursianis A. D., Papadopoulou M. S., Diamantoulakis P. [et al.]. Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: A comprehensive review. *Internet of Things*. 2022. Vol. 18, pp. 100187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>
42. Mukherjee A., Misra S., Raghuwanshi N. S. A survey of unmanned aerial sensing solutions in precision agriculture. *Journal of Network and Computer Applications*. 2019. Vol. 148, pp. 102461. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.102461>
43. Delavarpour N., Koparan C., Nowatzki J. [et al.]. A Technical Study on UAV Characteristics for Precision Agriculture Applications and Associated Practical Challenges. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. No. 6, pp. 1–25. <https://doi.org/10.3390/rs13061204>
44. Yao H., Qin R., Chen X. Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications: A Review. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. No. 12, pp. 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs11121443>
45. Osco L. P., Marcato Junior J., Marques Ramos A. P. [et al.]. A review on deep learning in UAV remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2021. Vol. 102, pp. 102456. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102456>
46. Liu Y., Liu H., Tian Y., Sun C. Reinforcement learning based two-level control framework of UAV swarm for cooperative persistent surveillance in an unknown urban area. *Aerospace Science and Technology*. 2020. Vol. 98. No. 105671. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105671>
47. Doherty P., Rudol P. A UAV search and rescue scenario with human body detection and geolocalization. AI 2007: Advances in Artificial Intelligence 20th, Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, 2–6 December 2007, Gold Coast, Australia. 2007. Vol. 4830, pp. 1–13. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-76928-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-76928-6_1)
48. Perez-Ortiz M., Pena J. M., Gutierrez P. A. [et al.]. A semi-supervised system for weed mapping in sunflower crops using unmanned aerial vehicles and a crop row detection method. *Applied Soft Computing Journal*. 2015. Vol. 37, pp. 533–544. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.08.027>
49. Perez-Ortiz M., Pena J. M., Gutierrez P. A. [et al.]. Selecting patterns and features for between and with incrop-row weed mapping using UAV-imagery. *Expert Systems with Applications*. 2016. Vol. 47, pp. 85–94. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.10.043>
50. Monakhova U. V., Ivanov D. S. Formirovaniye roya nanosputnikov s pomoshch'yu detsentralizovannogo aerodinamicheskogo upravleniya s uchetom kommunikatsionnykh ogranicheniy [Formation of a swarm of nanosatellites using decentralized aerodynamic control, taking into account communication restrictions]. *Keldysh Institute Preprints*. 2018. No. 151, pp. 1–32. (In Russian)
51. Monakhova U., Ivanov D., Roldugin D. Magnetorquers attitude control for differential aerodynamic force application to nanosatellite formation flying construction and maintenance. *Advances in the Astronautical Sciences*. 2020. Vol. 170, pp. 385–397.
52. Ivanov D., Monakhova U., Ovchinnikov M. Nanosatellites swarm deployment using decentralized differential drag-based control with communicational constraints. *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159, pp. 646–657. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.02.006>

53. Leonard C. Formation keeping of Spacecraft via Differential Drag. Master's thesis Maneuvers by Differential Drag and Low Thrust Engines, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 1986, Cambridge, MA, USA. 2010. Vol. 106, pp. 69–88.
54. Bevilacqua R., Romano M. Rendezvous Maneuvers of Multiple Spacecraft by Differential Drag under J2 Perturbation. *Journal Guidance, Control and Dynamics*. 2008. Vol. 31. No. 6, pp. 1595–1607. <https://doi.org/10.2514/6.2008-6828>
55. Andrievsky B. R., Kuznetsov N. V., Popov A. M. Algoritmy aerodinamicheskogo upravleniya otnositel'nyim dvizheniyem dvukh sputnikov po okolokrugovoy orbite [Algorithms for aerodynamic control of the relative motion of two satellites in a circumcircular orbit]. *Differential Equations and Control Processes*. 2020. No. 4. URL: <https://diffjournal.spbu.ru/pdf/20402-jdecp-andrievsky.pdf> (accessed: February 3, 2023).
56. Andrievsky B., Fradkov A., Kudryashova E. Control of two satellites relative motion over the packet erasure communication channel with limited transmission rate based on adaptive coder. *Electronics (Switzerland)*. 2020. Vol. 9. No. 12, pp. 1–21. <https://doi.org/10.3390/electronics9122032>
57. Ivanov D., Biktimirov S., Chernov K. et al. Writing with Sunlight: Cubesat formation control using aerodynamic forces. 70th International Astronautical Congress (IAC), 21–25 October 2019, Washington, USA. 2019, pp. 1–10.
58. Song Y., Gong S. Solar-sail trajectory design for multiple near-Earth asteroid exploration based on deep neural networks. *Aerospace Science and Technology*. 2019. Vol. 91, pp. 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.04.056>
59. Xu Y., Wang Z., Zhang Y. Bounded flight and collision avoidance control for satellite clusters using intersatellite flight bounds. *Aerospace Science and Technology*. 2019. Vol. 94. No. 105425. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105425>
60. Popov A. M., Kostin I., Fadeeva J., Andrievsky B. Development and simulation of motion control system for small satellites formation. *Electronics*. 2021. Vol. 10. No. 24, pp. 1–22. <https://doi.org/10.3390/electronics10243111>
61. Luo Q., Duan H. Distributed UAV flocking control based on homing pigeon hierarchical strategies. *Aerospace Science and Technology*. 2017. Vol. 70, pp. 257–64. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.08.010>
62. Rezwan S., Choi W. Artificial Intelligence Approaches for UAV Navigation: Recent Advances and Future Challenges. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10, pp. 26320–26339. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157626>
63. Souissi O., Benatitallah R., Duvivier D. [et al.]. Path planning: A 2013 survey. IEEE-IESM, 28–30 October 2013, Rabat, Morocco. 2013, pp. 1–8.
64. Sujit P., Saripalli S., Sousa J. B. Unmanned Aerial Vehicle Path Following: A Survey and Analysis of Algorithms for Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicleless. *IEEE Control Systems Magazine*. 2014. Vol. 34. No. 1, pp. 42–59. <https://doi.org/10.1109/MCS.2013.2287568>
65. Pandey P., Shukla A., Tiwari R. Aerial path planning using metaheuristics: A survey. 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 22–24 February 2017, Coimbatore, India. 2017, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICECCT.2017.8118040>
66. Ghambari S., Lepagnot J., Vermeulen-Jourdan L., Idoumghar L. A comparative study of meta-heuristic algorithms for solving UAV path planning. 2018 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI). 2018, pp. 174–181.
67. Zhao Y., Zheng Z., Liu Y. Survey on computational-intelligence based UAV path planning. *Knowledge-Based Systems*. 2018. Vol. 158, pp. 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2018.05.033>
68. Radmanesh M., Kumar M., Guentert P. H., Sarim M. Overview of Path-Planning and Obstacle Avoidance Algorithms for UAVs: A Comparative Study. *Unmanned Systems*. 2018. Vol. 6, pp. 95–118. <https://doi.org/10.1142/S2301385018400022>



69. Bithas P. S., Michailidis E. T., Nomikos N. [et al.]. A Survey on Machine-Learning Techniques for UAV-Based Communications. *Sensors*. 2019. Vol. 19. No. 23, pp. 1–39. <https://doi.org/10.3390/s19235170>
70. Fotouhi A., Qiang H., Ding M. [et al.]. Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21. No. 4, pp. 3417–3442. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2906228>
71. Mozaffari M., Saad W., Bennis M. [et al.]. A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21. No. 3, pp. 2334–2360. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862>
72. Mishra D., Natalizio E. A survey on cellular-connected UAVs: Design challenges, enabling 5G/B5G innovations, and experimental advancements. *Computer Networks*. 2020. Vol. 182, pp. 107451. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107451>
73. Liu X., Chen M., Liu Y. [et al.]. Artificial Intelligence Aided Next Generation Networks Relying on UAVs. *IEEE Wireless Communications*. 2021. Vol. 28. No. 1, pp. 120–127. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000174>
74. Han Z., Chen M., Shao S., Wu Q. Improved artificial bee colony algorithm-based path planning of unmanned autonomous helicopter using multi-strategy evolutionary learning. *Aerospace Science and Technology*. 2022. Vol. 122. No. 107374. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2022.107374>
75. Fu Y., Ding M., Zhou C., Hu H. Route planning for unmanned aerial vehicle (UAV) on the sea using hybrid differential evolution and quantum-behaved particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2013. Vol. 43. No. 6, pp. 1451–1465. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2248146>
76. Yin Z., Liu X., Wu Z. A multiuser detector based on artificial bee colony algorithm for DS-UWB systems. *The Scientific World Journal*. 2013. Vol. 2013, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/547656>
77. Karaboga D., Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: rtificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*. 2007. Vol. 39. Iss. 3, pp. 459–471. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>
78. He C., Zhang Y., Gong D. A pseudo-label guided artificial bee colony algorithm for hyperspectral band selection. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. No. 20, pp. 34–56.
79. Gao W.-F., Huang L.-L., Liu S.-Y., Dai C. Artificial bee colony algorithm based on information learning. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2015. Vol. 45. No. 12, pp. 2827–2839.
80. Cheng L., Yu M., Yang J., Wang Y. An Improved Artificial Bee Colony Algorithm based on Beetle Antennae Search. 2019 Chinese Control Conference (CCC), 27–30 July 2019, Guangzhou, China. 2019, pp. 2312–2316.
81. Parekh D., Poddar N., Rajpurkar A. [et al.]. A Review on Autonomous Vehicles: Progress, Methods and Challenges. *Electronics*. 2022. Vol. 11. No. 14, pp. 1–18.
82. Clark V. Sea Power 21: Projecting Decisive Joint Capabilities. URL: <https://www.usni.org/magazines/proceedings/2002/october/sea-power-21-projecting-decisivejoint-capabilities> (accessed: February 3, 2023).
83. Burt K. Manackable Power Systems: An Assessment of Current & Future Fuel Cell Technologies. URL: <http://www.crane.navy.mil> (accessed: February 3, 2023).
84. Wu Y., Sun L., Qu X. A sequencing model for a team of aircraft landing on the carrier. *Aerospace Science and Technology*. 2016. Vol. 54, pp. 72–87.
85. Xu D., Hui Z., Liu Y., Chen G. Morphing control of a new bionic morphing UAV with deep reinforcement learning. *Aerospace Science and Technology*. 2019. Vol. 92, pp. 232–243.
86. Silver D., Lever G., Heess N. [et al.]. Deterministic policy gradient algorithms. 31st International Conference on Machine Learning, Beijing, China. 2014. Vol. 32, pp. 387–395.



87. Ai S., Song J., Cai G. A real-time fault diagnosis method for hypersonic air vehicle with sensor fault based on the auto temporal convolutional network. *Aerospace Science and Technology*. 2021. Vol. 119. No. 107220.
88. Ranasinghe K., Sabatini R., Gardi A. [et al.]. Advances in Integrated System Health Management for mission-essential and safety-critical aerospace applications. *Progress in Aerospace Sciences*. 2022. Vol. 128. No. 100758.
89. Isufaj R., Omeri M., Piera M. Multi-UAV Conflict Resolution with Graph Convolutional Reinforcement Learning. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 2, pp. 1–14.
90. Zhang H., Wang Z., Liu D. Robust stability analysis for interval Cohen-Grossberg neural networks with unknown time-varying delays. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2008. Vol. 19. No. 11, pp. 1942–1955.
91. Song Q., Cao J. Stability analysis of Cohenen “Grossberg neural network with both time-varying and continuously distributed delays”. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2006. Vol. 197. No. 1, pp. 188–203.
92. Kownacki C., Ambroziak L. Local and asymmetrical potential field approach to leader tracking problem in rigid formations of fixed-wing UAVs. *Aerospace Science and Technology*. 2017. Vol. 68, pp. 465–474.
93. Ghosh Roy A., Peyada N. Aircraft parameter estimation using Hybrid Neuro Fuzzy and Artificial Bee Colony optimization (HNFABC) algorithm. *Aerospace Science and Technology*. 2017. Vol. 71, pp. 772–782.
94. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization (Technical report–TR06). 2005, pp. 1–10.
95. Takagi T., Sugeno M. Derivation of Fuzzy Control Rules from Human Operator’s Control Actions. IFAC Proceedings Volumes Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis, 19–21 July 1983, Marseille, France. 1983. Vol. 16. No. 13, pp. 55–60.
96. Lu H., Li Y., Mu S. [et al.]. Motor anomaly detection for unmanned aerial vehicles using reinforcement learning. *IEEE Internet of Things Journal*. 2018. Vol. 5. No. 4, pp. 2315–2322.
97. Zhang G., Hsu L.-T. Intelligent GNSS/INS integrated navigation system for a commercial UAV flight control system. *Aerospace Science and Technology*. 2018. Vol. 80, pp. 368–380.
98. Huang R., Zhang J., Zhang X. Adaptive tracking control of uncertain switched non-linear systems with application to aircraft wing rock. *IET Control Theory & Applications*. 2016. Vol. 10. No. 15, pp. 1755–1762.
99. Ignatyev D., Sidoryuk M., Kolinko K., Khrabrov A. Dynamic rig for validation of control algorithms at high angles of attack. *Journal of Aircraft*. 2017. Vol. 54. No. 5, pp. 1760–1771.
100. Cho N., Lee J., Kim Y. Analytic solution of continuous-time algebraic Riccati equation for two-dimensional systems and its application to wing-rock regulation. 2018 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 8–12 January 2018, Kissimmee, Florida, USA. 2018. No. 210039.
101. Andrievsky B., Kudryashova E. V., Kuznetsov N. V., Kuznetsova O. A. Aircraft wing rock oscillations suppression by simple adaptive control. *Aerospace Science and Technology*. 2020. Vol. 105. No. 106049.
102. Dong Y., Shi Z., Chen K., Yao Z. Self-learned suppression of roll oscillations based on model-free reinforcement learning. *Aerospace Science and Technology*. 2021. Vol. 116.
103. Annaswamy A. M., Fradkov A. L. A historical perspective of adaptive control and learning. *Annual Reviews in Control*. 2021. Vol. 52, pp. 18–41.
104. Hashemi A. A., Dowlatshahi M. B. Review on the Feasibility of Artificial Intelligence in Mechatronics. *Artificial Intelligence in Mechatronics and Civil Engineering: Bridging the Gap*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023, pp. 79–92.
105. Chen J., Yang W., Shi Z., Zhong Y. Robust horizontal-plane formation control for small fixed-wing UAVs. *Aerospace Science and Technology*. 2022. Vol. 131, pp. 107958.

106. Popov A., Kostygin D., Shevchik A., Andrievsky B. Speed-Gradient Adaptive Control for Parametrically Uncertain UAVs in Formation. *Electronics*. 2022. Vol. 11. No. 24, pp. 4187. <https://doi.org/10.3390/electronics11244187>
107. Yu Y., Kang F., Duan F. An Online Aircraft Control Platform for the Online Artificial Intelligence Education. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. Vol. 644, pp. 3125–3133.
108. Abdelmaksoud S., Mailah M., Abdallah A. Sensitivity Analysis of Intelligent Active Force Control Applied to a Quadrotor System. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 322, pp. 153–163.
109. Alsamhi S. H. Artificial Intelligence Based Techniques for Emerging Robotics Communication: A Survey and Future Perspectives. URL: <https://arxiv.org/abs/1804.09671> (accessed: February 19, 2023).
110. Alsamhi S. H., Ma O., Ansari M. S. Survey on artificial intelligence based techniques for emerging robotic communication. *Telecommunication Systems*. 2019. Vol. 72. No. 3, pp. 483–503. <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00561-z>
111. Sheth K., Patel K., Shah H. [et al.]. A taxonomy of AI techniques for 6G communication networks. *Computer Communications*. 2020. Vol. 161, pp. 279–303.
112. Srivastava S., Narayan S., Mittal S. A survey of deep learning techniques for vehicle detection from UAV images. *Journal of Systems Architecture*. 2021. Vol. 117. No. 11, pp. 1–34.
113. Rovira-Sugranes A., Razi A., Afghah F., Chakareski J. A review of AI-enabled routing protocols for UAV networks: Trends, challenges, and future outlook. *Ad Hoc Networks*. 2022. Vol. 130. No. 102790.
114. McEnroe P. A., Wang S., Liyanage M. Survey on the Convergence of Edge Computing and AI for UAVs: Opportunities and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*. 2022. Vol. 9. No. 17, pp. 15435–15459.
115. Zhou Z., Chen X., Li E. [et al.]. Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence With Edge Computing. *Proceedings of the IEEE*. 2019. Vol. 107. No. 8, pp. 1738–1762.
116. 6G White Paper on Edge Intelligence. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.14850> (accessed: March 5, 2023).
117. Yazid Y., Ez-Zazi I., Guerrero-Gonzalez A. [et al.]. UAV Enabled Mobile Edge-Computing for IoT Based on AI: A Comprehensive Review. *Drones*. 2021. Vol. 5. No. 4. <https://doi.org/10.3390/drones5040148>
118. Gupta R., Reebadiya D., Tanwar S. 6G-enabled Edge Intelligence for Ultra-Reliable Low Latency Applications: Vision and Mission. *Computer Standards & Interfaces*. 2021. Vol. 77, pp. 103521.
119. Edge Intelligence: Architectures, Challenges, and Applications. URL: <https://arxiv.org/abs/2003.12172> (accessed: March 16, 2023).
120. Huda S. A., Moh S. Survey on computation offloading in UAV Enabled mobile edge computing. *Journal of Network and Computer Applications*. 2022. Vol. 201, pp. 103341.
121. Wang C., Yu W., Lu J. [et al.]. UAV-Based Physical-Layer Intelligent Technologies for 5G-Enabled Internet of Things: A Survey. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. Vol. 2022.

**Date of receipt:** April 24, 2023

**Publication decision:** April 25, 2023

### Contact information:

Boris R. ANDRIEVSKY – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Research Associate (Baltic State Technical University “VOENMEH”, Russian Federation, 190005, Saint Petersburg, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya ul., 1), [boris.andrievsky@gmail.com](mailto:boris.andrievsky@gmail.com)

Alexander M. POPOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Research Associate (Baltic State Technical University “VOENMEH”, Russian Federation, 190005, Saint Petersburg, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya ul., 1), popov\_am@voenmeh.ru

Vladimir A. MIKHAILOV – Engineer (Baltic State Technical University “VOENMEH”, Russian Federation, 190005, Saint Petersburg, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya ul., 1), p79213038668@gmail.com

Filipp A. POPOV – Engineer (Baltic State Technical University “VOENMEH”, Russian Federation, 190005, Saint Petersburg, 1<sup>st</sup> Krasnoarmeyskaya ul., 1), filipp.popov@gmail.com