УДК 626/627:004.9:528.8(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-194-204

ЦИФРОВИЗАЦИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Н.В. Конюхов, Б.А. Ботоканова

Аннотация. Рассматриваются методологические и технологические основы интеграции беспилотных летательных аппаратов в цифровые процессы проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в горных условиях Кыргызской Республики. На основе систематизации международных нормативных документов (ICOLD, ASCE, ISO, ASPRS) и анализа современных практик дистанционного зондирования разработана трёхуровневая концептуальная модель применения беспилотных летательных аппаратов, обеспечивающая сквозную цифровизацию жизненного цикла гидротехнического сооружения. Особое внимание уделено требованиям к навигации (RTK/PPK, SLAM), модульным сенсорным конфигурациям (оптическая фотограмметрия, лидарное сканирование, тепловизионная диагностика, интегрированная батиметрия) и организации геопространственных данных в условиях сложного рельефа, сейсмической активности и селевой опасности. Результаты анализа подтверждают, что стандартизированное внедрение беспилотных летательных аппаратов позволяет повысить точность инженерных изысканий на 30–50 %, сократить сроки полевых работ на 40–70 % и обеспечить формирование единой цифровой модели объекта для принятия проектно-эксплуатационных решений. Статья содержит технические рекомендации по выбору платформ, планированию полётных заданий, обработке данных и интеграции результатов в информационные системы управления гидротехническими сооружениями.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты; цифровизация строительства; фотограмметрия; лидарное сканирование; SLAM-навигация; батиметрическая съёмка; мониторинг гидротехнических сооружений; горные условия; цифровые модели рельефа; Кыргызстан.

УЧКУЧСУЗ УЧУУЧУ АППАРАТТАРДЫ КОЛДОНУУНУН НЕГИЗИНДЕ КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫНЫН ГИДРОТЕХНИКАЛЫК КУРУЛУШУН САНАРИПТЕШТИРҮҮ

Н.В. Конюхов, Б.А. Ботоканова

Аннотация. Макалада Кыргыз Республикасынын тоолуу шарттарында гидротехникалык курулмаларды долбоорлоо, куруу жана пайдалануу процесстерине учкучсуз учуучу аппараттарды интеграциялоонун методологиялык жана технологиялык негиздери каралат. Эл аралык нормативдик документтердин (ICOLD, ASCE, ISO, ASPRS) системалаштырылышынын жана заманбап алыстан зонддоо тажрыйбаларынын негизинде гидротехникалык курулмалардын иштөө циклин толук санариптештирүүнү камсыз кылган УУАны колдоонунун үч деңгээлдүү концептуалдык модели иштелип чыккан. Навигацияга (RTK/PPK, SLAM), модулдук сенсордук конфигурацияларга (оптикалык фотограмметрия, лидардык сканирлөө, тепловизордук диагностика, интегралдык батиметрия) жана татаал рельеф, сейсмикалык активдүүлүк жана сел жүрүү коркунучу шарттарында геоаймактык маалыматтарды уюштурууга өзгөчө көңүл бөлүнгөн. Талдоонун жыйынтыктары стандартташтырылган УУАны киргизүү инженердик издөөлөрдүн тактыгын 30 - 50%га жогорулатып, талаа иштеринин мөөнөтүн 40 -70%га кыскартып, долбоорлоо жана пайдалануу чечимдерин кабыл алуу үчүн объекттин бирдиктүү санариптик моделин түзүүгө мүмкүндүк берерин тастыктайт. Макалада платформаларды тандоо, учуу тапшырмаларын пландаштыруу, маалыматтарды иштетүү жана натыйжаларды гидротехникалык курулмаларды башкаруунун маалыматтык системаларына интеграциялоо боюнча техникалык сунуштар камтылган.

Түйүндүү сөздөр: учкучсуз учуучу аппараттары; курулушту санариптештирүү; фотограмметрия; лидардык сканирлөө; SLAM-навигация; батиметриялык съемка; гидротехникалык курулмаларды мониторингдөө; тоолуу шарттар; рельефтин санариптик моделдери; Кыргызстан.

DIGITALIZATION OF HYDRAULIC INFRASTRUCTURE CONSTRUCTION IN THE KYRGYZ REPUBLIC BASED ON UNMANNED AERIAL SYSTEMS INTEGRATION

N.V. Konyukhov, B.A. Botokanova

Abstract. This study examines the methodological and technological foundations for integrating unmanned aerial vehicles (UAVs) into the digital workflows of designing, constructing, and operating hydraulic structures in the mountainous regions of the Kyrgyz Republic. Drawing on a systematic review of international standards and guidelines (ICOLD, ASCE, ISO, ASPRS) and contemporary remote sensing practices, a three-tier conceptual model for UAV deployment is proposed to enable end-to-end digitalization throughout the lifecycle of hydraulic infrastructure. Particular emphasis is placed on navigation requirements (RTK/PPK, SLAM-based positioning), modular sensor payloads (optical photogrammetry, LiDAR scanning, thermal diagnostics, and integrated bathymetry), and the management of geospatial data in challenging environments characterized by complex topography, seismic activity, and debris flow hazards. The findings indicate that standardized UAV integration can improve the accuracy of engineering site investigations by 30–50%, reduce field survey times by 40–70%, and facilitate the development of a unified digital asset model to support design and operational decision-making. This paper provides actionable technical recommendations for platform selection, flight mission planning, data processing workflows, and the integration of UAV-derived datasets into hydraulic infrastructure management information systems.

Keywords: unmanned aerial vehicles; construction digitalization; photogrammetry; LiDAR scanning; SLAM-based navigation; bathymetric surveying; hydraulic structures monitoring; mountainous environments; digital terrain models; Kyrgyzstan.

Введение. Кыргызская Республика обладает значительным гидроэнергетическим потенциалом, сосредоточенным преимущественно в высокогорных бассейнах Тянь-Шаня и Памиро-Алая. Проектирование, возведение и эксплуатация плотин, водозаборных узлов, деривационных каналов и малых ГЭС в данных условиях сопряжены с комплексом природно-технических ограничений: крутизной склонов (> 300), высокой сейсмичностью (до 9 баллов), сезонной изменчивостью стока, лавино- и селеопасностью, а также ограниченной транспортной доступностью объектов. Традиционные методы инженерных изысканий и эксплуатационного мониторинга, основанные на наземной геодезии и визуальных инспекциях, характеризуются высокой трудоёмкостью, дискретностью получаемых данных и повышенными требованиями к безопасности персонала. Практика использования БПЛА для дистанционной фото- и видеофиксации сложных ситуаций и объектов уже отражена в публикациях КРСУ [1].

В мировой инженерной практике беспилотные летательные аппараты (БПЛА) зарекомендовали себя как ключевой элемент цифровизации гидротехнического строительства, обеспечивая оперативное получение высокоточных пространственных данных, автоматизацию контроля качества и формирование цифровых двойников объектов. Несмотря на растущее число пилотных применений, в Центральной Азии отсутствуют унифицированные методические рекомендации по интеграции БПЛА в жизненный цикл ГТС, учитывающие специфику высокогорного рельефа, деградацию GNSS-сигнала в ущельях и требования международных стандартов безопасности плотин. Региональный контекст развития систем БПЛА в Центральной Азии и расширения сфер их применения рассмотрен в исследовании Б.Т. Какчекеева [2].

Цель исследования – разработка научно обоснованной концепции цифровизации гидротехнического строительства Кыргызской Республики на основе интеграции БПЛА в процессы инженерных изысканий, строительного контроля и эксплуатационного мониторинга.

Задачи исследования:

1. Систематизировать ограничения традиционных методов изысканий и мониторинга ГТС в горных условиях.
2. Провести сравнительный анализ сенсорных модулей БПЛА применительно к задачам гидротехнического строительства.
3. Разработать трёхуровневую концептуальную модель внедрения БПЛА на стадиях предпроектных изысканий, строительства и эксплуатации.

4. Сформулировать технические и организационные требования к выбору платформ, планированию полётов и обработке геопространственных данных.

Объектом исследования являются процессы инженерных изысканий, строительного контроля и эксплуатационного мониторинга гидротехнических сооружений (ГТС), возводимых и эксплуатируемых в высокогорных условиях Кыргызской Республики.

Предметом исследования выступают технологические решения, нормативно-технические регламенты и методические подходы к интеграции беспилотных авиационных систем (БАС) в цифровые процессы сопровождения жизненного цикла ГТС, включая получение, обработку и верификацию геопространственных данных.

Материалы и методы исследования. Методологическую основу работы составил комплексный подход, включающий три взаимосвязанных направления.

Во-первых, проведён систематический обзор и критический анализ научной литературы за период 2018 –2026 гг., индексируемой в базах данных Scopus и Web of Science, с фокусом на применение беспилотных авиационных систем (БАС) в гидротехническом строительстве и мониторинге инженерной инфраструктуры. Дополнительно в обзор включены публикации КРСУ, посвящённые радиомониторингу с применением искусственного интеллекта и БПЛА [3], вопросам национальной безопасности и роли радиомониторинга [4], городской топографической съёмке, инновационным методам нивелирования и LiDAR-решениям [5, 6]. Отдельно учитывались материалы о мониторинге чрезвычайных ситуаций, автоматизации оросительных систем [7] и цифровой трансформации сельского хозяйства [8, 9].

Во-вторых, выполнено обобщение и адаптация международных нормативно-технических документов, включая руководства Международной комиссии по большим плотинам (ICOLD) по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений и внедрению автоматизированных систем мониторинга, стандарты Американского общества инженеров-строителей (ASCE) по инструментальному контролю ГТС, а также международные стандарты ISO 19283 (мониторинг состояния гидроагрегатов) и ISO 19115 (геопространственные метаданные).

В-третьих, проведена сравнительно-техническая оценка коммерческих БПЛА-платформ и модулей полезной нагрузки на соответствие требованиям позиционной точности, установленным Американским обществом фотограмметрии и дистанционного зондирования (ASPRS). В качестве критерия валидности геопространственных данных принято значение среднеквадратического отклонения (RMSE) $\leq$ 5–10 см, достигаемое при использовании опорных наземных пунктов и кинематической привязки в реальном времени (RTK/PPK). При оценке условий функционирования цифровых комплексов также учитывались работы, посвящённые управлению спектром для новых технологий и воздушных платформ [10]. Интеграция указанных подходов позволила разработать научно обоснованную технологическую схему внедрения БПЛА, учитывающую инженерные, нормативные и эксплуатационные требования к гидротехническим объектам в горных условиях.

Разработка концептуальной модели осуществлена на основе структурированного анализа жизненного цикла гидротехнических сооружений (ГТС) и дифференцирована по пространственному масштабу съёмки, разрешающей способности сенсорных модулей и регламентной периодичности сбора данных. Верификация и нормативно-техническая апробация предложенных технологических регламентов выполнены посредством сравнительного анализа с эмпирическими данными опубликованных исследований применения БПЛА в горных регионах Центральной Азии, а также путём их согласования с допустимыми погрешностями исполнительной съёмки и мониторинга деформаций согласно стандартам ASPRS и руководствам ICOLD. Указанный подход обеспечивает методологическую преемственность между этапами предпроектных изысканий, строительного контроля и эксплуатационного мониторинга, что отражено в предлагаемой трёхуровневой технологической схеме.

Результаты исследования. Высокогорный рельеф Кыргызской Республики характеризуется комплексом природно-технических факторов, оказывающих критическое влияние на эффективность, безопасность и точность применения беспилотных авиационных систем. Крутизна склонов ($> 30^0$),

глубокое расчленение рельефа, перепады высот свыше 1500 м и ограниченная транспортная доступность обусловливают необходимость специализированного подхода к выбору летательных платформ, сенсорных модулей и алгоритмов планирования полётных заданий. Деградация сигнала глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) в узких каньонах, водосбросных тоннелях и закрытых галереях, а также высокие ветровые нагрузки, резкие суточные температурные градиенты и пылевые взвеси требуют применения аппаратов с резервированием навигационных систем, повышенной эксплуатационной устойчивостью и адаптивными режимами облёта.

На основе систематизации инженерно-геологических и климатических данных региона, а также верификации требований международных стандартов позиционной точности (ASPRS) и руководств по мониторингу ГТС (ICOLD) сформулированы базовые критерии выбора оборудования и организации съёмочных работ (таблица 1).

Применение указанных требований обеспечивает соответствие получаемых геопространственных данных критериям валидности, установленным в разделе методологии (RMSE ≤ 5–10 см при использовании опорных пунктов и кинематической привязки). При этом адаптация полётных заданий к локальным метеоусловиям и рельефу позволяет минимизировать риски потери аппарата, обеспечить непрерывность сбора данных на всех стадиях жизненного цикла ГТС и исключить необходимость присутствия персонала в зонах повышенной инженерно - геологической опасности.

Таблица 1 – Основные факторы горных условий и требования к применению БПЛА

Фактор	Характеристика условий	Требования к съемке и оборудованию
Рельеф	Крутые склоны, ущелья, перепады высот, ограниченные площадки запуска	Маневренные квадрокоптеры, точное планирование маршрута, обход препятствий
Навигация	Неустойчивый GNSS-сигнал в каньонах, тоннелях и узких долинах	GNSS/RTK, инерциальные датчики, SLAM-навигация для закрытых зон
Климат	Сильный ветер, резкие перепады температуры, пыль и осадки	Устойчивые платформы, защита корпуса, резерв аккумуляторов
Геодинамика	Сейсмичность, оползни, сели, эрозия берегов	Регулярные повторные съемки, сравнение цифровых моделей, автоматическое выявление изменений
Доступность	Удаленность объектов и отсутствие постоянных дорог	Дальность полета, автономность, компактные мобильные комплексы

На предпроектной стадии дроновая съёмка позволяет получить обзорные материалы по водосбору, руслу реки, возможным створам сооружений и подъездным трассам (рисунок 1). На стадии проектирования материалы фотограмметрии и лидарной съёмки используются для уточнения рельефа, оценки объёмов земляных работ и построения 3D-моделей. На стадии строительства БПЛА применяется для контроля фактического выполнения работ, сравнения проектных и исполнительных отметок, фиксации динамики строительства и оценки объёмов перемещения грунта. Практические решения по топографической съёмке и инженерным изысканиям с применением БПЛА и LiDAR отражены также в работах.

Результаты анализа показывают, что БПЛА целесообразно применять как элемент единой цифровой технологии сопровождения гидротехнического объекта. Наиболее востребованными являются аэрофотосъёмка с квадрокоптера, построение ортофотопланов и цифровых моделей рельефа, регулярная видеофиксация хода строительства, обследование водосбросов и откосов, а также мониторинг деформаций плотин и береговых склонов (рисунки 2, 3). Для мониторинга опасных процессов,



Рисунок 1 – Пример аэрофотосъемки с БПЛА
при мониторинге опасного участка рельефа



Рисунок 2 – Съемка с дрона оползневого и эрозионного участка,
важная для оценки рисков у гидротехнических объектов



Рисунок 3 – Квадрокоптер как мобильная платформа
для инженерной съемки и видеоинспекции

чрезвычайных ситуаций и объектов водного хозяйства подобные решения уже апробированы в региональной практике [7, 8].

Для гидротехнического строительства рекомендуется применять не один вид съемки, а комбинированный комплекс наблюдений. Аэрофотосъемка обеспечивает получение ортофотопланов и визуального архива состояния объекта (рисунки 4, 5). Лидарная съемка дает плотное облако точек для моделирования рельефа, откосов и тела плотины. Тепловизионная съемка может применяться для выявления локальных зон увлажнения, фильтрационных проявлений и температурных аномалий. Видеоинспекция полезна при контроле водосбросных галерей, каналов, шахт и труднодоступных участков. Батиметрическая съемка необходима при оценке заиления водохранилищ и русловых деформаций.

Для комплексного обследования ГТС рекомендуется применять модульную конфигурацию полезной нагрузки, дифференцированную по задачам цифрового сопровождения объекта (таблица 2).



Рисунок 4 – Иллюстративная схема маршрутной аэрофотосъемки створа гидроузла квадрокоптером

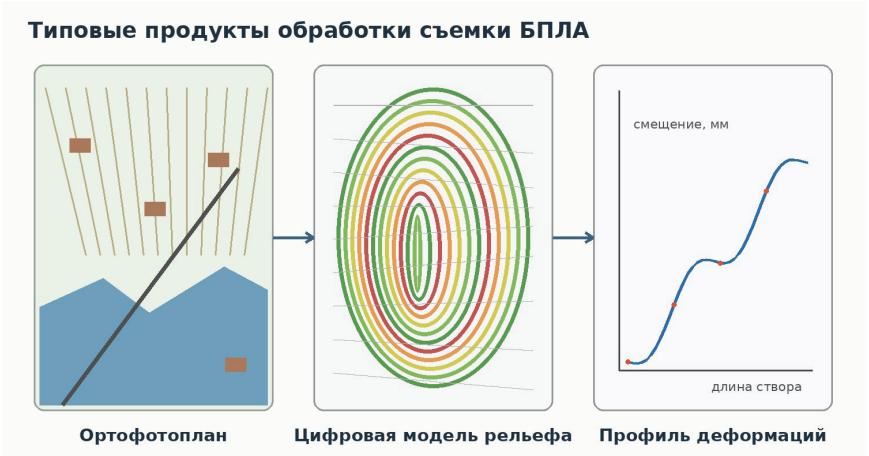


Рисунок 5 – Типовые продукты обработки съемки БПЛА: ортофотоплан, цифровая модель рельефа и профиль деформаций

Таблица 2 – Рекомендуемые виды съемок с БПЛА для гидротехнических объектов

Вид съемки	Основное оборудование	Получаемый результат	Применение
Аэрофотосъемка	Квадрокоптер, камера 20–40 Мп, RTK/GNSS	Ортофотоплан, фотоархив, визуальная модель объекта	Выбор створа, контроль строительства, обследование склонов
Фотограмметрия	Дрон с камерой, наземные контрольные точки	3D-модель, ЦМР, расчет объемов земляных масс	Исполнительная съемка, маркшейдерский контроль
Лидарная съемка	БПЛА с LiDAR-сканером	Облако точек высокой плотности	Крутые склоны, растительность, деформации
Тепловизионная съемка	Тепловизор на квадрокоптере	Карта температурных аномалий	Поиск фильтрации, влажных зон, аварийных участков
SLAM-инспекция	Дрон с лидаром, камерами и SLAM	Модель тоннеля или закрытой полости без GNSS	Водосбросные тоннели, штольни, подземные галереи
Батиметрическая съемка	Гидрографический БПЛА/катер, эхолот, совместная аэрофотосъемка	Карта глубин, модель дна, оценка заиления	Водохранилища, пруды-отстойники, русла рек

Одним из ключевых ограничений применения БПЛА в горных ущельях, водосбросных тоннелях и галереях является отсутствие или нестабильность сигнала глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS). Для решения данной задачи перспективны платформы с реализацией алгоритмов одновременной локализации и картографирования (SLAM – Simultaneous Localization and Mapping). Технология позволяет БПЛА строить карту окружающего пространства и определять собственное положение в реальном времени на основе данных инерциальных измерительных блоков (IMU), лидаров и/или стереокамер. В контексте гидротехнического строительства Кыргызстана это открывает возможности для безопасного обследования водосбросных туннелей, напорных галерей, узких каньонов и участков, где присутствие персонала сопряжено с риском обрушения или затопления. Дополнительным условием для устойчивой работы таких систем остаётся корректная организация радиоканалов и управления спектром [10]. Результатом съёмки является геопривязанное облако точек и панорамный видеоматериал, позволяющий выявлять трещины, отслоения облицовки и изменения геометрии с точностью до нескольких миллиметров (рисунок 6).

Для плотин, малых ГЭС и водозаборных узлов критически важен контроль не только надводной части сооружений, но и состояние дна водохранилищ, русел и береговых склонов. Заиление, перераспределение наносов и подмыв берегов напрямую влияют на гидравлический режим, пропускную способность и срок службы объекта. Перспективной является комбинированная схема: мультироторный БПЛА выполняет аэрофотосъёмку береговой линии и тела плотины, а автономный гидрографический аппарат или роботизированный катер с однолучевым/многолучевым эхолотом выполняет промер глубин по заранее заданной сетке. Синхронизация данных по времени и пространственным координатам позволяет сформировать единую трёхмерную модель чаши водохранилища, оценить объёмы осадконакопления и уточнить режимы промывки наносов. Точность такой интегрированной модели при наличии опорных точек составляет ± 5–10 см по вертикали и горизонтали, что соответствует требованиям инженерных изысканий для ГТС (рисунок 7).

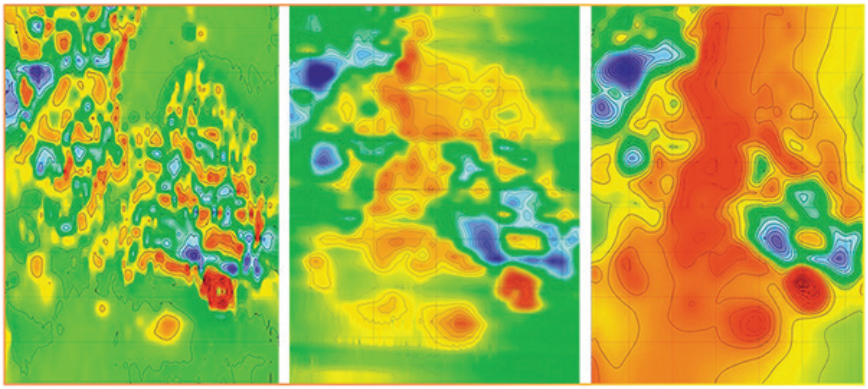


Рисунок 6 – Сравнение результатов съемки магнитного поля различными методами; применение БПЛА повышает детализацию данных на сложном рельефе



Рисунок 7 – Иллюстративная схема совместной съемки водохранилища: квадрокоптер контролирует надводные элементы, гидрографический БПЛА выполняет промер глубин

На участках строительства плотин и деривационных сооружений важна оценка инженерно-геологических условий основания. БПЛА с магнитометрами и спектральными сенсорами могут применяться для выявления аномальных зон, тектонических нарушений, участков повышенной трещиноватости, изменения растительного покрова и влажности грунтов (рисунок 8). Такие съемки особенно полезны на труднодоступных склонах и в районах, где наземные маршруты небезопасны.

На основе обобщения технологических решений предлагается трехуровневая модель применения БПЛА в горном гидротехническом строительстве Кыргызстана.

Уровень 1 – стратегическая съемка. Используются самолетные БПЛА или дроны с повышенной дальностью полета для обследования водосборов, выбора створа, оценки подъездов, селевых бассейнов и общей морфологии рельефа.

Уровень 2 – детальная инженерная съемка. Используются квадрокоптеры с фотограмметрическими камерами, RTK/GNSS, лидаром и тепловизором для построения ЦМР, ортофотопланов, 3D-моделей и исполнительной съемки.

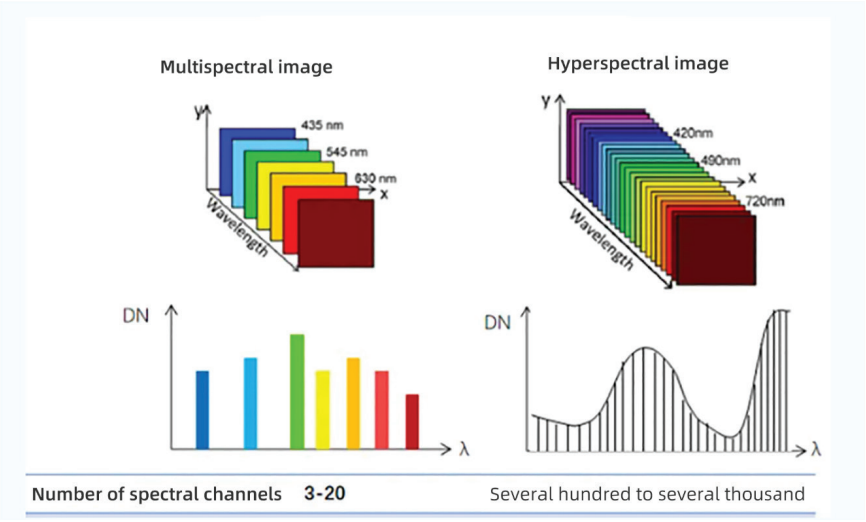


Рисунок 8 – Различие мультиспектральной и гиперспектральной съемки при дистанционном зондировании

Таблица 3 – Технические рекомендации по выбору БПЛА

Параметр	Рекомендуемое значение	Обоснование
Тип платформы	Квадрокоптеры для детальной съемки; самолетные БПЛА для площадных работ	Сочетание маневренности и дальности полета
Время полета	От 30 минут для коптеров; 3–5 часов для самолетных платформ	Учет удаленности объектов и времени на набор высоты
Навигация	GNSS/RTK, инерциальные датчики, SLAM для закрытых зон	Обеспечение работы в ущельях, каньонах и тоннелях
Полезная нагрузка	Фотокамера, лидар, тепловизор, газоанализатор или магнитометр по задаче	Универсальность комплекса при разных типах обследования
Точность геопривязки	5–10 см при использовании контрольных точек и RTK/GNSS	Достаточно для ортофотопланов, ЦМР и исполнительной съемки
Эксплуатационная устойчивость	Защита от пыли/влаги; запас аккумуляторов	Снижение риска отказа в горных условиях

Уровень 3 – эксплуатационный мониторинг. Используются регулярные маршруты облета, автоматизированные дроновые станции, SLAM-дроны и гидрографические БПЛА для контроля деформаций, фильтрации, заиления и аварийных ситуаций.

На основе обобщения технологических решений предлагается дифференцированная модель применения БПЛА, обеспечивающая сквозную цифровизацию жизненного цикла ГТС (таблица 3).

Обсуждение результатов. Предложенная система применения БПЛА согласуется с международными принципами обеспечения безопасности ГТС, изложенными в руководствах ICOLD и стандартах ASCE. Ключевые преимущества внедрения БПЛА в горных условиях Кыргызстана заключаются в следующем:

1. Повышение точности и полноты данных: фотограмметрия с поддержкой RTK/PPK обеспечивает позиционную точность 5–10 см, что позволяет выявлять деформации на ранних стадиях и минимизировать погрешности при расчёте объёмов земляных работ.

2. Снижение рисков для персонала: дистанционное обследование труднодоступных и опасных участков (водосбросы, оползневые склоны, зоны после паводков) минимизирует необходимость выхода специалистов в зону риска.

3. Оперативность реагирования: возможность быстрого развёртывания БПЛА после сейсмических событий или паводков позволяет оперативно оценить ущерб и спланировать восстановительные работы. Практика применения БПЛА для мониторинга чрезвычайных ситуаций в Кыргызстане подтверждает значимость такого сценария [7].

4. Экономическая эффективность: сокращение сроков полевых работ на 40–70 % и уменьшение потребности в тяжёлой технике компенсируют первоначальные инвестиции в оборудование и обучение.

Ограничения и пути их преодоления:

- ***Регуляторные барьеры:*** необходимость гармонизации национальных правил полётов БПЛА с требованиями к обследованию критической инфраструктуры. Региональный контекст таких ограничений и механизмов контроля прослеживается в публикациях КРСУ, посвящённых стратегической торговле, отношениям Турции и НАТО [11, 12], военно-техническому сотрудничеству стран Центральной Азии с Западом и сотрудничеству Турции со странами Центральной Азии [13, 14].
- ***Квалификация персонала:*** внедрение программ сертифицированного обучения операторов и инженеров-обработчиков данных.
- ***Обработка больших данных:*** разработка стандартизированных рабочих процессов (workflows) и интеграция с ГИС/ЦИМ-платформами.
- ***Стоимость специализированных сенсоров:*** поэтапное внедрение, начиная с базовых фотограмметрических конфигураций, с последующим расширением функционала.

Важно подчеркнуть, что БПЛА не заменяют, а дополняют традиционные методы мониторинга. Оптимальная стратегия – гибридный подход, сочетающий дистанционные съёмки с наземными измерениями (пьезометры, деформационные марки, визуальные инспекции) в рамках единой системы управления данными о состоянии ГТС. Такой подход согласуется с межотраслевым опытом цифрового внедрения беспилотных технологий в радиомониторинге и сельском хозяйстве.

Выводы

1. БПЛА являются эффективным инструментом цифровизации инженерных изысканий, строительного контроля и эксплуатационного мониторинга гидротехнических сооружений в горных условиях Кыргызской Республики.
2. Наибольшую практическую ценность для задач гидротехнического строительства имеют: оптическая фотограмметрия с кинематической привязкой (RTK/PPK), лидарное сканирование для моделирования рельефа, тепловизионная диагностика фильтрационных процессов, навигация SLAM для обследования закрытых сооружений и интегрированная аэро-батиметрическая съёмка водохранилищ.
3. Комплексное применение воздушной и гидрографической съёмки позволяет формировать единые трёхмерные информационные модели объектов, включающие ортофотопланы, цифровые модели рельефа, карты глубин, профили деформаций и визуальный архив состояния.
4. Для надёжного и масштабируемого внедрения БПЛА необходимы регламентированные процедуры планирования полётов, сертифицированная подготовка операторов, единая система хранения и обработки данных, а также интеграция результатов съёмки с проектными решениями и системами эксплуатационного мониторинга.
5. Предложенная трёхуровневая модель цифровизации может служить методической основой для разработки программ мониторинга плотин, водозаборных узлов, деривационных каналов и малых ГЭС в горных регионах Центральной Азии.

Поступила: 16.04.2026; рецензирована: 30.04.2026; принята: 04.05.2026.

Литература

1. *Сатыбалдинов М.Т.* Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов для фото-, видеофиксации места происшествия по делам о дорожно-транспортных происшествиях (по материалам уголовно-процессуального законодательства Республики Казахстан) / М.Т. Сатыбалдинов // Вестник КРСУ. 2015. Т. 15. № 12. С. 179–181 (дата обращения: 10.03.2026).
2. *Какчекеев Б.Т.* Обзор: развитие систем оборонных беспилотных летательных аппаратов в Центральной Азии / Б.Т. Какчекеев // Вестник КРСУ. 2023. Т. 23. № 3. С. 149–155. DOI: 10.36979/1694-500X-2023-23-3-149-155 (дата обращения: 16.03.2026).
3. *Мамадалиева Ж.Б.* Инновации в радиомониторинге Кыргызской Республики: применение искусственного интеллекта и беспилотных летательных аппаратов для устойчивого развития / Ж.Б. Мамадалиева, М.А. Малахов, В.Е. Канюк // Вестник КРСУ. 2025. Т. 25. № 4. С. 38–46. DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-4-38-46 (дата обращения 19.03.2026).
4. *Сагымбаев А.А.* Роль и место радиомониторинга в обеспечении национальной безопасности Кыргызской Республики / А.А. Сагымбаев, М.А. Малахов, В.Е. Канюк // Вестник КРСУ. 2025. Т. 25. № 4. С. 89–97. DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-4-89-97 (дата обращения: 26.03.2026).
5. *Султаналиева Т.* Производство топографической съёмки в условиях городской среды / Т. Султаналиева, Б. К. Токонбекова // Вестник КРСУ. 2025. Т. 25. № 12. С. 53–61. DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-12-53-61 (дата обращения: 01.04.2026).
6. *Султаналиева Т.* Инновационные методы нивелирования и их эффективность в инженерных изысканиях / Т. Султаналиева // Вестник КРСУ. 2025. Т. 25. № 8. С. 114–117. DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-114-117 (дата обращения: 03.04.2026).
7. *Батыкова А.Ж.* Автоматизация системы управления в оросительных системах для повышения эффективности водопользования / А.Ж. Батыкова, К.К. Бейшекеев // Вестник КРСУ. 2025. Т. 25. № 4. С. 20–27. DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-4-20-27 (дата обращения: 12.04.2026).
8. *Айталиев А.М.* Мониторинг и прогнозирование чрезвычайных ситуаций в Кыргызской Республике / А.М. Айталиев, Д.Ж. Сакыев, Н.Б. Спекторенко // Совершенствование системы прогнозирования, снижения и смягчения ущербов от опасностей: материалы V-й междунар. научно-практ. онлайн-конференции, посвященной памяти Бозова Кадырбека Дюшеналиевича. Бишкек: КРСУ, 2021. С. 15–19 (дата обращения: 10.04.2026).
9. *Баимова Ж.С.* Цифровая трансформация в сельском хозяйстве Кыргызстана: анализ использования данных и технологий для оптимизации производства / Ж.С. Баимова // Вестник КРСУ. 2024. Т. 24. № 3. С. 22–26. DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-3-22-26 (дата обращения: 10.02.2026).
10. *Джылышбаев М.Н.* Основные тенденции в управлении спектром для новых технологий в Кыргызской Республике / М.Н. Джылышбаев, С.Т. Оморова // Вестник КРСУ. 2024. Т. 24. № 8. С. 124–129. DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-8-124-129 (дата обращения: 10.03.2026).
11. *Какчекеев Б.Т.* Роль ОБСЕ в развитии механизмов контроля над стратегической торговлей в Центральной Азии / Б.Т. Какчекеев // Вестник КРСУ. 2022. Т. 22. № 7. С. 164–173. DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-7-164-173 (дата обращения: 17.03.2026).
12. *Колесникова М.А.* Отношения Турции и НАТО на современном этапе / М.А. Колесникова // Вестник КРСУ. 2024. Т. 24. № 7. С. 182–185. DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-7-182-185 (дата обращения: 15.04.2026).
13. *Какчекеев Б.Т.* Военно-техническое сотрудничество стран Центральной Азии с Западом / Б.Т. Какчекеев // Вестник КРСУ. 2021. Т. 21. № 11. С. 158–162 (дата обращения: 02.04.2026).
14. *Гарбузарова Е.Г.* Турция и страны Центральной Азии: акценты сотрудничества в меняющемся мире / Е.Г. Гарбузарова // Вестник КРСУ. 2024. Т. 24. № 3. С. 133–139. DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-3-133-139 (дата обращения: 10.04.2026).