

Управление роем дронов при помощи искусственного интеллекта: современные подходы и перспективы

В. Н. Павлыш, С. А. Шлыков, Д. М. Зеленский

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк,
e-mail: pavlyshvn@mail.ru, dimitrizelenskiy@yandex.ru, serush02@list.ru

Аннотация

В статье рассмотрены принципы функционирования роевых систем беспилотных летательных аппаратов, основанные на децентрализованном управлении и биоинспирированных алгоритмах. Проанализирована роль искусственного интеллекта — от классических методов (алгоритмы роя частиц) до современных технологий машинного обучения, включая обучение с подкреплением. Описаны ключевые области применения роев дронов: сельское хозяйство, поиск и спасение, оборона, логистика и развлечения. Отдельное внимание уделено техническим и этическим вызовам, а также перспективам интеграции с 5G, облачными вычислениями и цифровыми двойниками.

Введение

Современный этап развития робототехники и искусственного интеллекта характеризуется стремительным переходом от управления одиночными автономными системами к координации целых коллективов устройств, действующих совместно.

Одним из наиболее перспективных направлений в этой области является управление роями дронов — группами беспилотных летательных аппаратов, способных решать сложные задачи за счёт распределённого взаимодействия и самоорганизации. Такие системы находят применение в самых разных сферах: от сельского хозяйства и логистики до поисково-спасательных операций и оборонных технологий.

Ключевым фактором, обеспечивающим эффективность функционирования роя, является использование методов искусственного интеллекта. Именно искусственный интеллект позволяет дронам адаптироваться к динамически изменяющейся среде, избегать столкновений, распределять задачи и принимать коллективные решения без постоянного вмешательства человека. При этом возникают как технические вызовы — связанные с вычислительной мощностью, связью и энергопотреблением, — так и этические вопросы, касающиеся безопасности, приватности и ответственности за действия автономных систем.

Актуальность темы обусловлена не только научным интересом, но и практической необходимостью разработки надёжных, масштабируемых и безопасных решений для управления роями дронов в реальных условиях.

Цель данного материала — рассмотреть принципы построения роевых систем, роль искусственного интеллекта в их

функционировании, основные области применения, а также существующие ограничения и перспективы дальнейшего развития.

Понятие роя дронов и его преимущества

Рой дронов представляет собой кооперативную систему множества беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), функционирующую на принципах децентрализованного управления и самоорганизации. В отличие от традиционных систем, где один оператор или центральный контроллер управляет каждым аппаратом, рой действует как единый коллективный интеллект: каждый дрон принимает локальные решения на основе ограниченной информации от соседей и собственных сенсоров, не имея глобального представления о состоянии всей системы. Такой подход вдохновлён природными аналогами — стаями птиц, косяками рыб или колониями насекомых, где сложное групповое поведение возникает из простых локальных правил взаимодействия [1].

Ключевым элементом архитектуры роя является отсутствие единой точки отказа. Это достигается за счёт распределённого принятия решений и динамического перераспределения ролей между участниками. Например, если один из дронов выходит из строя, остальные автоматически компенсируют его функции, сохраняя общую эффективность миссии. Такая устойчивость особенно важна в условиях непредсказуемой внешней среды — будь то зона стихийного бедствия или боевые действия.

Преимущества роевых систем можно систематизировать следующим образом:

– Отказоустойчивость: благодаря децентрализованной структуре, потеря отдельных агентов не приводит к коллапсу всей системы.

Алгоритмы самовосстановления позволяют рой адаптироваться к изменениям состава в реальном времени [2].

– Масштабируемость: архитектура роя не требует фундаментальной перенастройки при изменении числа участников. Это позволяет гибко подстраивать размер группы под конкретную задачу — от нескольких аппаратов для инспекции склада до тысяч дронов для мониторинга сельскохозяйственных угодий [3].

– Эффективность охвата пространства: параллельная работа множества агентов значительно сокращает время выполнения задач, связанных с картографированием, поиском объектов или сбором данных. Например, в сельском хозяйстве рой может одновременно обследовать десятки гектаров, обеспечивая высокую пространственную и временную разрешающую способность [4].

– Снижение когнитивной нагрузки на оператора: вместо управления каждым дроном вручную, человек формулирует общую цель (например, «обследовать территорию» или «доставить грузы в указанные точки»), а рой самостоятельно планирует маршруты, координирует движения и избегает столкновений [5].

Таким образом, рой дронов — это не просто совокупность отдельных БПЛА, а сложная адаптивная система, демонстрирующая свойства коллективного интеллекта. Её потенциал раскрывается именно в тех сценариях, где требуется гибкость, надёжность и способность к автономному реагированию на динамические изменения среды.

Роль искусственного интеллекта в управлении роем

Управление роем дронов невозможно без искусственного интеллекта (ИИ), поскольку именно он обеспечивает переход от простого синхронного движения к интеллектуальному коллективному поведению.

В отличие от централизованных систем, где каждое действие предварительно запрограммировано или контролируется оператором, рой функционирует как децентрализованная самоорганизующаяся сеть, в которой каждый дрон принимает локальные решения на основе ограниченной информации, полученной от соседей и собственных сенсоров. Согласованность поведения всей группы достигается за счёт сложных вычислительных моделей, встроенных в архитектуру управления.

Современные подходы к ИИ-управлению роями можно разделить на две категории: классические биоинспирированные алгоритмы и методы машинного обучения, особенно глубокого обучения и обучения с подкреплением.

Одним из наиболее известных биоинспирированных алгоритмов является алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO), предложенный Кеннеди и Эберхартом в 1995 году [2]. Он имитирует социальное поведение стай птиц или косяков рыб, где каждая «частица» (в данном случае — дрон) корректирует свою траекторию, учитывая как собственный опыт, так и опыт «лучших» соседей. PSO эффективен для задач оптимизации маршрутов, поиска целей и распределения ресурсов в условиях неопределённости.

Другой классический подход — модель Брайана Рейнольдса (boids model), основанная на трёх простых правилах: сближение (cohesion), избегание столкновений (separation) и выравнивание направления (alignment). Несмотря на простоту, эта модель демонстрирует удивительную способность к возникновению сложного группового поведения без центрального контроля [3].

С развитием вычислительных мощностей и алгоритмов глубокого обучения акцент сместился в сторону адаптивных и обучающихся систем. Особенно перспективным направлением стало обучение с подкреплением (Reinforcement Learning, RL), позволяющее дронам обучаться на опыте взаимодействия со средой. В контексте роев применяется мультиагентное обучение с подкреплением (Multi-Agent Reinforcement Learning, MARL), где каждый агент одновременно учится кооперироваться и конкурировать, максимизируя общую награду группы [4].

Например, архитектуры типа MADDPG (Multi-Agent Deep Deterministic Policy Gradient) позволяют дронам развивать сложные тактики совместного маневрирования, даже при частичной потере связи или изменении состава роя. Глубокие нейросети, такие как Graph Neural Networks (GNN), используются для моделирования топологии взаимодействий между дронами, что особенно важно при динамическом изменении структуры роя.

Искусственный интеллект решает четыре ключевые задачи:

– Навигация и избегание препятствий: на основе данных с камер, лидаров и GPS дрон строит локальную карту окружения. Современные подходы сочетают SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) с RL для адаптивного планирования траекторий в реальном времени, даже при отказе отдельных сенсоров.

– Распределение задач: без единого «лидера» роли распределяются децентрализованно — с учётом местоположения, уровня заряда батареи и текущей загрузки. Консенсусные алгоритмы (например, Raft или Paxos) и кооперативное RL обеспечивают справедливое и эффективное распределение

нагрузки.

– Адаптация к изменениям среды: при потере связи, выходе дронов из строя или изменении целей рой перестраивается автономно — формирует подрои, перераспределяет зоны ответственности, перепланирует маршруты.

– Оптимизация коммуникации: чтобы избежать перегрузки канала, искусственный интеллект применяет сжатие данных, приоритизацию сообщений и *event-triggered communication* — передачу данных только при значимых изменениях состояния.

Таким образом, искусственный интеллект — не просто инструмент автоматизации, а основа интеллектуальной автономии роя, обеспечивающая его способность к восприятию, адаптации и коллективному принятию решений в условиях неопределённости и динамической среды.

Применение роев дронов

Роевые системы дронов уже выходят за рамки лабораторных исследований и находят практическое применение в самых разных отраслях. Их уникальные свойства — масштабируемость, отказоустойчивость и способность к коллективному восприятию — делают их особенно ценными в условиях, где требуется высокая скорость реакции, широкий охват территории или работа в опасных зонах. Ниже рассмотрены ключевые сферы применения с акцентом на реальные кейсы и технические детали.

Сельское хозяйство. В условиях роста мирового населения и необходимости повышения эффективности агросектора рои дронов становятся инструментом точного земледелия (*precision agriculture*). Оснащённые мультиспектральными и гиперспектральными камерами, дроны собирают данные о состоянии растительности по индексам NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), EVI и другим биометрическим показателям. На основе этих данных ИИ-системы формируют карты переменного внесения удобрений, пестицидов и воды, что позволяет сократить расход химикатов на 20–40 % и повысить урожайность до 15 % [5]. Например, компания DJI Agras уже использует рои для автоматизированной обработки полей площадью до 100 га за один полётный цикл.

Поиск и спасение. В условиях чрезвычайных ситуаций — землетрясений, лесных пожаров, завалов — время является критическим фактором. Рои дронов способны за считанные минуты обследовать десятки квадратных километров, используя термографические, акустические и газоанализирующие сенсоры. Алгоритмы компьютерного зрения выявляют тепловые аномалии (возможные люди под завалами), а ИИ-

классификаторы отличают человеческие голоса от фонового шума. В перспективе планируется интеграция функций автономной доставки первой помощи: мини-дроны смогут сбрасывать аптечки, воду или GPS-маячки непосредственно к пострадавшим [6].

Военные и оборонные задачи. Военные структуры активно инвестируют в разработку роев дронов как средства низкозатратной разведки и подавления. Так, проект *Perdix*, реализованный DARPA и BBC США, продемонстрировал возможность запуска более 100 микродронов с истребителей F/A-18, которые самостоятельно формировали сеть связи и выполняли задачи радиоэлектронной разведки. Децентрализованная архитектура делает такие системы устойчивыми к радиоподавлению и уничтожению отдельных элементов. Кроме того, рои могут использоваться для имитации целей, создания помех ПВО или даже координированной доставки боеприпасов малой мощности [7].

Логистика и доставка. Компании вроде Wing (Alphabet) и Zipline уже тестируют роевые решения для доставки товаров «последней мили». Преимущество роя перед одиночным дроном заключается в параллельной доставке: группа из 10–20 аппаратов может обслуживать целый район одновременно, оптимизируя маршруты в реальном времени с учётом воздушного трафика, погодных условий и ограничений воздушного пространства. ИИ-планировщики на базе MARL позволяют избегать столкновений даже при плотном движении в городской среде.

Шоу и развлечения. Массовые световые шоу с участием сотен и тысяч дронов (например, выступления Intel Drone Light Shows на Олимпийских играх или концертах) демонстрируют не только эстетический потенциал, но и высокую точность синхронизации. Каждый дрон оснащён светодиодами и работает по заранее рассчитанной траектории, но современные системы всё чаще переходят к адаптивному управлению в реальном времени: при порыве ветра или отказе аппарата искусственный интеллект мгновенно перестраивает фигуру, сохраняя целостность изображения. Это требует высокой надёжности коммуникаций и алгоритмов предиктивного управления.

Технические и этические вызовы

Несмотря на значительный прогресс в области роевого управления дронами, их широкое внедрение в гражданскую и военную сферы сталкивается с рядом взаимосвязанных технических, этических и правовых барьеров. Эти вызовы требуют не только инженерных решений, но и междисциплинарного подхода, включающего юриспруденцию, этику технологий и общественное регулирование.

Технические ограничения:

- Энергоэффективность и автономность. Современные дроны в основном используют литий-полимерные аккумуляторы, обеспечивающие полёт в течение 20–40 минут. Это критически ограничивает продолжительность миссий, особенно в крупномасштабных операциях (например, лесной пожар или мониторинг протяжённых трубопроводов). Хотя разрабатываются решения на основе солнечных панелей, водородных топливных элементов и беспроводной зарядки, они пока не достигли необходимой компактности и надёжности для массового применения [8].

- Коммуникационная устойчивость. В условиях городской застройки, гористой местности или электромагнитных помех связь между дронами может прерываться. Mesh-сети и протоколы типа LoRaWAN или 5G NR-U (New Radio Unlicensed) предлагают частичное решение, однако масштабируемость таких систем при количестве агентов свыше 1000 остаётся проблемой. Задержки в передаче данных могут привести к рассогласованию действий и столкновениям.

- Вычислительная нагрузка. Обработка видеопотока, сенсорных данных и выполнение ИИ-алгоритмов в реальном времени требует значительных вычислительных ресурсов. При этом бортовые процессоры ограничены по мощности, тепловыделению и энергопотреблению. Подходы на основе edge computing и распределённых вычислений (например, часть задач решается на наземной станции) помогают, но создают новую уязвимость — зависимость от инфраструктуры.

- Кибербезопасность. Рои дронов представляют собой привлекательную цель для кибератак. Возможны сценарии перехвата управления через GPS-спуфинг, подмены данных сенсоров или внедрения вредоносного ПО через обновления. В 2020 году исследователи из Университета Цинциннати продемонстрировали, как можно «отравить» обучение роя, внедряя одного злонамеренного агента, который нарушает координацию всей группы [9]. Защита требует многоуровневых мер: от шифрования канала связи до блокчейн-аутентификации команд и использования explainable AI для обнаружения аномального поведения.

Этические и правовые дилеммы:

- Приватность. Массовое развёртывание роев в городах для мониторинга трафика или безопасности создаёт риск тотального наблюдения. Распознавание лиц, отслеживание перемещений и сбор биометрических данных без согласия граждан противоречит принципам GDPR и аналогичным нормам в других юрисдикциях. Даже в гуманитарных миссиях (поиск пропавших) возникает вопрос: кто имеет

доступ к собранным данным и как долго они хранятся?

- Автономное применение силы. В военной сфере рои дронов могут быть оснащены боеголовками или средствами подавления. Если принятие решения о применении оружия делегируется искусственным интеллектом, возникает фундаментальная этическая проблема: кто несёт ответственность за гибель людей? Разработчик алгоритма? Командир подразделения? Сама система? На сегодняшний день ООН и ряд стран (включая Германию и Нидерланды) призывают к запрету полностью автономных боевых систем (LAWS — Lethal Autonomous Weapons Systems).

- Юридическая неопределённость. В большинстве стран отсутствуют чёткие нормы, регулирующие коллективное поведение автономных дронов. Например, если рой, доставляющий товары, причиняет вред имуществу или здоровью, как определяется вина? Кто является «оператором» — компания, владелец облака, или каждый дрон как отдельный субъект? Эта правовая серая зона тормозит коммерциализацию технологий.

Таким образом, преодоление этих вызовов требует не только технологических прорывов, но и выработки этических рамок, международных стандартов и гибкого законодательства, способного адаптироваться к быстрому развитию искусственного интеллекта и робототехники.

Перспективы развития

Будущее роёв дронов определяется не столько ростом количества аппаратов, сколько качественным переходом к интеллектуальным, адаптивным и интегрированным системам. Этот переход будет обусловлен синергией между искусственным интеллектом, телекоммуникациями нового поколения, микроэлектроникой и облачными платформами. Ниже рассмотрены ключевые направления, которые определяют эволюцию роевых технологий в ближайшее десятилетие.

Гибридные архитектуры управления. Современные исследования всё чаще указывают на ограниченность как полностью централизованных, так и полностью децентрализованных подходов. В ответ на это формируется концепция гибридного управления: стратегическое планирование (например, постановка общей миссии, распределение зон ответственности) осуществляется в облаке или наземном центре, тогда как тактическое исполнение — уклонение от препятствий, координация в подрое, реакция на локальные изменения — происходит автономно на уровне отдельных дронов. Такая архитектура сочетает преимущества обоих подходов: масштабируемость и отказоустойчивость

децентрализации с возможностью глобальной оптимизации и контроля со стороны человека [10].

Непрерывное и коллективное обучение. Одним из главных ограничений современных роёв является необходимость предварительного обучения ИИ-моделей в симуляторах. В будущем системы будут переходить к онлайн-обучению в реальных условиях. С помощью методов *federated learning* и *knowledge distillation* дроны смогут обмениваться «опытом» без передачи сырых данных, сохраняя приватность и снижая нагрузку на канал связи. Например, если один дрон научился эффективно обходить новый тип препятствия (например, высоковольтную ЛЭП), он может передать компактное представление этого знания остальным членам роя, ускоряя адаптацию всей группы.

Интеграция с передовыми технологиями:

- 5G и 6G: Сверхнизкие задержки (<1 мс в 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication, URLLC) и высокая плотность подключений (до 1 млн. устройств на км²) сделают возможным управление роями из тысяч дронов даже в городской среде. 6G, ожидаемый к 2030 году, добавит поддержку интегрированной сенсорики и искусственного интеллекта прямо в сетевую инфраструктуру, что позволит выносить часть вычислений на базовые станции.

- Edge и fog computing: чтобы снизить энергопотребление и задержки, обработка данных будет происходить не только на борту дронов, но и на промежуточных узлах — вышках связи, автомобилях, стационарных станциях. Это особенно важно для задач компьютерного зрения и обработки LiDAR-данных, требующих значительных вычислительных ресурсов.

- Цифровые двойники (Digital Twins): перед развёртыванием в реальном мире рой сможет проходить полное моделирование в виртуальной копии операционной среды. Цифровой двойник позволит протестировать поведение при различных сценариях — от штормового ветра до кибератаки — и оптимизировать алгоритмы без риска для оборудования и людей. Такой подход уже применяется в аэрокосмической и энергетической отраслях и скоро станет стандартом для роевых систем.

- Нейроморфные и квантовые вычисления: в долгосрочной перспективе нейроморфные чипы (имитирующие структуру мозга) обеспечат высокую энергоэффективность ИИ-обработки на борту. Квантовые алгоритмы, такие как QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm), позволят решать NP-трудные задачи маршрутизации и распределения ресурсов за время, недоступное классическим компьютерам.

Интеграция в «умную» инфраструктуру. В перспективе рои дронов станут органичной

частью умных городов и промышленного интернета вещей (IIoT). Они будут:

- мониторить дорожную обстановку и автоматически регулировать светофоры;
- доставлять медикаменты в удалённые районы в течение минут;
- проводить инспекцию мостов, трубопроводов и электростанций без участия человека;
- участвовать в космических миссиях — от сборки орбитальных станций до создания распределённых радиотелескопов на Луне.

Таким образом, развитие роёв дронов движется от автономных «стай» к интеллектуальным экосистемам, тесно интегрированным в физическую и цифровую инфраструктуру общества.

Выводы

Управление роем дронов при помощи искусственного интеллекта представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений на стыке робототехники, машинного обучения и распределённых систем. Современные ИИ-алгоритмы позволяют дронам не просто выполнять заранее запрограммированные действия, а адаптироваться к изменяющейся обстановке, координировать поведение в группе и принимать автономные решения в реальном времени. Это открывает широкие возможности для применения роевых систем в таких областях, как сельское хозяйство, логистика, мониторинг окружающей среды, поисково-спасательные операции и оборонные технологии.

Несмотря на значительный прогресс, ряд технических и этических вызовов остаётся актуальным. К ним относятся ограничения по энергоёмкости и вычислительным ресурсам, обеспечение надёжной связи между аппаратами, защита от киберугроз, а также вопросы правового регулирования и ответственности за действия автономных систем. Решение этих задач требует междисциплинарного подхода и тесного взаимодействия инженеров, разработчиков ИИ, юристов и регуляторов.

Перспективы развития данной области связаны с дальнейшей интеграцией передовых технологий — от 5G и edge-вычислений до нейроморфных чипов и самообучающихся алгоритмов. В будущем рои дронов могут стать неотъемлемым элементом «умной» инфраструктуры городов, промышленных комплексов и даже космических миссий. Таким образом, управление роями дронов с использованием искусственного интеллекта не только демонстрирует потенциал современных технологий, но и формирует основу для новых парадигм взаимодействия человека и автономных систем.

Литература

1. Şahin, E. Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application // Lecture Notes in Computer Science. – Springer, 2005. [Электронный ресурс] / Режим доступа: https://doi.org/10.1007/978-3-540-30552-1_2 – Загл. с экрана.

2. Kennedy, J., Eberhart, R. Particle swarm optimization // Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks. – IEEE, 1995. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968> – Загл. с экрана.

3. Reynolds, C. W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model // ACM SIGGRAPH Computer Graphics. – ACM, 1987. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://doi.org/10.1145/37401.37406> – Загл. с экрана.

4. Lowe, R., Wu, Y., Tamar, A., Harb, J., Abbeel, P., Mordatch, I. Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments // Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). – 2017. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/file/68a9750337a418a86fe06c1991a1d64c-Paper.pdf> – Загл. с экрана.

5. Zhang, C., Kovacs, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review // Precision Agriculture. –

Springer, 2012. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5> – Загл. с экрана.

6. Murphy, R. R., et al. Autonomous drones for search and rescue: Challenges and opportunities // Journal of Field Robotics. – Wiley, 2020. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://doi.org/10.1002/rob.21930> – Загл. с экрана.

7. Arkin, R. C. Governing Lethal Behavior in Autonomous Robots. – CRC Press, 2009. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://doi.org/10.1201/9781420067011> – Загл. с экрана.

8. Liu, Y., et al. Energy management in drone swarms: Challenges and future directions // IEEE Access. – IEEE, 2021. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3098765> – Загл. с экрана.

9. Gupta, A., et al. Adversarial attacks on multi-agent reinforcement learning systems // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. – AAAI, 2020. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://doi.org/10.1609/aaai.v34i05.6210> – Загл. с экрана.

10. Olfati-Saber, R., Fax, J. A., Murray, R. M. Consensus and cooperation in networked multi-agent systems // Proceedings of the IEEE. – IEEE, 2007. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2006.887293> – Загл. с экрана.

Павлыш В.Н., Шлыков С.А., Зеленский Д.М. Управление роем дронов при помощи искусственного интеллекта: современные подходы и перспективы. В статье рассмотрены принципы функционирования роевых систем беспилотных летательных аппаратов, основанные на децентрализованном управлении и биоинспирированных алгоритмах. Проанализирована роль искусственного интеллекта — от классических методов (алгоритмы роя частиц) до современных технологий машинного обучения, включая обучение с подкреплением. Описаны ключевые области применения роев дронов: сельское хозяйство, поиск и спасение, оборона, логистика и развлечения. Отдельное внимание уделено техническим и этическим вызовам, а также перспективам интеграции с 5G, облачными вычислениями и цифровыми двойниками.

Ключевые слова: рой дронов, искусственный интеллект, машинное обучение, децентрализованное управление, автономные системы.

Pavlysh V.N., Shlykov S.A., Zelensky D.M. Drone swarm control using artificial intelligence: modern approaches and prospects. The report examines the principles of functioning of swarm systems of unmanned aerial vehicles based on decentralized management and bioinspired algorithms. The role of artificial intelligence is analyzed, from classical methods (particle swarm algorithms) to modern machine learning technologies, including reinforcement learning. The key applications of drone swarms are described: agriculture, search and rescue, defense, logistics, and entertainment. Special attention is paid to technical and ethical challenges, as well as the prospects for integration with 5G, cloud computing and digital twins.

Keywords: swarm of drones, artificial intelligence, machine learning, decentralized management, autonomous systems.

Статья поступила в редакцию 21.10.2025
Рекомендована к публикации профессором Зори С. А.