Научная статья
УДК 626.02:629.735.3

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА В СИСТЕМЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

А.А. Кадысева[1,*], Д.А. Беда[1], В.В. Миронов[2], С.В. Максимова[2], М.С. Али[1], Е.А. Лентяева[1]

[1] Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия
[2] Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
* E-mail: kadyseva@mail.ru

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для мониторинга и контроля гидротехнических сооружений на всех этапах их жизненного цикла. Анализируется возможность применения современных беспилотных технологий на этапах жизненного цикла гидротехнических сооружений: от предпроектных изысканий до вывода сооружений из эксплуатации. Проводится анализ преимуществ и ограничений использования БПЛА на различных стадиях жизненного цикла сооружений, включая строительно-монтажные работы, регулярную эксплуатацию и процессы демонтажа. Рассматриваются вопросы экономической эффективности применения беспилотных технологий, а также барьеры, препятствующие их широкому внедрению. Результаты исследования демонстрируют значительный потенциал беспилотных систем в создании комплексной системы мониторинга, способной обеспечить непрерывный контроль состояния ГТС на протяжении всего периода их функционирования.

Ключевые слова: *беспилотные летательные аппараты; гидротехнические сооружения; жизненный цикл; мониторинг; безопасность.*

Для цитирования: Кадысева А.А., Беда Д.А., Миронов В.В., Максимова С.В., Али М.С., Лентяева Е.А. Аспекты применения БПЛА в системе жизненного цикла гидротехнических сооружений // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 3. С. 57–72.

Original article

ASPECTS OF UAV APPLICATION IN THE LIFE CYCLE SYSTEM OF HYDROTECHNICAL STRUCTURES

A.A. Kadyseva[1,*], D.A. Beda[1], V.V. Mironov[2], S.V. Maksimova[2], M.S. Ali[1], E.A. Lentyayeva[1]

[1] Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
[2] Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia
* E-mail: kadyseva@mail.ru

Abstract. The article examines theoretical and practical aspects of using unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring and controlling hydraulic structures (HS) at all stages of their life cycle (LC). The possibility of applying modern unmanned technologies in various fields of HS LC is analyzed, from pre-design surveys to decommissioning of structures.

© Кадысева А.А., Беда Д.А., Миронов В.В., Максимова С.В., Али М.С., Лентяева Е.А. 2025

The analysis of advantages and limitations of using UAVs at various stages of the structures' life cycle is conducted, including construction and installation works, regular operation, and dismantling processes. The issues of economic efficiency of unmanned technologies application, as well as barriers hindering their widespread implementation, are considered. The research results demonstrate significant potential of unmanned systems in creating an integrated monitoring system capable of ensuring continuous control over the HS condition throughout the entire period of their operation.

Keywords: *unmanned aerial vehicles; hydraulic structures; life cycle; monitoring; safety.*

For citation: Kadyseva A.A., Beda D.A., Mironov V.V., Maksimova S.V., Ali M.S., Lentyayeva E.A. Aspects of UAV Application in the life cycle system of hydrotechnical structures. *Bulletin of Science and Education of the North-West of Russia*. 2025. Vol. 11, No. 3, pp. 57–72.

Введение

Анализ гидрологической ситуации в Российской Федерации[1] за последнее десятилетие демонстрирует тревожную тенденцию к росту числа паводковых явлений и наводнений. Последствия указанных природных катастроф характеризуются масштабным и многоаспектным характером [1]. Материальный ущерб от наводнений [2] включает разрушение жилых объектов, повреждение инфраструктурных элементов, утрату сельскохозяйственных угодий, затраты на эвакуационные мероприятия и восстановительные работы. По экспертным оценкам, ежегодные экономические потери от паводковых явлений исчисляются миллиардами рублей[2]. Помимо экономического ущерба, наводнения создают существенную угрозу жизни и здоровью населения, оказывают негативное влияние на экологическую обстановку, способствуют деградации природных ландшафтов и утрате биоразнообразия [3].

Гидротехнические сооружения (ГТС) защитного назначения, включающие в себя плотины и дамбы, представляют собой фундаментальную основу системы противопаводковой защиты территорий и выступают ключевым элементом обеспечения экологической безопасности природных комплексов.

Функционирование данных инженерных конструкций основано на комплексном подходе к решению природоохранных задач. Регулируя паводковые воды и предотвращая катастрофические последствия затопления, гидротехнические сооружения обеспечивают соблюдение нормативных параметров воздействия на водные экосистемы. При этом поддерживается оптимальный гидрологический режим водоёмов, что способствует сохранению экологического баланса территории.

Эффективное функционирование плотин и дамб позволяет минимизировать риски возникновения чрезвычайных ситуаций природного характера, обеспечивая при этом рациональное регулирование водного режима территорий. В результате создаётся устойчивая система природоохранительных мероприятий, способствующая гармоничному взаимодействию антропогенной деятельности и природных процессов.

В результате гидротехнические сооружения защитного назначения представляют собой не просто инженерные конструкции, а комплексный инструмент обеспечения

[1] Росгидромет. Паводки и наводнения в России: оперативная информация / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.meteorf.gov.ru/press/polovod2025/41358/ (дата обращения: 07.08.2025).

[2] Генеральная уборка [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://genyborka.ru/10106 (дата обращения: 07.08.2025).

экологической безопасности, сохранения природных ресурсов и устойчивого развития территорий в условиях современных экологических вызовов.

Однако эффективность такой защиты напрямую зависит от своевременного выявления и предотвращения потенциальных угроз. История знает немало примеров, когда недостаточный контроль за состоянием гидротехнических сооружений приводил к катастрофическим последствиям. Разрушения дамб и плотин, подобные инцидентам на золотоносном прииске в Красноярском крае, аварии в Брумадинью (Бразилия), Айке (Венгрия) и других регионах мира, демонстрируют, насколько серьёзными могут быть последствия несвоевременного обнаружения дефектов ГТС. В 2024 году зафиксированы два существенных инцидента, связанных с нарушением функционирования гидротехнических сооружений на территории Российской Федерации. В апреле 2024 года произошло разрушение комплекса защитных гидротехнических сооружений города Орска. Авария затронула два объекта: сооружение для защиты городской территории от затопления в период весеннего половодья (вторая очередь реализации проекта) и сооружение для защиты района «Старый город» от затопления в аналогичный период. В августе 2024 года на гидротехническом сооружении водохранилища, расположенном на реке Хонхолойка в Республике Бурятия, произошёл инцидент, вызванный интенсивными атмосферными осадками. Следствием экстремальных погодных условий стал перелив воды через гребень плотины с последующим нарушением её целостности [3].

Аварии на гидротехнических сооружениях имеют катастрофические последствия, сопровождаясь человеческими жертвами, масштабными разрушениями инфраструктуры, длительным восстановлением экосистем и значительными экономическими потерями.

Особую обеспокоенность вызывает тот факт, что на территории России функционирует более 20 тысяч ГТС[3] различного класса и назначения, каждое из которых требует постоянного внимания и контроля. Учитывая масштабность этой инфраструктуры, необходимость эффективного мониторинга состояния ГТС становится критически важной задачей для обеспечения безопасности населения и сохранения природных ресурсов. В связи с этим совершенствование систем охраны и мониторинга ГТС приобретает особую актуальность.

Традиционные методы контроля сталкиваются с серьёзными ограничениями. К ним относятся высокая стоимость мониторинга, длительные сроки проведения проверок, а также существенные риски для персонала при обследовании труднодоступных и опасных участков. Дополнительной проблемой становится сложность получения актуальных и точных данных о состоянии сооружений в режиме реального времени.

В современных условиях, характеризующихся возрастающей сложностью задач мониторинга ГТС и увеличением частоты паводков и наводнений, возникает объективная необходимость внедрения инновационных подходов к контролю состояния сооружений.

Среди перспективных направлений развития системы экологического мониторинга значительное место занимают беспилотные технологии. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) демонстрируют высокую эффективность в различных сферах практического применения и способны обеспечить более высокий уровень безопасности и эффективности контроля. Их внедрение представляется особенно актуальным для решения существующих проблем в сфере охраны и эксплуатации ГТС, что открывает новые возможности для совершенствования системы мониторинга гидротехнических сооружений.

---

[3] Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2024 году [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/Пр-259 от 04.08.2025. Годовой отчет.pdf (дата обращения: 11.08.2025).

Успешная интеграция БПЛА осуществлена в нефтегазовом секторе [4], где они эффективно используются для комплексного мониторинга протяжённых трубопроводных систем и промышленных объектов. В агропромышленном комплексе беспилотные технологии позволяют проводить детальный контроль состояния сельскохозяйственных угодий и осуществлять объективную оценку продуктивности посевов [5, 6].

Значительный вклад БПЛА вносят в развитие лесного хозяйства, обеспечивая оперативное выявление очагов возгораний и точную оценку масштабов ущерба от природных и техногенных факторов. В сфере горнодобывающей промышленности данные технологии успешно применяются при выполнении маркшейдерских работ и контроле параметров карьеров. В градостроительстве БПЛА [7] активно используются для формирования топографических планов и мониторинга различных объектов [8, 9].

Внедрение беспилотных технологий открывает новые перспективы для оптимизации производственных процессов на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) ГТС [10, 11]. Ключевым преимуществом является автоматизация процессов сбора данных, которая достигается за счёт использования БПЛА для регулярного обследования объектов, проведения измерений и инспекций с минимальным участием человека. Это особенно актуально для масштабных ГТС, требующих постоянного мониторинга технического состояния [12].

Экономическая эффективность применения беспилотных систем проявляется в существенном сокращении затрат на обслуживание и контроль ГТС. Автономные БПЛА с интегрированными док-станциями минимизируют потребность в специалистах, работающих в сложных условиях гидротехнических объектов. Современные решения, такие как системы Drone-in-a-Box, обеспечивают круглосуточную работу благодаря автоматизированной зарядке и способности функционировать в широком диапазоне температур (от -35°C до +60°C).

Интеграция искусственного интеллекта в беспилотные системы позволяет осуществлять комплексный анализ состояния ГТС в режиме реального времени. БПЛА, оснащённые RGB-датчиками, тепловизионными камерами и лидарами, обеспечивают высокоточную визуализацию и аналитику. Программное обеспечение с элементами ИИ автоматически выявляет потенциальные дефекты, такие как трещины, протечки или деформации конструкций, что особенно важно для объектов в сложных гидрологических условиях.

Важным аспектом применения беспилотных технологий является повышение безопасности при обследовании гидротехнических сооружений. БПЛА с тепловизионными камерами и функцией обхода препятствий позволяют проводить инспекции в труднодоступных местах, на высоте и в условиях повышенной опасности без риска для персонала. Интегрированные системы обнаружения движения обеспечивают эффективный мониторинг территории даже в условиях ограниченной видимости.

Современные беспилотные системы также значительно улучшают процессы управления ГТС. Возможность мгновенной передачи данных, их синхронизации и интеграции с информационными системами позволяет эффективно контролировать техническое состояние сооружений, отслеживать динамику изменений и своевременно выявлять отклонения от нормативных показателей. Это особенно важно при эксплуатации крупных гидротехнических комплексов с множеством конструктивных элементов.

Внедрение беспилотных технологий может способствовать повышению эффективности производственных процессов, оптимизации затрат на обслуживание и обеспечению высокого уровня безопасности при проведении инспекций и мониторинга состояния сооружений на всех этапах их жизненного цикла [13].

Методы исследования

Методологическая основа исследования сформирована на базе комплексного анализа теоретических и практических материалов в сфере применения беспилотных технологий для мониторинга гидротехнических сооружений. В ходе исследования реализован системный подход, включающий обобщение современных научных данных в области использования беспилотных летательных аппаратов, анализ инновационных разработок в сфере мониторинга ГТС, а также структурирование данных по ключевым направлениям применения беспилотных систем. Значительное внимание уделено обработке и интерпретации практического опыта использования БПЛА на всех этапах жизненного цикла гидротехнических сооружений. Такой подход позволил сформировать целостное представление о потенциале беспилотных технологий в данной сфере и выявить наиболее эффективные методы их применения для решения задач мониторинга и контроля состояния ГТС.

Результаты исследования

В современных условиях обеспечение безопасности гидротехнических сооружений регламентируется основополагающим нормативно-правовым актом – Федеральным законом Российской Федерации от 21 июля 1997 года № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений». Данный законодательный документ формирует правовую базу для реализации комплекса мероприятий, направленных на обеспечение надёжности и безопасности указанных объектов.

Система обеспечения безопасности ГТС базируется на реализации комплекса основополагающих требований, направленных на минимизацию рисков возникновения аварийных ситуаций и обеспечение надёжной эксплуатации сооружений. Ключевыми элементами данной системы выступают поддержание допустимого уровня риска аварий, декларирование безопасности, осуществление государственного надзора, обеспечение непрерывности эксплуатации объектов, а также внедрение комплекса мер по поддержанию их безопасного состояния. При этом предусматривается строгая ответственность за действия (или бездействие), приводящие к снижению безопасности сооружений ниже допустимого уровня [14].

Комплексный подход к обеспечению безопасности ГТС предполагает всестороннюю оценку их технического состояния [15], включающую проведение визуального осмотра, инструментального обследования конструкций, анализ проектно-технической и эксплуатационной документации, а также определение степени износа и повреждений сооружений. Важно своевременно выявлять потенциально проблемные участки и проводить оценку влияния выявленных дефектов на безопасность и работоспособность сооружений[4] [5].

Технологический аспект обеспечения безопасности ГТС включает выбор оптимальных методов восстановления и ремонта бетонных и железобетонных конструкций, оснащение сооружений техническими средствами мониторинга, обеспечение необходимой квалификации эксплуатационного персонала. При этом учитываются специфические

[4] Разработка и создание комплекса мероприятий по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://unece.org/fileadmin/DAM/env/water/damsafety/textbook_annexes.pdf (дата обращения: 06.07.2025).

[5] Рекомендации по проведению визуальных наблюдений и обследований на грунтовых плотинах П 72. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/070/4293812137.pdf (дата обращения: 06.08.2025).

характеристики объекта: климатические условия, геологические особенности, расположение сооружения и требования экологической безопасности.

Контроль качества работ обеспечивается посредством строгого соблюдения нормативных требований и стандартов, использования сертифицированных материалов и оборудования, а также систематического мониторинга выполнения работ на всех этапах. Эффективный мониторинг состояния восстановленных объектов требует организации системы постоянного контроля и проведения регулярных обследований.

Инновационные методы диагностики играют ключевую роль в современной системе мониторинга ГТС. Внедрение современных неразрушающих методов контроля, включая ультразвуковую дефектоскопию, тепловизионное обследование и георадарные исследования, позволяет существенно повысить точность оценки технического состояния сооружений. Особое значение приобретает применение автоматизированных систем мониторинга, обеспечивающих непрерывный сбор и анализ данных о параметрах работы ГТС.

Интегрированный подход к обеспечению безопасности ГТС предполагает создание многоуровневой системы контроля, включающей постоянный мониторинг деформационных процессов, контроль уровня и качества воды, наблюдение за состоянием основания сооружений, анализ гидрометеорологических условий и оценку влияния антропогенных факторов[6].

Внедрение инновационных технологий, в частности беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), открывает новые перспективы в области мониторинга ГТС. Технологические преимущества БПЛА проявляются в обеспечении оперативного и систематического контроля обширных территорий, создании актуальных цифровых моделей рельефа и объектов инфраструктуры, что способствует своевременному выявлению негативных изменений и деформационных процессов при существенной оптимизации ресурсозатрат на осуществление мониторинговых мероприятий.

Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений требует системного подхода к мониторингу и контролю на всех этапах их жизненного цикла. Непрерывное наблюдение за состоянием ГТС, своевременное выявление потенциальных угроз и оперативное реагирование на возникающие проблемы являются ключевыми факторами предотвращения аварийных ситуаций и обеспечения надёжной эксплуатации объектов.

Комплексный подход к мониторингу, охватывающий все стадии – от проектирования до вывода из эксплуатации – позволяет создать единую систему контроля, которая обеспечивает своевременное выявление отклонений от нормативных показателей и принятие корректирующих мер. Это особенно важно в условиях постоянного воздействия природных и техногенных факторов, которые могут привести к деградации конструкций и снижению безопасности сооружений.

Каждый из указанных этапов будет отличаться собственными специфическими задачами, особыми требованиями к контролю качества выполняемых работ и необходимостью систематического мониторинга технического состояния сооружения (см. табл.1).

[6] Методические рекомендации по составлению проекта мониторинга безопасности гидротехнических сооружений на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах, объектах и в организациях РД 03-417-01. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256629/5f1fb0aa9c76dc1852849869589b58eb948712c5/ (дата обращения: 08.08.2025).

Таблица 1– Функции БПЛА на всех этапах жизненного цикла гидротехнического сооружения

Этап жизненного цикла	**Основные задачи и функции БПЛА**
Предпроектная стадия	• Сбор референсных и визуальных материалов • Создание 2D-карт и ортофотопланов территории
Инженерные изыскания	• Проведение геодезических и топографических работ • Формирование облаков точек с точностью до 1–2 см • Выполнение быстрой съёмки больших территорий
Проектирование	• Мониторинг изменений рельефа и ландшафта • Визуальный контроль соответствия проектных решений реальным условиям
Строительство	• Аэрофотосъёмка для подсчёта объёмов выполненных работ • Контроль соблюдения сроков и качества строительства • Визуальное сопровождение строительного процесса • Интеграция с BIM-системами и создание цифровых двойников • Контроль соблюдения техники безопасности персоналом • Транспортировка мелких грузов между строительными участками
Ввод в эксплуатацию	• Выполнение съёмки объектов для формирования исполнительной документации • Подготовка презентационных материалов
Эксплуатация ГТС	• Выявление утечек и деформаций конструкций • Контроль состояния труднодоступных участков сооружений • Мониторинг целостности гидротехнических конструкций • Тепловизионная съёмка для выявления проблемных зон • Инспекция плотин, дамб и других элементов ГТС • Обнаружение нарушений целостности гидротехнических сооружений • Контроль уровня воды и состояния водопропускных сооружений • Мониторинг уровня воды в режиме реального времени • Определение скорости течения и направления водных потоков • Оценка объёма воды в водохранилищах и резервуарах • Выявление зон застоя и образования наносов
Демонтаж	• Анализ технического состояния конструкций • Съёмка аварийных участков перед проведением демонтажных работ

На этапе предпроектной подготовки беспилотные системы осуществляют комплексную оценку территории предполагаемого строительства гидротехнических сооружений. БПЛА осуществляют высокоточную аэрофотосъёмку, формируют детальные цифровые модели рельефа, выполняют анализ инженерно-геологических условий и исследуют существующую инфраструктуру [16].

В процессе проектирования беспилотные технологии способствуют обеспечению актуализации топографической информации, мониторинга изменений рельефа, оценку воздействия природных факторов и визуализацию проектных решений.

Этап строительства характеризуется активным применением беспилотных систем для контроля качества и соблюдения проектных требований. БПЛА осуществляют непрерывный мониторинг хода строительных работ, проверяют соответствие возводимых конструкций

проектной документации, измеряют объёмы выполненных работ и выявляют возможные отклонения от проектных параметров [17].

Важной составляющей применения БПЛА является контроль за соблюдением условий охраны труда и производственной безопасности [18]. Беспилотные системы позволяют отслеживать соблюдение правил техники безопасности, контролировать нахождение персонала в опасных зонах, выявлять потенциальные риски для работников и своевременно предотвращать аварийные ситуации. БПЛА также обеспечивают мониторинг использования средств индивидуальной защиты и соблюдения технологических регламентов.

Дополнительно беспилотные технологии эффективно используются для оптимизации логистики и доставки материалов на строительную площадку. Они способны оперативно транспортировать небольшие грузы, инструменты и документацию между различными участками объекта, что особенно актуально при работе на крупных и территориально распределённых площадках. Беспилотная доставка позволяет сократить время на перемещение материальных ресурсов, минимизировать затраты на транспорт и оптимизировать работу складского хозяйства.

Эксплуатационный период гидротехнического сооружения обеспечивается эффективным мониторингом с использованием беспилотных технологий. БПЛА, оснащённые современным оборудованием, включая RGB-датчики, тепловизионные камеры и лидары, проводят регулярные осмотры сооружений, выявляют потенциальные дефекты и отслеживают динамику изменений. Интеграция искусственного интеллекта позволяет автоматически обнаруживать трещины, протечки и деформации конструкций, что особенно важно в сложных гидрологических условиях.

Завершающий этап жизненного цикла гидротехнического сооружения также предполагает использование БПЛА. Они осуществляют мониторинг процесса демонтажа, документируют все этапы работ и оценивают состояние территории после вывода объекта из эксплуатации, обеспечивая полный контроль над завершающими процессами.

Экономическая эффективность применения беспилотных систем проявляется на всех этапах жизненного цикла гидротехнических сооружений. Автономные БПЛА с интегрированными док-станциями существенно снижают потребность в специалистах, работающих в сложных условиях. Современные технические решения обеспечивают круглосуточную работу в широком диапазоне температур, что способствует оптимизации эксплуатационных расходов.

Безопасность применения беспилотных технологий на всех этапах жизненного цикла гидротехнических сооружений гарантируется современными системами навигации и контроля. БПЛА способны проводить инспекции в труднодоступных местах, на высоте и в условиях повышенной опасности без риска для персонала, что особенно актуально при обследовании крупных гидротехнических комплексов.

Внедрение беспилотных технологий на всех этапах жизненного цикла гидротехнических сооружений способствует существенному повышению эффективности производственных процессов, оптимизации затрат на обслуживание и обеспечению высокого уровня безопасности при эксплуатации объектов. Несмотря на очевидные преимущества использования беспилотных технологий в сфере гидротехнического строительства и эксплуатации, их масштабное внедрение сталкивается с определёнными препятствиями.

Анализ современных реалий применения беспилотных летательных аппаратов в строительной отрасли и эксплуатации гидротехнических сооружений позволяет выделить ряд существенных барьеров, препятствующих их широкому внедрению (см. табл.2).

Таблица 2 – Ограничения и барьеры применения БПЛА в гидротехническом строительстве

Категория барьеров	**Описание барьеров**

Регуляторные барьеры	• Сложность получения разрешений на полёты • Строгие нормы авиационной безопасности • Сложные правила использования воздушного пространства • Дополнительные административные барьеры для оперативного применения
Технические барьеры	• Ограниченная продолжительность полёта из-за ёмкости батарей • Зависимость от метеоусловий (ветер, осадки, туман) • Ограничения по весу переносимого оборудования • Проблемы с передачей данных на больших расстояниях • Технические сбои и отказы оборудования
Финансовые барьеры	• Высокие затраты на приобретение оборудования • Расходы на обучение персонала и получение сертификатов • Затраты на техническое обслуживание и ремонт • Расходы на страхование полётов • Необходимость создания резервных фондов
Кадровые барьеры	• Дефицит квалифицированных операторов БПЛА • Нехватка специалистов по анализу данных • Необходимость постоянного повышения квалификации • Высокая текучесть кадров
Технологические барьеры	• Сложность интеграции с существующими системами управления • Обработка больших объёмов данных • Обеспечение информационной безопасности • Технические сбои оборудования
Правовые барьеры	• Вопросы конфиденциальности собираемых данных • Защита интеллектуальной собственности • Определение ответственности за возможные аварии • Законодательные ограничения на применение над стратегическими объектами
Организационные барьеры	• Сопротивление изменениям со стороны персонала • Необходимость перестройки рабочих процессов • Сложность интеграции в существующие процедуры • Временные и ресурсные затраты на внедрение
Экологические барьеры	• Потенциальное негативное влияние на окружающую среду • Шумовое загрязнение • Риски для представителей дикой природы

Значительное влияние оказывают регуляторные ограничения, связанные со сложностью получения разрешений на полёты. Существующие нормы авиационной безопасности и строгие правила использования воздушного пространства создают дополнительные административные барьеры для оперативного применения БПЛА.

Технические ограничения также представляют собой серьёзное препятствие. Ограниченная продолжительность полёта, обусловленная ёмкостью аккумуляторных батарей, зависимость от метеорологических условий, включая ветер, осадки и туман, а также ограничения по весу переносимого оборудования существенно влияют на эффективность применения беспилотных систем. Проблемы с передачей данных на значительных расстояниях дополнительно осложняют эксплуатацию БПЛА.

Финансовые барьеры проявляются в высоких первоначальных затратах на приобретение необходимого оборудования. Существенные расходы также связаны с обучением персонала, получением необходимых сертификатов, техническим обслуживанием и ремонтом. Дополнительным фактором являются затраты на страхование полётов.

Кадровые проблемы выражаются в дефиците квалифицированных операторов БПЛА и специалистов, обладающих навыками управления аппаратами и анализа получаемых данных. Необходимость постоянного повышения квалификации персонала создаёт дополнительные организационные сложности.

Технологические вызовы включают сложность интеграции беспилотных систем с существующими платформами управления, необходимость обработки значительных объёмов данных и обеспечение их информационной безопасности. Технические сбои и отказы оборудования также представляют собой существенный риск.

Правовые аспекты охватывают вопросы конфиденциальности собираемых данных, защиты интеллектуальной собственности и определения ответственности за возможные повреждения или аварии при эксплуатации БПЛА.

Организационные препятствия связаны с сопротивлением изменениям со стороны традиционного строительного сектора и необходимостью перестройки устоявшихся рабочих процессов. Интеграция новых технологий в существующие производственные процедуры требует значительных временных и ресурсных затрат.

Экологические факторы включают потенциальное негативное влияние на окружающую среду при выполнении полётов, шумовое загрязнение и возможные риски для представителей дикой природы.

Преодоление указанных барьеров требует комплексного подхода, включающего совершенствование нормативно-правовой базы, развитие технологий, повышение квалификации специалистов и оптимизацию экономической эффективности применения беспилотных систем.

Несмотря на наличие существенных барьеров, развитие беспилотных технологий в сфере мониторинга ГТС определяется комплексом взаимосвязанных факторов, формирующих благоприятную среду для их внедрения и масштабирования (см. табл.3).

Таблица 3 – Драйверы развития применения БПЛА в гидротехническом строительстве

Драйверы развития	**Описание и влияние на развитие**
Государственная поддержка	• Активная интеграция БПЛА в деятельность надзорных органов (пример: Главгосстройнадзор МО). • Формирование благоприятной регуляторной среды. • Субсидирование проектов по внедрению беспилотных технологий в различных отраслях
Технологический прогресс	• Развитие искусственного интеллекта и машинного обучения. • Внедрение алгоритмов автоматического обнаружения дефектов. • Появление специализированных платформ для анализа данных (Hepta uBird). • Совершенствование систем технического зрения и сенсоров
Экономические факторы	• Снижение стоимости комплектующих для беспилотных систем. • Разработка более эффективных аккумуляторных решений. • Оптимизация производственных процессов. • Рост экономической эффективности применения БПЛА
Рыночный спрос	• Потребность в создании цифровых двойников объектов. • Интеграция с BIM-системами. • Увеличение спроса на оперативный мониторинг инфраструктуры. • Развитие сервисов на основе данных с БПЛА
Инновационные решения	• Разработка новых методов обработки данных. • Создание специализированного ПО. • Интеграция мультиспектральных камер и лидаров.

	• Развитие систем автономной навигации
Нормативное регулирование	• Формирование правовой базы для легального применения БПЛА. • Упрощение процедур получения разрешений на полёты. • Стандартизация методов мониторинга
Кадровые ресурсы	• Подготовка квалифицированных специалистов. • Развитие образовательных программ. • Создание центров компетенций по работе с БПЛА
Интеграционные возможности	• Синхронизация с существующими информационными системами. • Возможность объединения данных с различных источников. • Создание единых платформ мониторинга

Значительный импульс развитию отрасли придаёт активная поддержка со стороны государственных структур. Показательным примером служит опыт надзорных органов, успешно интегрирующих беспилотные системы в процессы инспекционных проверок. Данная практика способствует формированию положительной регуляторной среды и стимулирует дальнейшее внедрение беспилотных технологий в деятельность профильных ведомств.

Существенный вклад в развитие беспилотной авиации вносит технологический прогресс, особенно в сфере искусственного интеллекта и автономных систем. Современные разработки позволяют реализовать алгоритмы автоматического выявления дефектов на основе обученных моделей машинного обучения.

Наблюдаются позитивные тенденции в экономической составляющей развития беспилотных технологий. Происходит существенное снижение стоимости комплектующих при одновременном повышении их качественных характеристик. Например, разработке более эффективных аккумуляторных систем, что напрямую влияет на расширение возможностей применения беспилотных комплексов.

Растущий спрос на цифровые решения в сфере мониторинга и управления объектами инфраструктуры создаёт дополнительные стимулы для развития беспилотных технологий. Формируется устойчивая потребность в создании цифровых двойников объектов и их интеграции с BIM-системами, что требует применения современных беспилотных решений.

Комплексное взаимодействие указанных факторов формирует устойчивую тенденцию к дальнейшему развитию беспилотной авиации, расширению сфер её применения и повышению эффективности использования в мониторинге гидротехнических сооружений. При этом наблюдается тенденция к преодолению существующих барьеров через совершенствование технологий, оптимизацию затрат и развитие нормативной базы.

В целом, внедрение беспилотных технологий на всем протяжении ЖЦ гидротехнических сооружений демонстрирует значительный потенциал в повышении эффективности контроля объектов. Современные беспилотные системы позволяют оптимизировать затраты на обслуживание, обеспечить безопасность персонала при проведении инспекций и своевременно выявлять потенциальные угрозы, осуществляя постоянный мониторинг деформационных процессов, уровня воды и состояния конструкций в режиме реального времени.

Несмотря на очевидные преимущества, процесс внедрения беспилотных технологий сталкивается с определёнными барьерами: регуляторными ограничениями, связанными с получением разрешений на полёты; техническими ограничениями по длительности и условиям эксплуатации; финансовыми затратами на приобретение оборудования и обучение персонала; а также кадровым дефицитом квалифицированных специалистов. Тем не менее комплексный подход к преодолению этих препятствий создаёт предпосылки для формирования эффективной системы контроля, обеспечивающей безопасность и надёжность эксплуатации гидротехнических сооружений в современных условиях.

Заключение

Дальнейшее развитие беспилотного мониторинга гидротехнических сооружений требует комплексного подхода к совершенствованию различных аспектов этой технологии на всех этапах жизненного цикла объектов.

В сфере совершенствования нормативно-правовой базы приоритетным направлением становится разработка регламентов применения беспилотных технологий на разных стадиях жизненного цикла ГТС. Это позволит оптимизировать процедуры получения разрешений и стандартизировать методы мониторинга для каждого этапа.

Техническое развитие беспилотных систем должно идти в направлении создания универсальных комплексов, способных эффективно решать задачи мониторинга на всех этапах жизненного цикла. Важно обеспечить возможность адаптации оборудования под конкретные потребности различных стадий: от геодезической съёмки при проектировании до контроля демонтажа сооружений.

Интеграция беспилотных технологий в существующие системы управления ГТС требует разработки единых протоколов взаимодействия между различными информационными платформами. Это особенно актуально для обеспечения преемственности данных между этапами жизненного цикла и формирования комплексной картины состояния сооружений.

На этапе эксплуатации ключевым направлением становится совершенствование алгоритмов прогнозирования состояния сооружений с учётом накопленных данных мониторинга. Важно развивать методы предиктивной аналитики, позволяющие предвидеть потенциальные проблемы на ранних стадиях их возникновения.

Также следует уделить разработке методик оценки экономической эффективности применения беспилотных технологий на разных этапах жизненного цикла. Это поможет оптимизировать распределение ресурсов и определить наиболее целесообразные точки внедрения инноваций.

Успешная реализация этих направлений позволит создать целостную систему мониторинга ГТС, охватывающую все этапы их жизненного цикла и обеспечивающую высокий уровень безопасности и эффективности эксплуатации сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фалеев М.И., Черных Г.С., Старостин А.С. Оценка опасностей и угроз, обусловленных катастрофическими наводнениями, и предложения по защите населения и территорий от них // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. Т. 4, № 2(7). С. 18-32.

2. Бирюков Е.С., Терентьев Н.Е. К оценке экономического ущерба от наводнений в России и потенциала адаптации // Теория и практика общественного развития. 2024. № 11(199). С. 162-168.

3. Проскура Д.Ю., Ткаченко Т.И. Экологические последствия наводнений и способы защиты от них // Научные труды Дальрыбвтуза. 2013. Т. 29. С. 24-30.

4. Борисов Д.М., Гончарова Н.Л. Направления эффективного регионального использования беспилотных летательных аппаратов в нефтегазовой отрасли России // Журнал правовых и экономических исследований. 2024. № 2. С. 162-171.

5. Вторый В.Ф., Вторый С.В. Перспективы экологического мониторинга сельскохозяйственных объектов с использованием беспилотных летательных // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. 2017. № 92. С. 158-166.

6. Сулейменов Б.У., Танирбергенов С.И. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов в точном земледелии: обзор // Почвоведение и агрохимия. 2018. № 2. С. 85-100.

7. Мельников Н.Н., Калашник А.И., Калашник Н.А., Запорожец Д.В. Комплексная многоуровневая система геомониторинга природно-технических объектов горнодобывающих комплексов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 4. С. 3-10.

8. Ахметзянова Л.Г., Усманов Б.М., Гафуров А.М., Селиванова Д.С. Применение дистанционного метода контроля, основанного на использовании данных БПЛА, для оценки остаточной емкости полигона отходов // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2022. Т. 8, № 4. С. 94-103.

9. Бреус Н.Л., Токарев А.Е., Токарев А.А. Технологии беспилотного пилотирования при контроле строительства и эксплуатации линейных объектов капитального строительства // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14, № 3. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://esj.today/PDF/17SAVN322.pdf.

10. Калашник А.И. Многоуровневая система мониторинга гидротехнических сооружений горнопромышленных предприятий и гидроэнергетики Мурманской области // Вестник Кольского научного центра РАН. 2019. № 2 (11). С. 45-53.

11. Разаков М.А. Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования мелиоративных гидротехнических сооружений // Аграрный научный журнал. 2022. № 8. С. 98-102.

12. Lunatsi M.É., Shpolyanskii Y.B., Sobolev V.Y. et al. Concept for Developing the Architecture of a Hardware-Software Package to Monitor Hydraulic Installation Status // Power Technology and Engineering. 2016. No. 50. P. 347-351.

13. Шоломицкий А.А., Ханнанов Р.Р., Тутанова М.С. Методика геодезического мониторинга за насыпными гидротехническими сооружениями // Вестник СГУГиТ. 2023. Т. 28, № 5. С. 25-32.

14. Охапкин Г.В., Веселов А.Б. Актуальность цифровой трансформации при обеспечении безопасности и надёжности гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2024. № 10. С. 41-44.

15. Рубин О.Д., Ханов Н.В., Лисичкин С.Е., Антонов А.С. Многофакторные исследования гидротехнических сооружений со сроком эксплуатации более 25 лет. М.: Мегаполис, 2023. 108 с.

16. Носков И.В., Носков К.И., Тиненская С.В., Ананьев С.А. Дрон-технологии в строительстве – современные решения и возможности / // Вестник евразийской науки. 2020. Т. 12, № 5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://esj.today/PDF/37SAVN520.pdf.

17. Колчин В.Н. Специфика применения технологии трёхмерного сканирования в строительстве и проектировании // Инновации и инвестиции. 2017. № 12. С. 252-257.

18. Siju N.M., Shafiyia S., Ben Maaouia M. Applications of drone technology in construction projects: a systematic literature review // International Journal of Research. 2022. Vol. 10, No. 10. P. 1-14.

REFERENCES

1. Faleev M.I., Chernykh G.S., Starostin A.S. *Ocenka opasnostej i ugroz, obuslovlennyh katastroficheskimi navodneniyami, i predlozheniya po zashchite naseleniya i territorij ot nih* [Assessment of hazards and threats caused by catastrophic floods and proposals for protecting the population and territories from them]. *Strategiya grazhdanskoj zashchity: problemy i issledovaniya*. 2014. Vol. 4, No. 2(7), pp. 18-32.

2. Biryukov E.S., Terentyev N.E. *K ocenke ekonomicheskogo ushcherba ot navodnenij v Rossii i potenciala adaptacii* [On the assessment of economic damage from floods in Russia and the potential for adaptation]. *Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya.* 2024. No. 11(199), pp. 162-168.

3. Proskura D.Y., Tkachenko T.I. *Ekologicheskie posledstviya navodnenij i sposoby zashchity ot nih* [Ecological consequences of floods and ways to protect against them]. *Nauchnye trudy Dal'rybvtuza.* 2013. Vol. 29, pp. 24-30.

4. Borisov D.M., Goncharova N.L. *Napravleniya effektivnogo regional'nogo ispol'zovaniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov v neftegazovoj otrasli Rossii* [Directions of effective regional use of unmanned aerial vehicles in the Russian oil and gas industry]. *Zhurnal pravovyh i ekonomicheskih issledovanij.* 2024. No. 2, pp. 162-171.

5. Vtoriy V.F., Vtoriy S.V. *Perspektivy ekologicheskogo monitoringa sel'skohozyajstvennyh ob"ektov s ispol'zovaniem bespilotnyh letatel'nyh* [Prospects of ecological monitoring of agricultural facilities using unmanned aerial vehicles]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva.* 2017. No. 92, pp. 158-166.

6. Suleimenov B.U., Tanirbergenov S.I. *Perspektivy primeneniya bespilotnyh letatel'nyh apparatov v tochnom zemledelii: obzor* [Prospects for the use of unmanned aerial vehicles in precision agriculture: a review]. *Pochvovedenie i agrohimiya.* 2018. No. 2, pp. 85-100.

7. Melnikov N.N., Kalashnik A.I., Kalashnik N.A., Zaporozhets D.V. *Kompleksnaya mnogourovnevaya sistema geomonitoringa prirodno-tekhnicheskih ob"ektov gornodobyvayushchih kompleksov* [Integrated multi-level system of geomonitoring of natural and technical objects of mining complexes]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh.* 2018. No. 4, pp. 3-10.

8. Akhmetzyanova L.G., Usmanov B.M., Gafurov A.M., Selivanova D.S. *Primenenie distancionnogo metoda kontrolya, osnovannogo na ispol'zovanii dannyh BPLA, dlya ocenki ostatochnoj emkosti poligona othodov* [Application of a remote control method based on the use of UAV data to assess the residual capacity of a landfill]. *Geopolitika i ekogeodinamika regionov.* 2022. Vol. 8, No. 4, pp. 94-103.

9. Breus N.L., Tokarev A.E., Tokarev A.A. *Tekhnologii bespilotnogo pilotirovaniya pri kontrole stroitel'stva i ekspluatacii linejnyh ob"ektov kapital'nogo stroitel'stva* [Technologies of unmanned piloting in the control of construction and operation of linear capital construction facilities]. *Vestnik evrazijskoj nauki.* 2022. Vol. 14, No. 3. Available at: https://esj.today/PDF/17SAVN322.pdf.

10. Kalashnik A.I. *Mnogourovnevaya sistema monitoringa gidrotekhnicheskih sooruzhenij gornopromyshlennyh predpriyatij i gidroenergetiki Murmanskoj oblasti* [Multilevel monitoring system for hydraulic structures of mining enterprises and hydropower industry in the Murmansk region]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo centra RAN*. 2019. No. 2 (11), pp. 45-53.

11. Razakov M.A. *Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlya obsledovaniya meliorativnyh gidrotekhnicheskih sooruzhenij* [The use of unmanned aerial vehicles for the inspection of reclamation hydraulic structures]. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal. 2022.* No. 8, pp. 98-102.

12. Lunatsi M.É., Shpolyanskii Y.B., Sobolev V.Y. et al. Concept for Developing the Architecture of a Hardware-Software Package to Monitor Hydraulic Installation Status. Power Technol. 2016. No. 50, pp. 347-351.

13. Sholomitsky A.A., Hannanov R.R., Tutanova M.S. *Metodika geodezicheskogo monitoringa za nasypnymi gidrotekhnicheskimi sooruzheniyami* [Methods of geodetic monitoring of bulk hydraulic structures]. Vestnik SGUGiT. 2023. Vol. 28, No. 5, pp. 25-32.

14. Okhapkin G.V., Veselov A.B. *Aktual'nost' cifrovoj transformacii pri obespechenii bezopasnosti i nadyozhnosti gidrotekhnicheskih sooruzhenij* [The relevance of digital transformation in ensuring the safety and reliability of hydraulic structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo*. 2024. No. 10, pp. 41-44.

15. Rubin O.D., Khanov N.V., Lisichkin S.E., Antonov A.S. *Mnogofaktornye issledovaniya gidrotekhnicheskih sooruzhenij so srokom ekspluatacii bolee 25 let* [Multifactorial studies of hydraulic structures with a service life of more than 25 years]. Moscow: Megapolis Publ., 2023. 108 p.

16. Noskov I.V., Noskov K.I., Tinenskaya S.V., Ananyev S.A. *Dron-tekhnologii v stroitel'stve – sovremennye resheniya i vozmozhnosti* [Drone technologies in construction - modern solutions and opportunities]. *Vestnik evrazijskoj nauki.* 2020. Vol. 12, No. 5. Available at: https://esj.today/PDF/37SAVN520.pdf.

17. Kolchin V.N. *Specifika primeneniya tekhnologii tryohmernogo skanirovaniya v stroitel'stve i proektirovanii* [Specifics of the application of three-dimensional scanning technology in construction and design]. *Innovacii i investicii.* 2017. No. 12, pp. 252-257.

18. Siju N.M., Shafiyia S., Ben Maaouia M. Applications of drone technology in construction projects: a systematic literature review. International Journal of Research. 2022. Vol. 10, No. 10, pp. 1-14.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Кадысева Анастасия Александровна – доктор биологических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА им.К.А.Тимирязева (127550,Россия, г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44с4, e-mail: kadyseva@mail.ru)	*Kadyseva Anastasia Alexandrovna* – Dr. Sci. (Biol), Assoc. Prof., Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy (44c4 B. Akademicheskaya St., Moscow, 127550, Russia, e-mail: kadyseva@mail.ru
Беда Даниил Андреевич – аспирант, Российский государственный аграрный университет – МСХА им.К.А.Тимирязева (127550,Россия, г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44с4, e-mail: beda_moscow007@mail.ru)	*Daniil Andreevich Beda* - Graduate student, Russian State Agrarian University named after K.A.Timiryazeva (44c4 B. Akademicheskaya St., Moscow, 127550, Russia, e-mail: beda_moscow007@mail.ru)
Миронов Виктор Владимирович – доктор технических наук, профессор, Тюменский индустриальный университет (625001, Россия, г. Тюмень, ул.Луначарского, д.4, e-mail: vvmironov@list.ru)	*Mironov Viktor Vladimirovich* – Dr. Sci. (Eng), Prof., Tyumen Industrial University (4 Lunacharsky St., Tyumen, 625001, Russia, e-mail: vvmironov@list.ru
Максимова Светлана Валентиновна – кандидат технических наук, доцент, Тюменский индустриальный университет (625001, Россия, г. Тюмень, ул. Луначарского, д.4, e-mail: maksimovasv@tyuiu.ru)	*Maximova Svetlana Valentinovna* – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Tyumen Industrial University (4 Lunacharsky St., Tyumen, 625001, Russia, e-mail: maksimovasv@tyuiu.ru)
Али Мунзер Сулеман – кандидат технических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА им.К.А.Тимирязева (127550, Россия, г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44с4, e-	*Ali Munzer Suleman* – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy (44c4 B. Akademicheskaya St., Moscow, 127550, Russia, e-mail: viv@rgau-msha.ru)

mail: viv@rgau-msha.ru)	
Лентяева Екатерина Алексеевна – кандидат технических наук, Российский государственный аграрный университет – МСХА им.К.А.Тимирязева (127550, Россия, г. Москва, ул. Б. Академическая, д. 44с4, e-mail: elentyaeva@mail.ru)	*Lentyaeva Ekaterina Alekseevna*– Ph.D. (Eng), Russian State Agrarian University – Timiryazev Agricultural Academy (44c4 B. Akademicheskaya St., Moscow, 127550, Russia, e-mail: elentyaeva@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 14.08.2025; одобрена после рецензирования 28.08.2025, принята к публикации 05.09.2025.

The article was submitted 14.08.2025; approved after reviewing 28.08.2025; accepted for publication 05.09.2025.