



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

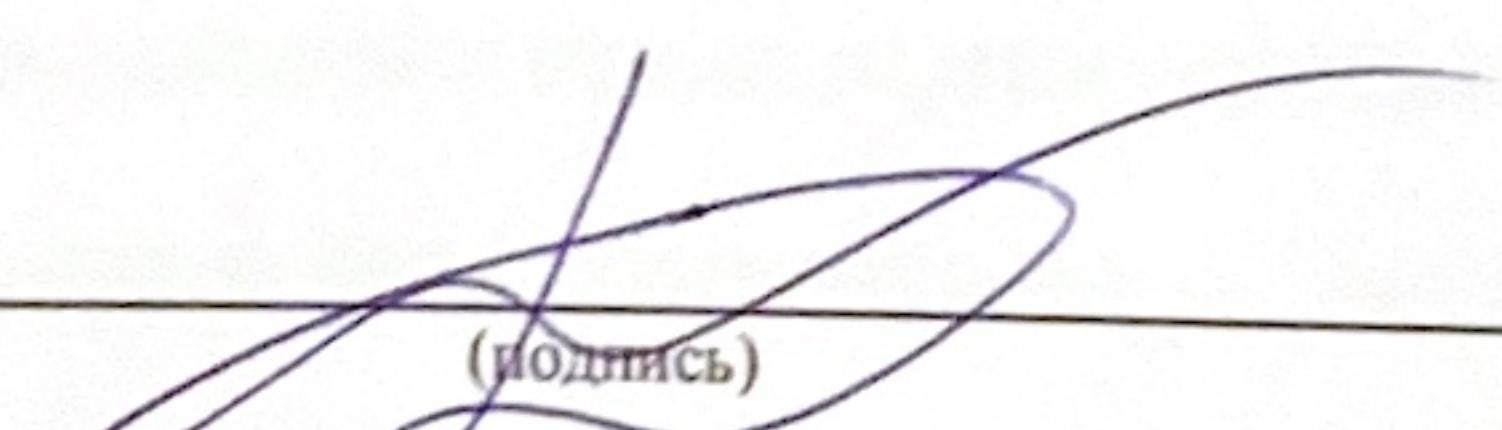
на тему **Применение беспилотных
летательных аппаратов для
пространственного мониторинга
на примере водных объектов**

Исполнитель Диденко Анастасия Юрьевна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель к.г.н. доцент, заведующий кафедрой
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)
К.Г.Н. доцент
(ученая степень, ученое звание)
Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«16» июня 2025г.

Санкт-Петербург
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ	8
1.1 Классические методы мониторинга и оборудование	8
1.2 Современные технологии и оборудование	12
1.3 Сравнительный анализ: классические методы и БПЛА	18
2 ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В СФЕРЕ МОНИТОРИНГА ЗА ВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ	21
2.1 Методы дистанционного мониторинга водных объектов	23
2.2 Мониторинг качества воды с помощью БПЛА	27
2.3 Мониторинг наводнений, опасных метеорологических и ледовых явлений с использованием БПЛА	32
2.4 Мониторинг изменений береговой линии и процессов эрозии с использованием БПЛА	39
3 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ БПЛА ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ	47
3.1 Методология и оборудование проведения полевых работ	47
3.2 Результаты проведенного мониторинга на р. Чеснава	51
3.3 Анализ данных: выводы и рекомендации	56
Заключение	60
Список используемых источников	64

ВВЕДЕНИЕ

Изображения земли, полученные с воздуха, дают широкие возможности для исследования процессов, происходящих на местности; для решения проблем комплексного мониторинга, изучения, освоения и рационального использования природных ресурсов исследуемой местности. Аэрофотоснимки являются одним из достоверных и надежных источников информации для проектов изучения местности, позволяют собрать большее количество информации, выполнять измерения быстрее, точнее и экономичнее по сравнению с наземными измерениями.

Преимущество аэрофотосъемки очевидно: за короткое время можно охватить большую территорию (за один полёт с помощью аэрофотосъемки можно охватить площадь до 1500 км^2). Применение аэрофотосъемки наиболее эффективно, особенно в труднодоступных районах, на больших реках, а также при выполнении некоторых работ, например, при мониторинге водных объектов.

Следующим витком развития аэрофотосъемки стало применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). На заре своего существования БПЛА применялись в военных целях, а сегодня уже появляется новая специальность «оператора по управлению беспилотными летательными аппаратами». Применение БПЛА в самых разных отраслях гражданской сферы демонстрирует огромный потенциал данного направления.

В настоящее время БПЛА стали важными инструментами для мониторинга и охраны водных зон. Эти летательные аппараты обеспечивают эффективную и безопасную альтернативу классическим методам наблюдения (такие как: наземные наблюдения на постах и станциях, гидрографические замеры, использование стационарных станций контроля качества воды и аналитические лаборатории, отбор проб воды и др.), а их адаптивность и универсальность делают их незаменимыми при решении задач, возникающих при выполнении работ на гидрологических объектах. БПЛА помогают

оперативно оценивать и отслеживать уровень загрязнения, цветение водорослей и другие факторы окружающей среды (экологические, физические, химические, биологические и др.).

Применение специализированных влагозащищённых беспилотных летательных аппаратов для пространственного мониторинга водных объектов имеет ряд достоинств и преимуществ, среди которых выделим:

- **устойчивость к погодным условиям:** в отличие от обычных беспилотников, влагозащищенные дроны могут продолжать работу во время сильных дождей, штормов и высокой влажности.
- **универсальность:** БПЛА можно развертывать в различных водных средах, от открытых океанов до небольших озер, соответствующим образом корректируя интегрированные комплексы обнаружения.
- **экономическая эффективность:** БПЛА снижают необходимость в дорогостоящих пилотируемых операциях, таких как облеты вертолетов или патрулирование лодок, что обеспечивает значительную экономию денежных средств, человеческих ресурсов и времени.
- **повышенная безопасность:** допуская удаленный мониторинг, влагозащищенные БПЛА минимизируют риски для операторов в опасных условиях.
- **данные в реальном времени:** дроны предоставляют видеопотоки в реальном времени, фотографии и данные датчиков, что ускоряет процесс принятия решений в критических ситуациях.

Помимо очевидных достоинств и преимуществ, применение беспилотных летательных аппаратов для пространственного мониторинга водных объектов имеет несколько недостатков и нюансов, среди которых выделим:

- небольшие БПЛА могут сбиваться с маршрута при наличии ветра более 10 м/с;

- помехами в съемках могут быть неоднородность ландшафта, атмосферный шум, положение солнца, столкновение с птицами, городские воздушные коммуникации и т.д;
- непродолжительное время полета;
- ограничения по весу и грузоподъемности.

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) или дронов уже давно получило более широкое применение и распространение, чем использование в силовых структурах и специализированно-комерческих сферах. Теперь их можно увидеть в частных руках. В сфере развлечения дроны за последние времена стали намного более доступны и получили набор серьезных инструментов – камеры, автопилоты и т.д. Стоимость их стала приемлемой, функционал вырос, управление стало проще. По всему миру разрабатываются и внедряются правила использования беспилотных летательных аппаратов для регулирования полетов и ликвидации потенциальных опасностей, которые не редкость [1].

Цель выпускной квалификационной работы: оценка возможности обеспечения достоверными качественными данными при применении беспилотных летательных аппаратов для пространственного мониторинга водных объектов.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- изучить существующие методики пространственного мониторинга с использованием БПЛА;
- определиться какие необходимые для мониторинга параметры окружающей среды можем получить посредством БПЛА;
- изучить рынок моделей БПЛА и выбрать наиболее оптимальное оборудование;
- провести сравнение данных полученных со съемок БПЛА с натурными данными.

В первой главе проведён анализ классических методов мониторинга водных объектов, таких как гидрографические замеры, использование стационарных станций контроля качества воды и аналитические лаборатории. Рассмотрено современное оборудование, включая БПЛА, их технические характеристики и возможности. При сравнение современных технологий акцент сделан на использовании БПЛА при сборе данных для изучения текущего состояния водоема.

Вторая глава посвящена применению БПЛА для мониторинга различных аспектов водных объектов, включая качество воды, экосистемы и изменение береговой линии. Приведены примеры успешных проектов и исследовательских работ, выполненных с помощью БПЛА. Повествование сосредоточено на методах сбора данных, их обработке и анализе.

В третьей главе представлено практическое исследование, основанное на проведённых полевых работах с БПЛА в конкретных водных объектах. Описываются технологии, используемые в процессе, проведенные замеры, а также полученные результаты и их анализ с точки зрения точности, эффективности и практического применения. Также обсуждается внедрение технологий в реальные проекты и условия, в которых они могут быть наиболее полезными.

В практическом аспекте полученные в результате работы материалы позволяют наметить возможные пути совершенствования методов применения БПЛА в сфере мониторинга водных объектов, совершенствование профессиональной деятельности сотрудников гидрометеорологической сферы, осуществляющих работу с БПЛА (увеличивается эффективность работы, качество полевых материалов улучшается). Более того, применение БПЛА оправдано и с экономической точки зрения, т.к. их использование на порядок дешевле спутниковых технологий и применения пилотируемой авиации. Помимо этого, беспилотник можно запрограммировать на полет по определенному маршруту (участку), и, в случае необходимости, он может зависнуть над интересующей местностью, объектом и т.д., что дает таким

аппаратам огромное преимущество над классическим методами наблюдения и мониторинга. Традиционные методы наблюдений и контроля не оперативны и характеризуют состав загрязнений объектов природной среды только в моменты проведения мониторинга на объекте. Неизвестно, что происходит с водным объектом в периоды между проведения мониторинга. К тому же лабораторные анализы занимают немалое время (включая и то, что требуется время для транспортировки отобранных проб с пункта наблюдения). Особенно эти методы неэффективны в экстремальных ситуациях, в случаях аварий. Они не оперативны и характеризуют исследуемый водный объект только в моменты проведения работ. Применение БПЛА позволяет проводить изучение и исследование труднодоступных участков водных объектов и их прибрежной территории, а при использовании специального оборудования, такого как лидар, возможности аэрофотосъемки расширяются.

Использование БПЛА является современной альтернативной заменой классическим методам по сбору гидрологической, топографической и экологической информации. Если раньше специалисту требовалось самому лично выезжать на обследуемый объект (участок проведения работ), проводить все необходимые замеры и измерения на местности, то теперь появилась возможность проводить необходимые полевые работы дистанционно и оперативно.

В настоящее время полностью перейти на дистанционные измерения не представляется возможным, в связи с тем, что, так или иначе, специалисту необходимо выезжать на осмотр исследуемой местности, на ее рекогносцировку, а также для того чтобы подготовить аппарат к полету. Однако, современные методы выполнения работ позволяют минимизировать долу участия человека.

1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

1.1 Классические методы мониторинга и оборудование

Мониторинг – это оценка состояния окружающей природной среды путем повторных наблюдений за ее элементами (компонентами) в пространстве и во времени с определенной целью, и по заранее подготовленной программе. Данные мониторинга о состоянии водных объектов и об их использовании являются основой для разработки мероприятий по охране водных объектов и при составлении схем комплексного использования вод.

Мониторинг осуществляется в следующих целях:

- своевременное выявление и прогнозирование негативного воздействия вод, а также развитие негативных процессов, влияющих на качество воды в водных объектах и их состояние, разработка и реализация мер по предотвращению негативных последствий этих процессов;
- оценка эффективности осуществляемых мероприятий по охране водных объектов;
- информационное обеспечение управления в области использования и охраны водных объектов.

Мониторинг включает в себя:

- регулярные наблюдения за состоянием водного объекта, количественным и качественным показателем состояния водных ресурсов, а также режимом использования водоохранных зон;
- сбор, обработка и хранение сведений, полученных в результате наблюдений;
- внесение полученных сведений в государственный Водный реестр;
- оценка и прогноз изменений состояния водных объектов [2].

Мониторинг состоит из:

- мониторинга поверхностных водных объектов с учетом данных мониторинга, осуществляемого при проведении работ в области гидрометеорологии и смежных с ней областях;
- мониторинга состояния дна и берегов водных объектов, а также состояния водоохранных зон;
- мониторинга подземных вод с учетом данных государственного мониторинга состояния недр;
- наблюдений за водохозяйственными системами, в том числе за гидротехническими сооружениями, а также за объемом вод при водопотреблении и сбросе вод, в том числе сточных, в водные объекты.

Мониторинг может осуществляться в различных масштабах и различными методами.

В обязательную программу мониторинга входит:

- определение расхода воды, соблюдение правил контроля качества воды водоемов и (или) водотоков, измерение или вычисление скорости течения, м/с (при опорных измерениях расхода) (на водотоках) или наблюдения за уровенным режимом на водоёме.
- произведение визуальных наблюдений, а именно: температурный показатель, цветность, градусы, прозрачность, запах, концентрации взвешенных веществ, показателя водорода pH , концентрация растворенных в воде различных, окислительно-восстановительный потенциал химических элементов, концентрация главных ионов;
- наблюдение за химическим и биохимическим потреблением кислорода (последнего – за 5 суток), концентрацией различных биогенных элементов – общего железа, нефтепродуктов и другое.

Рассмотрим традиционные (классические) методы проведения мониторинга водных объектов.

Наземные (натурные) наблюдения. Мониторинг водных объектов должен включать наблюдения за источниками и характером воздействия;

состоянием водной среды в целом. Для определения динамики изменений состояния водной среды измерения должны проводиться через определённые интервалы времени, а по важнейшим показателям – непрерывно. Для выделения антропогенных воздействий необходимо знать первоначальное состояние системы. Для этого необходима информация о фоновом состоянии водной среды (наблюдения на местах, удалённых от источников воздействия), как в целом, так и каждого региона, и района. Мониторинг водных объектов включает наблюдения за поверхностными и подземными водами, донными отложениями и взвесями.

В состав натурных наблюдений входят следующие виды работ:

- визуальные наблюдения за состоянием водного объекта, рельефа дна, берегов и водоохранной зоны;
- определение характеристик состояния гидрологического режима (уровня воды и ледовых условий);
- гидрографическая съемка водного объекта для определения фактического планового и высотного положения отметок рельефа дна в пределах зоны возможных деформаций и переформирований;
- геодезическая (топографическая) съемка берегов водного объекта для определения фактического планового и высотного положения отметок склонов берегов в пределах зоны возможных деформаций и переформирований;
- фото- и видеофиксация проявлений негативных процессов в водоохранной зоне и фактов их воздействия на хозяйствственные объекты.

Биоиндикационные методы. Биоиндикация – метод обнаружения и оценки воздействия абиотических и биотических факторов на живые организмы при помощи биологических систем, обнаружения и определения антропогенных нагрузок по реакциям на них живых организмов и их сообществ. Это исследование группы особей одного вида или биотических сообществ, по наличию, состоянию, и поведению которых судят об изменениях.

Физико-химические методы. В основном анализ поверхностных вод осуществляется в лабораториях путем забора проб воды и грунта на сети станций и постов за исключением тех анализов, которые проводятся непосредственно на борту судна, выполняющего исследование.

Для проведения физико-химического анализа воды или грунта необходимо правильно провести отбор проб. Проба воды или грунта для анализа может быть получена путем однократного отбора всего количества материала, необходимого для анализа. Проба должна характеризовать водный объект или его определённую часть за определённый промежуток времени.

Для оценки динамики содержания загрязняющих веществ в донных отложениях и репрезентативности результата пробы отбирают на одном и том же участке водного объекта. Для этого необходимо место отбора проб закрепить одним из следующих вариантов: установка буя, забивка шпунта, определение азимута и расстояния от реперной точки.

Основные характеристики донных отложений водных объектов выделяются с учетом условий их формирования, например, интенсивности поступления и состав осадочного вещества, окислительно-восстановительные условия, гидрологический режим, характеристика внешних источников воздействия на водный объект.

Классические методы наблюдений и контроля имеют один принципиальный недостаток – они не оперативны и, кроме того, характеризуют состав загрязнений объектов природной среды только в моменты отбора проб. О том, что происходит с водным объектом в периоды между отборами проб, можно только догадываться. К тому же лабораторные анализы занимают немалое время (включая и то, что требуется для доставки пробы с пункта наблюдения). Особенno эти методы неэффективны в экстремальных ситуациях, в случаях аварий [3, 4].

1.2 Современные технологии и оборудование

В историческом аспекте БПЛА в своем развитии прошли несколько этапов:

1. С 1848 г – до начала ХХ века. Этот период отмечен первыми примитивными попытками и первыми экспериментами по созданию БПЛА, разработкой теоретических основ аэродинамики и теории самолета.

2. Начало ХХ века – до 1945 г. В этот период актуализировался вопрос применения БПЛА в военных целях. БПЛА представляли собой самолеты – снаряды с небольшой дальностью и продолжительностью полета.

3. 1945 – 1960-е гг – время преобладания беспилотников – разведчиков, расширение назначения БПЛА.

4. 1960-е гг – по настоящее время – период расширения классификации и усовершенствование БПЛА по назначению.

История показывает, что основное развитие научной и технической базы происходит в военных отраслях, а в дальнейшем наработки применяются и в гражданской области. Несмотря на развитие БПЛА в военной сфере, нельзя забывать и о гражданском применении данных аппаратов. Подобных аппаратов с каждым годом появляется все больше и больше. БПЛА, разработанные частными компаниями являются более развитыми в технологическом плане за счет своей узкой специализации и малых объемов производства. Заказы от государственных организаций таких как МЧС и МВД, предъявляют конкретные требования к беспилотным летательным аппаратам, что позволяет инженерам производителей более оперативно реагировать на изменение рынка потребителей.

История развития гражданских БПЛА насчитывает гораздо меньше времени в отличие от своих военных предков, ведь первые гражданские БПЛА появились лишь в 2000 году и существенно отличались от своих предшественников, не смотря на позднее начало развития имея опыт военных наработок, темпы развития БПЛА в гражданской сфере впечатляют.

Уже сейчас в США законодатели серьезно обеспокоены появлением большого количества малых летательных дронов, на данный момент достаточно много появляется стартапов, предлагающих производить не только крупные беспилотные самолеты, но и небольшие управляемые летательные аппараты для быта.

В последнее время много говорят об автоматизации о машинах без водителей, дистанционном управлении аватарами и подобных вещах. Так, например, глава Amazon Джек Бозос, крупнейшего онлайн магазина, пообещал своим пользователям купивших у них товар, доставлять инновационным способом, а именно, если покупатель находится на расстоянии не более 15 км от складов компании, то в течении полчаса к нему на порог приземлится БПЛА с посылкой. Обещание звучит фантастически, но уже частично воплощено в жизнь и БПЛА проходят испытания. Правда имеется ряд ограничений и сложностей, помимо ранее сказанного ограничения расстояния от склада, имеется ограничение на вес посылки, которая не должна превышать 2 кг (аналитики Amazon, утверждают, что более 80% заказов весят меньше 2 кг). Помимо ограничений имеются и трудности, например, БПЛА могут сбить и украсть посылку, по мимо всего прочего законодательная база еще не совершенна и требует доработки в правовой сфере данного вопроса.

Потенциал использования БПЛА в гражданской отрасли растет с каждым годом, тем более что многие виды БПЛА разрабатываются частными компаниями, и, учитывая их более узкую специализацию в технологическим плане и небольшие объемы производства, разработчикам удается оперативно реагировать на изменение потребительского спроса и развития рынка.

Сфера применения гражданских БПЛА весьма обширны – это и аэросъемка, и доставка грузов, отдых и досуг, следственные действия и т.д. Конструкционно речь идет о мультикоптерах и аппаратах самолетного типа. О доступности их использования говорит тот факт, что при соответствующих знаниях и навыках, подобные аппараты можно сделать самому, купив

определенные комплектующие. Популярность беспилотников достаточно иллюстративно подчеркивает пример французской фирмы Parrot, которая в 2010 г создала беспилотный летательный аппарат AR.Drone, позднее обновленный до версии Parrot AR.Drone 2.0 (Рисунок 1.1). Этот беспилотник стал хитом, поскольку разработчики заявили о том, что этот проект полностью открыт для идей пользователей.

Говоря о перспективах развития БПЛА коротко отметим, что технический и технологический вектор направлен в сторону применения в системе управления искусственного интеллекта, позволяя развивать функции автопилота, автоматизировать беспилотные аппараты, в этом случае действия оператора сводятся только к подготовке аппарату к началу полёта и непосредственно к самому запуску.



Рисунок 1.1 – Внешний вид Parrot AR.Drone 2.0.

БПЛА подразделяются на аппараты самолетного типа и вертолетного, т.е. вертолеты и мультикоптеры – аппараты с четырьмя и более роторами с несущими винтами, к слову сказать, наиболее распространенные в гражданской сфере (именно их в обиходе называют «дроны») (Рисунок 1.2 – 1.3)



Рисунок 1.2 – БПЛА самолетного типа



Рисунок 1.3 – Квадрокоптер

Ввиду того, что сегодня существует огромное количество моделей БПЛА, возникает трудности в их классификации. Модели БПЛА отличаются по своим характеристикам ввиду обилия конфигураций и компонентов, да и сами производители не ограничены никакими стандартами со стороны авиационных регуляторов [6, 7].

БПЛА можно классифицировать по следующим основным характеристикам:

- по дизайну / конфигурации;
- по типу взлета;
- по целевому назначению;
- по техническим характеристикам;
- по типу питания силовой установки;
- по полезной нагрузке;
- по типу системы автоматизации;
- по системе предотвращения столкновений;
- по типу навигации;
- по типам защиты от глушиения сигналов;
- по пропускной способности радиочастотного спектра;
- по бортовой обработке данных;
- по специализации программного обеспечения.

Согласно же Большой российской энциклопедии БПЛА подразделяются по принципу полета на [8]:

- БПЛА с жестким крылом (самолётного типа);
- с гибким крылом;
- с вращающимся крылом (вертолётного типа);
- с машущим крылом;
- аэростатического типа;
- а также на различные гибридные подклассы аппаратов, которые трудно однозначно отнести к какой-либо из перечисленных групп.

Более того, классификационные признаки можно выделить по конструкции:

- Беспилотники с фиксированным крылом. К их преимуществам можно отнести большую дальность и скорость полета.
- Мультикоптеры. Они могут иметь разное число пропеллеров: от 2-х до 8-ми. Пропеллеры у некоторых моделей могут складываться.
- Беспилотники вертолетного типа.
- Конвертопланы. Особенность таких моделей в том, что они взлетают «по вертолетному», а в полете передвигаются подобно самолету, опираясь на крылья.
- Глайдеры или планеры. Эти устройства могут быть с двигателем или без двигателя. В большинстве случаев их используют для разведывательных операций.
- Тейлситтеры. БПЛА для смены режима полета поворачивает свою конструкцию в вертикальной плоскости.
- Экзотические. Эти устройства имеют нетипичную конструкцию, к примеру, аппараты, способные садиться на воду, взлетать с нее и погружаться в нее. Также это могут быть устройства, которые приземляются на вертикальную поверхность и могут карабкаться по ней.
- Привязные беспилотники. Их особенность в том, что энергия поступает к такому аппарату по проводу.
- Миниатюрные.
- Модульные.

Лидер в области разработки БПЛА – США В 2014 г. разделило БПЛА на классы. Каждый класс соответствует классу воздушного пространства, в котором беспилотник способен летать. Так, класс G включает в себя аппараты, способные подняться на высоту до 360 метров. К классам B, C, D относятся аппараты, летающие на высоте до 3000 метров. Класс A – это беспилотники, покорившие высоту от 5400 до 18 000 метров. Соответственно

технические характеристики БПЛА будут зависеть от того, к какому типу относится то или иной БПЛА.

В рамках данной работы представляется не совсем нужным вдаваться в технические подробности описания всех типов БПЛА, тем более, что они максимально полно описаны в специальной технической литературе [5, 6].

1.3 Сравнительный анализ: классические методы и БПЛА

Традиционный мониторинг водных объектов в основном заключается в проведение работ на месте (например, отбор проб воды) и лабораторном анализе. Этот метод мониторинга проводится в течение многих лет в определенных точках забора проб с последующим лабораторным анализом. Хотя он может достичь определенной степени точности, но не может отражать общие пространственные и временные условия качества воды, является трудоемким, а область мониторинга имеет локальный характер. Он не может удовлетворить требованиям оперативного и крупномасштабного мониторинга, оценки в режиме реального времени.

Развитие и прогресс технологий дистанционного зондирования открыли новые возможности для мониторинга и исследования рек и озер. Технология мониторинга качества воды с помощью дистанционного зондирования с высокой динамикой, низкой стоимостью, макроскопическими и другими важными характеристиками в исследованиях загрязнения воды имеет преимущества, которые не могут быть заменены обычным способом. Она может не только помочь в крупномасштабном мониторинге качества воды, но также будет отражать его распределение и изменения в пространстве и времени, компенсировать недостатки единоразового отбора проб, выявить миграции характеристик загрязняющих веществ и масштабы воздействия, чтобы обеспечить научную основу для развертывания пунктов отбора проб. Гиперспектральная съемка широко используется в дистанционном мониторинге качества воды благодаря своей

высокой точности, множеству съемочных каналов, огромному объему информации и другим характеристикам, что значительно повышает точность оценки параметров. Наряду с непрерывным развитием технологий дистанционного зондирования, мониторинг качества воды перешел от качественного описания к количественному анализу, в то время как параметры качества воды, которые можно контролировать, постепенно увеличивались, а точность инверсии улучшалась, играя важную роль в защите, планировании и устойчивом развитии водных ресурсов. Современные технологии основаны в том числе на использовании БПЛА, что позволяет расширить перспективы их использования.

В настоящее время БПЛА со спектрометром может использоваться для мониторинга концентрации взвешенных веществ, мутности, прозрачности, общей концентрации фосфора, общей концентрации азота, глубины воды, химической потребности в кислороде (ХПК) рек и озер (Рисунок 1.4).

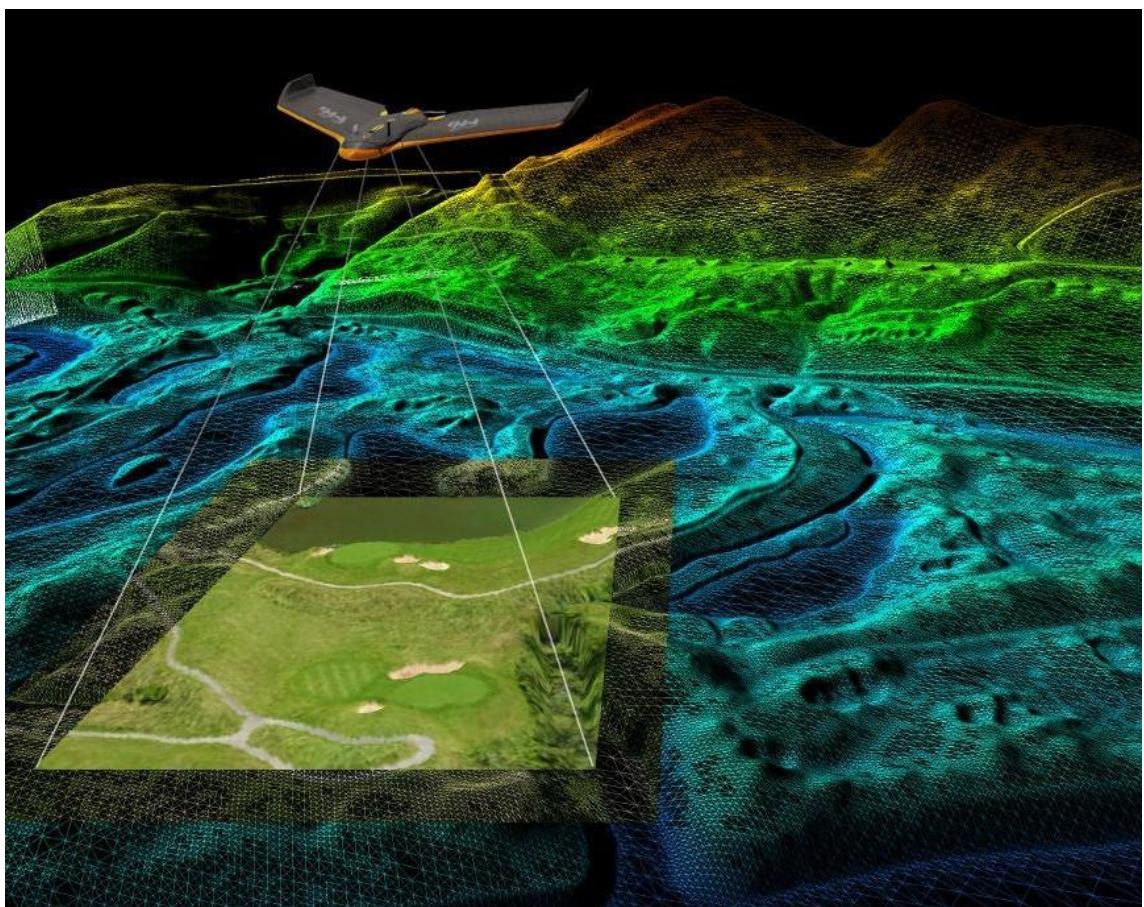


Рисунок 1.4 – Исследование загрязненной поверхности

Большое значение при мониторинге водных объектов имеет своевременное выявление и прогнозирование негативного воздействия вод, а также развития негативных процессов, влияющих на качество воды в водных объектах и их состояние, разработка и реализация мер по предотвращению негативных последствий этих процессов, оценивание эффективности осуществляемых мероприятий по охране водных объектов [9].

Также БПЛА применяют при мониторинге селей и наводнений, при мониторинге уникальных гидротехнических сооружений таких как плотины и дамбы.

Стоит отметить, что очень важно своевременное информационное обеспечение управления в области использования и охраны водных объектов.

2 ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В СФЕРЕ МОНИТОРИНГА ЗА ВОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Применение БПЛА актуализируется в тех областях, где критерий мобильности и высокого качества информации, его полноты и всеобъемлющего характера, являются первостепенной задачей. Крупные промышленные корпорации, с разветвленной региональной сетью могут решать проблемы и задачи с учетом применения БПЛА, в частности, интегрировав такие аппараты в ежедневный операционный процесс, создавая, например, конкурентные преимущества в проектах в сфере крупного капитального строительства, сельском хозяйстве и т.д.

БПЛА применяются в сфере объектов инфраструктуры, в сельском хозяйстве, в энергетике, в сфере строительства и проектирования, в транспортной сфере, в медицине, в индустрии развлечений и СМИ, в телекоммуникационной сфере. Можно еще долго перечислять те области, в которых применяются БПЛА – это и сфера безопасности, и мониторинг дорожного движения, и горнодобывающая, нефтеперерабатывающая и химическая промышленность, и проведение планово-спасательных и экстренных ситуаций.

В пределах тематики выпускной квалификационной работы остановимся на применении БПЛА в сфере пространственного мониторинга за водными объектами.

Беспилотные летательные аппараты в последние годы все чаще используются и в гидрологии. Если раньше обследование обширных водных поверхностей осуществлялось авиационными комплексами, состоящими из самолетов, вертолетов или зондов, то в последние несколько лет интенсивно развиваются направления по использованию беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Использование этих технологий обладают рядом преимуществ: БПЛА не требуют специально подготовленных площадок или

стартовых комплексов, и в отличие от больших авиакомплексов их стоимость значительно ниже, а работа не связана с риском для человека, так как экипажа на борту нет [9, 10].



Рисунок 2.1 – Пример аэрофотосъемки с БПЛА

БПЛА в гидрологии применяются как с исследовательскими целями, так и с целью периодического мониторинга водных объектов. Использование БПЛА в сфере мониторинга за водными объектами обусловлено их экономичностью и простотой применения. Данные, получаемые с БПЛА, дают исследователям существенно более полную информацию, чем точечные наблюдения на гидрологических постах и метеорологических станциях. Кроме того, использование беспилотных летательных аппаратов позволяет увеличить частоту и расширить зону измерений. Особенно актуально использование беспилотников в труднодоступных районах, где

немногочисленные метеорологические станции и гидрологические посты располагаются на большом расстоянии друг от друга.

2.1 Методы дистанционного мониторинга водных объектов

С помощью БПЛА предоставляется возможном выполнять мониторинг следующих характеристик и параметров водной среды:

➤ Гидрологические параметры:

- Скорость течения и расход воды. Для этого используют фотоизображения, лазерное и радиолокационное зондирование, привязные устройства.
- Глубина. Дроны, оснащённые датчиком проводимости, температуры и глубины, способны измерять состояние воды на глубине до 100 м.
- Температура воды.

➤ Физико-химические параметры (БПЛА со спектрометром):

- показатель pH ;
- солёность;
- мутность;
- прозрачность;
- содержание растворённого кислорода;
- биохимическая потребность в кислороде (БПК);
- химическая потребность в кислороде (ХПК);
- концентрация взвешенных веществ;
- химический состав воды, в том числе концентрация тяжёлых металлов, нефтепродуктов и фенолов.

➤ Качество воды. Камеры в УФ-диапазоне используются для изучения качества воды и сбора информации о наличии диатомовых водорослей, отдельных видов бактерий и ряда беспозвоночных животных и

ракообразных. Численность и разнообразие фитопланктона – этот биологический параметр часто используется для мониторинга качества водных объектов.

Также с помощью БПЛА предоставляется возможном мониторить состояние дна и берегов водных объектов, а также водоохранных зон, зон затопления, подтопления.

Наиболее распространенными методами дистанционного мониторинга являются:

- Визуальный – метод, позволяющий получить информацию путем фотографирования поверхности воды с борта беспилотного летательного аппарата;
- фотометрический – фотографирование водной поверхности в ультрафиолетовых или инфракрасных лучах.

Дистанционные методы мониторинга делятся на пассивные и активные. Пассивные методы предполагают регистрацию теплового излучения инспектируемой поверхности, отраженного солнечного излучения, а также собственного гамма-излучения воды. При применении активных методов поверхность облучается излучением искусственного источника, а устройства регистрируют отраженное или флуоресцентное излучение [9].

Тепловое инфракрасное излучение. Регистрация прямого и рассеянного солнечного излучения такими устройствами, как спектрорадиометр или дифференциальный радиометр, позволяет определить изменения характеристик водной толщи благодаря контрасту чистой и загрязненной водной поверхности, их разным излучательным способностям и температурам.

Пассивная микроволновая радиометрия. Метод дает возможность определять изменения наблюдаемых параметров водной толщи на основе измерения двух или нескольких частот путем регистрации собственного теплового излучения микроволновым радиометром.

Ультрафиолетовое излучение. Мониторинг поверхности воды проводится с использованием ультрафиолетового диапазона возможно благодаря свойству водной поверхности, в зависимости от степени его измененности и загрязненности, по-разному отражать ультрафиолетовую составляющую солнечного излучения – по сравнению с поверхностью воды массивные измененные или загрязненные участки обладают большей отражающей способностью, тонкие – меньшей [9, 10].

Радиолокация. Данный метод способен обнаруживать изменения характеристик и параметров водной среды ввиду разницы в физическом состоянии чистой и загрязнённой водной поверхности.

Лазерный локатор. Водная поверхность освещается монохроматическим лазерным лучом в ближнем ультрафиолетовом или видимом диапазонах длин волн, затем в системе с лазерным локатором обнаруживается отраженный и/или флуоресцентный свет.

Мультиспектральная съемка. При мультиспектральной съемке формируется одновременно несколько изображений одной и той же территории в различных зонах спектра электромагнитного излучения. Различные комбинации этих изображений позволяют выявить процессы и явления, которые сложно или невозможно определить на снимке в видимом спектре [9, 10].

Гиперспектральная съемка. Гиперспектральный снимок – многомерное пространственно-спектральное изображение, в котором каждый пиксель характеризуется собственным спектром – от 200 до 1000 спектральных каналов (Рисунок 2.2). Гиперспектральная съемка позволяет идентифицировать объекты по их физико-химическому составу. Гиперспектральная камера разделяет отражённый от объекта свет на узкие спектральные полосы, записывает и обрабатывает их по отдельности, фиксируя спектральную характеристику каждого пикселя получаемого изображения [9, 10].

Гиперспектральная съемка широко используется в дистанционном мониторинге качества воды благодаря своей высокой точности, множеству съемочных каналов, огромному объему информации и другим характеристикам, что значительно повышает точность оценки параметров. Наряду с непрерывным развитием технологий дистанционного зондирования, мониторинг качества воды перешел от качественного описания к количественному анализу, в то время как параметры качества воды, которые можно контролировать, постепенно увеличивались, а точность инверсии улучшалась, играя важную роль в защите, планировании и устойчивом развитии водных ресурсов. Современные технологии основаны в том числе на использовании БПЛА, что позволяет расширить перспективы их использования.

Стоит отметить, необходимо учитывать, что на гиперспектральные снимки, полученные камерой, может повлиять атмосфера, водяной пар и другие факторы, после того, как БПЛА поднимется на определенную высоту.



Рисунок 2.2 – Гиперспектральная съемка

Оценка количества загрязняющего вещества. Площадь поверхности пятна или скопления сгустков можно подсчитать непосредственно с помощью системы спутниковой навигации (Global Positioning System – GPS), датчиками радиолокации или инфракрасного/ультрафиолетового сканера [11].

2.2 Мониторинг качества воды с помощью БПЛА

Беспилотная система, предназначенная для отбора проб воды и измерения ее качества, должна быть полностью водонепроницаема и должна уметь плавать на воде (Рисунок 2.3 – 2.4). Ученые могут летать на дроне в отдаленные водоемы и быстро доставлять пробы на берег. Если беспилотник оснащен зондами, он может даже приземляться на воду для немедленного анализа качества воды. Система мониторинга качества воды с использованием БПЛА повышает безопасность, точность и эффективность, снижает затраты на оборудование и работу персонала на местах.



Рисунок 2.3 – Мониторинг качества воды с помощью БПЛА

Использование БПЛА для мониторинга качества воды значительно повышает мобильность операций. За минуты беспилотник может добраться

до любого места в заданном радиусе и приступить к отбору проб воды, сократив время на всю операцию. При заборе воды с помощью БПЛА исключается или уменьшается необходимость в лодке, а также в техническом обслуживании и специальном обучении.



Рисунок 2.4 – Мониторинг качества воды с помощью БПЛА

Благодаря встроенной системе GPS БПЛА может автоматически перемещаться к целевой точке на основе GPS-координат, заданных в приложении. Функция сохранения маршрута позволяет операторам сохранять место отбора проб и быстро переходить к нему при следующей операции, что обеспечивает повторяемость и последовательность сбора данных при отборе проб воды.

Использование БПЛА для мониторинга за водными объектами избавляет операторов от необходимости перемещаться по воде или заходить в опасные зоны. Таким образом, снижается любой возможный риск для человека при работе на воде.

В дистанционном мониторинге качества воды широко используется гиперспектральная съемка. Гиперспектральная съемка благодаря своей

высокой точности, множеству съемочных каналов, огромному объему информации и другим характеристикам, что значительно повышает точность оценки параметров. БПЛА со спектрометром может использоваться для мониторинга концентрации взвешенных веществ, мутности, прозрачности, общей концентрации фосфора, общей концентрации азота, глубины воды, химической потребности в кислороде (ХПК) рек и озер.

Концентрация взвешенных веществ является частью важных параметров качества воды во внутренних водоемах, которые могут повлиять на рост водных организмов и первичную продуктивность водных объектов. Обычный метод контроля концентрации взвешенных твердых частиц ограничивается внешними условиями и не может использоваться для контроля концентрации взвешенных твердых частиц в воде на большой площади с высокой периодичностью. В качестве средства регионального исследования и мониторинга водной среды технология дистанционного зондирования может преодолеть недостатки традиционных методов мониторинга. Она стала важным инструментом для мониторинга временного и пространственного распределения концентрации взвешенных твердых частиц [9, 10].

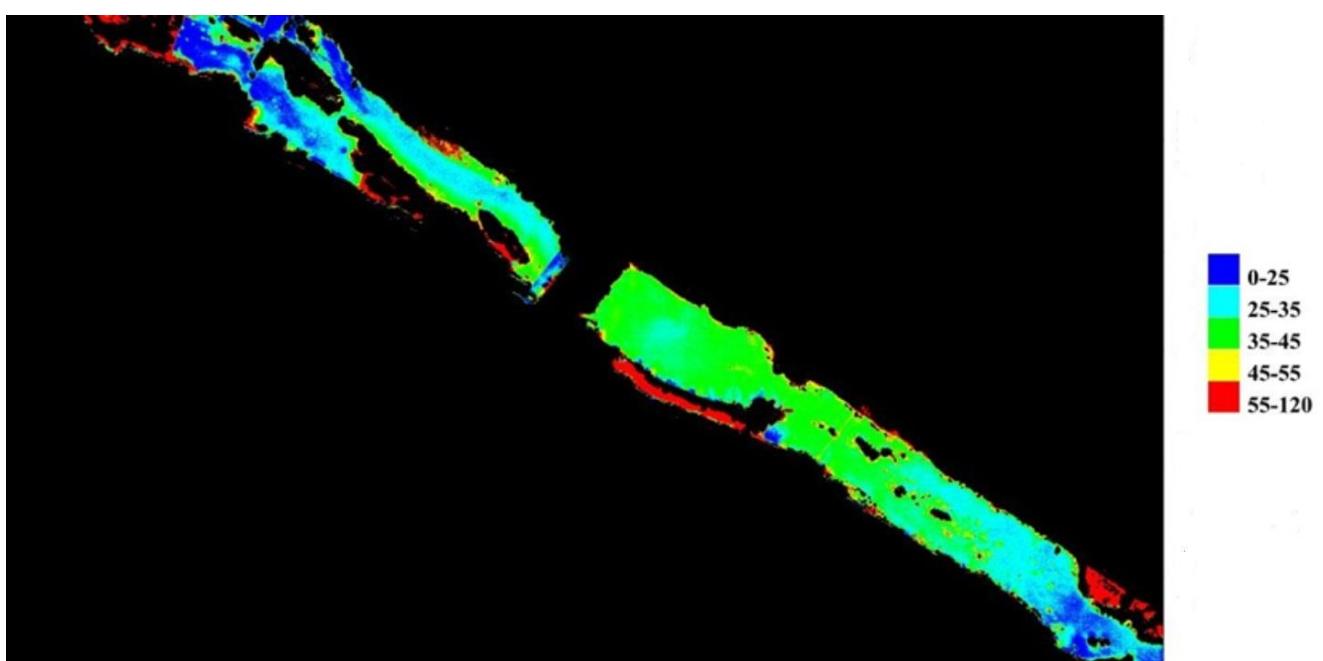


Рисунок 2.5 – Инверсионная карта гиперспектральной съемки с БПЛА концентрации взвешенных веществ в реке Дацин

Химическая потребность в кислороде (ХПК) является важным показателем качества воды для характеристики количества восстанавливающих веществ, которые должны быть окислены в воде. Все более серьезная проблема загрязнения окружающей среды, традиционные методы измерения не в состоянии удовлетворить потребность в обнаружении сточных вод из-за высоких затрат на анализ, длительного времени и вторичного загрязнения.

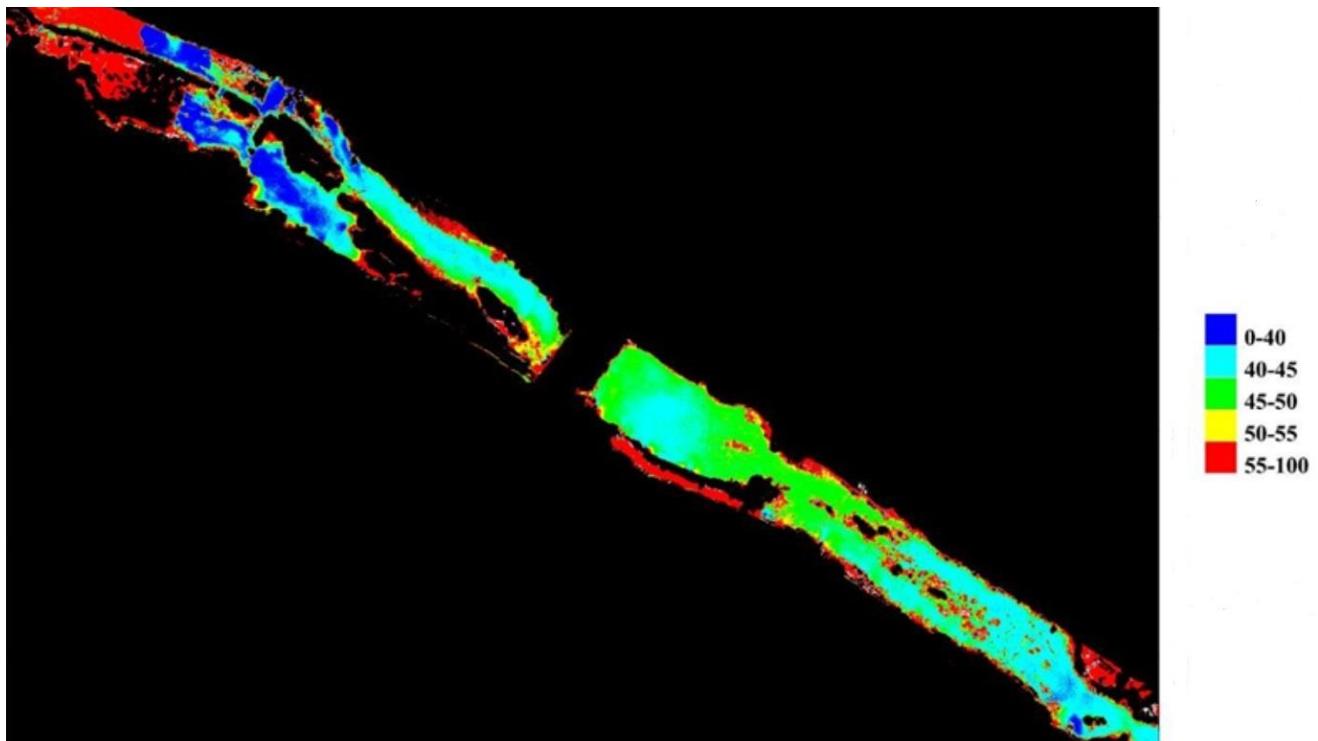


Рисунок 2.6 – Инверсионная карта гиперспектральной съемки с БПЛА химической потребности в кислороде в реке Дацин

Содержание общего азота и общего фосфора в воде является важным показателем для измерения качества воды. Традиционный метод измерения содержания азота и фосфора требует длительного времени обработки при высокой температуре и высоком давлении, а температура, время и реагенты обработки оказывают решающее влияние на полученные результаты. Технология дистанционного зондирования обеспечивает теоретическую основу методики посредством измерения спектров азота и фосфора в воде для изучения взаимосвязи между азотом и фосфором и спектральными характеристиками отражения, для создания инверсионных моделей

концентраций азота и фосфора и для обеспечения дистанционного зондирования азота и фосфора для крупных внутренних водных объектов, таких как озера, водохранилища и количественный мониторинг рек.

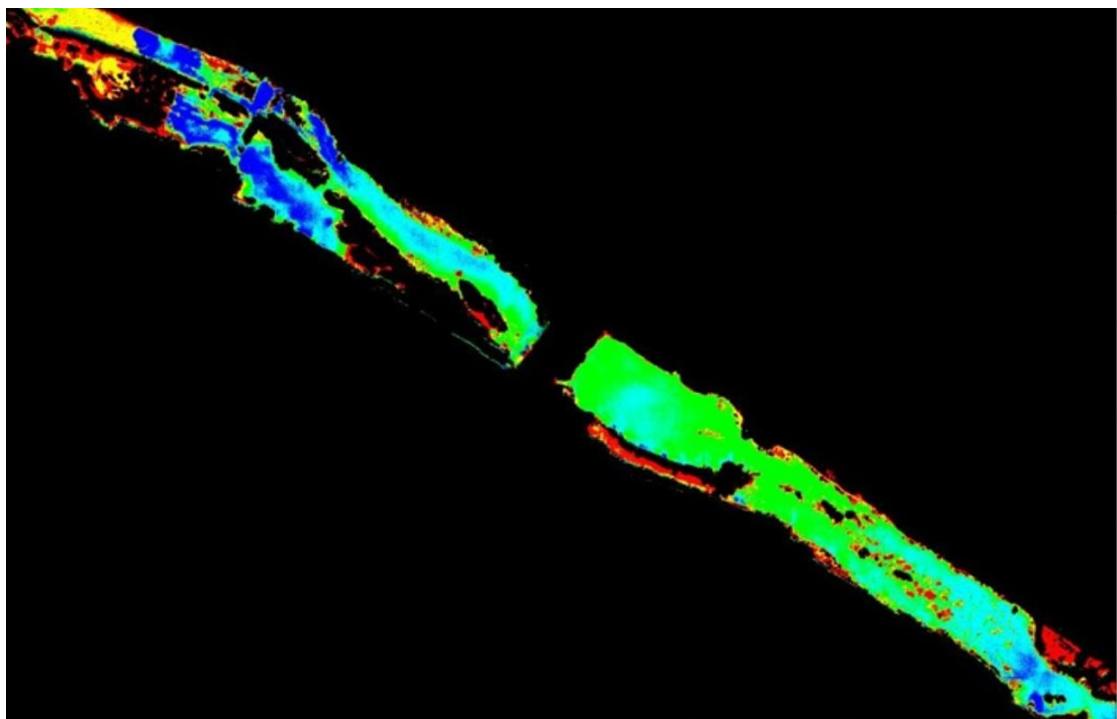


Рисунок 2.7 – Инверсионная карта гиперспектральной съемки с БПЛА общего фосфора в реке Дацин

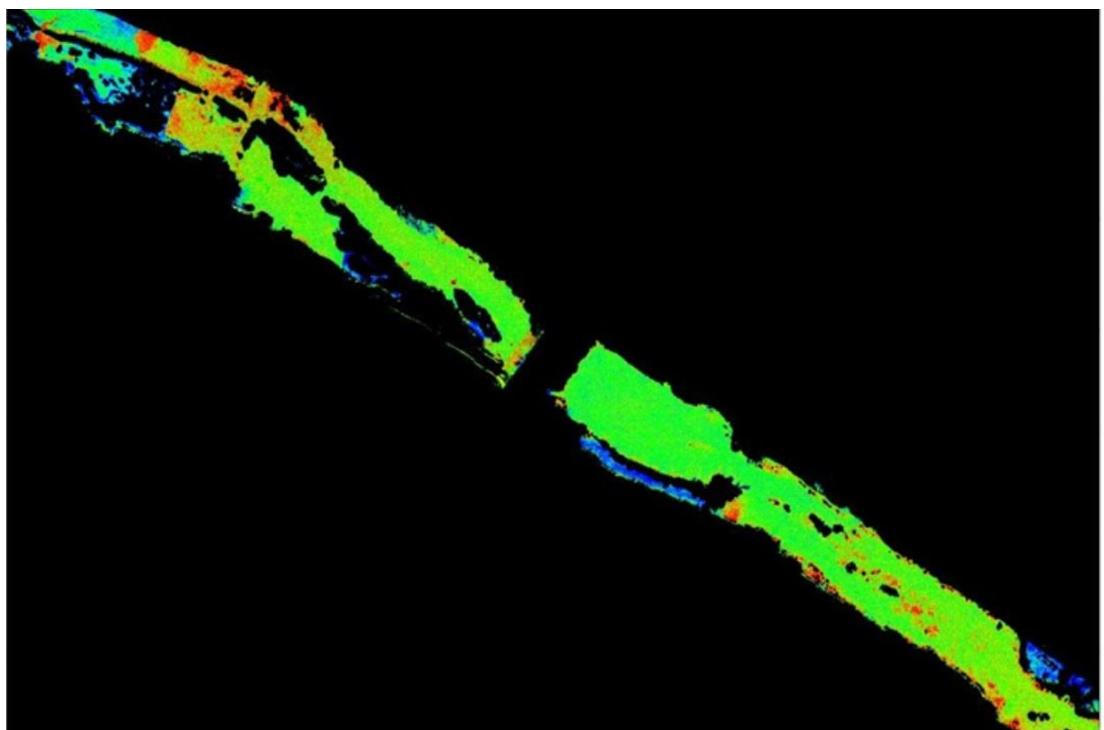


Рисунок 2.8 – Инверсионная карта гиперспектральной съемки с БПЛА общего азота в реке Дацин

Использование гиперспектральной камеры в сочетании с БПЛА может в определенной степени отражать степень эвтрофикации и загрязнения водного объекта, а в соответствии с распределением эвтрофикации и загрязнения водного объекта на изображении можно определить источник загрязнения водного объекта и источник загрязнения, причину эвтрофикации водоема. Результаты исследований могут оказать помощь в управлении департаментам водного хозяйства и гидроэнергетики, а также департаментам охраны окружающей среды.

Таким образом, использование гиперспектральной технологии с БПЛА позволяет отслеживать эвтрофикацию и загрязнение воды в реках, озерах и океанах и имеет широкие перспективы применения. Однако, хотя исследователи предложили ряд моделей мониторинга и оценки эвтрофикации и загрязнения воды в реках, озерах и океанах, каждая модель имеет конкретные методы исследования и применимые условия. Поэтому трудно найти общую модель мониторинга для всех водоемов. В то же время данные гиперспектральной съемки с БПЛА имеют некоторые дефекты, такие как помехи из-за неоднородности ландшафта, атмосферного шума, положения солнца и т.д., что влияет на возможности практического применения технологии гиперспектральной съемки. Поэтому вопрос о том, как использовать гиперспектральную съемку с БПЛА в исследованиях по эвтрофикации и загрязнению воды в реках, озерах и океанах не только для качественных, но и для количественных исследований, является актуальной проблемой [9].

2.3 Мониторинг наводнений, опасных метеорологических и ледовых явлений с использованием БПЛА

Мониторинг ледовой обстановки проводится летательными аппаратами, метеорологическими искусственными спутниками Земли,

кораблями и судами, наземными и дрейфующими гидрометеостанциями, дрейфующими автоматическими радиометеостанциями.

Беспилотная авиация постепенно принимает на себя часть функций большой и малой авиации, интегрируя накопленный опыт и современные технические достижения, расширяя свои возможности. С экономической стороны это имеет свои преимущества. Полученные цифровые данные здесь точнее и могут эффективно применяться в различных целях.

Проведение ледовой разведки на внутренних водных территориях необходимо для обеспечения безопасности судоплавания на северных реках, при формировании ледовых переправ, контроля состояния ледостава, вскрытия рек ото льда и весеннего половодья, в целях недопущения наводнений. Также применительно к чрезвычайным ситуациям.

Для оценки параметров ледового режима водного объекта реализуется комплекс ледовых наблюдений, в который необходимо включать определение ряда гидрометеорологических характеристик, нужных для получения расчетных параметров, требуемых для проектирования нефтегазопромысловых и гидротехнических сооружений. Однако полевые работы в большинстве случаев обеспечивают получение информации лишь в дискретных точках в отдельные моменты времени, когда для инженерных изысканий крайне важно получить информацию на больших площадях. Кроме того, проведение полевых работ трудозатратно и зачастую ограничено во времени плохими погодными условиями.

С развитием методов дистанционного зондирования и беспилотных технологий космические снимки разного спектрального диапазона и материалы БПЛА являются важным компонентом систем ледового мониторинга, поскольку обладают большим пространственным охватом и позволяют улавливать (захватывать) состояние ледяного покрова практически в один момент времени для обширных участков акватории и использовать полученную информацию для прогноза развития ледовой обстановки и прокладки судовых трасс [13].

Для анализа ледовой обстановки используют материалы БПЛА, полученные в различных участках электромагнитного спектра. Для выделения кромки льда и анализа сплочённости используют снимки видимого, теплового инфракрасного диапазонов и, для исследований на глобальном уровне, микроволновые, полученные пассивными радиометрами в радиодиапазоне. Классификация льда по возрасту и толщине возможна только на основе активной радиолокационной съемки, когда сигнал испускается и принимается одной и той же антенной. В этом случае на характер отражения влияние оказывают физические свойства объекта – шероховатость поверхности, диэлектрическая проницаемость, текстура и структура поверхности льда.

Комбинирование снимков разного спектрального диапазона позволяет повысить точность и интенсивность мониторинга, обеспечивать расчет скоростей и направления дрейфа льда на основе нескольких источников.

Материалы беспилотной съемки характеризуются сверхвысоким разрешением (первые сантиметры), что повышает точность работ по оценке состояния ледяного покрова в районе проведения работ. Привлечение материалов БПЛА обеспечивает своевременное выявление опасных ледовых образований небольших размеров в зоне, расположенной в радиусе сотен метров и первых километров.

Основные характеристики ледяного покрова, которые возможно получить на основе материалов беспилотной съемки:

➤ Определение ледовых фаз. Анализ снимков позволяет выявлять даты первого ледообразования, начало устойчивого ледообразования, первого образования припая, начало устойчивого образования припая, начало весеннего взлома или первой весенней подвижки припая, окончательного разрушения припая и окончательного очищения акватории от льда. Указанные процессы образования и разрушения льда являются обязательными при проведении ледовых наблюдений.

- Определение положения кромки льда на основе контрастной границы «вода – лед».
- Классификация льда по возрасту и толщине и вычисление сплоченности.
- Расчет полей скорости и направления дрейфа льда по паре последовательных изображений.
- Определение зон сжатий и разряжений на основе анализа пары последовательных изображений.

Каждый параметр требует своего набора методов дешифрирования с обязательным экспертным контролем результатов дешифрирования.

Среди методов дешифрирования выделяются две группы: автоматизированные и экспертный анализ. В настоящее время все большее развитие получают автоматизированные методы, основанные на использовании нейросетевых технологий. Так, например, в ООО «ЦМИ МГУ» был разработан собственный алгоритм бинарной классификации для выделения кромки льда на основе нейросети. Анализ результатов показывает высокую точность и достоверность выделения границ ледяных полей и опасных ледовых образований методами нейронных сетей. Скорость обработки одного изображения составляет несколько секунд [13].

Выполнение классификации льда по возрасту и толщине с использованием нейросетевых технологий также возможно, но требует существенно большего объема обучающей выборки для каждого сезона года и для зимы разной степени суровости. На рисунке 2.9 в качестве иллюстрации приведен фрагмент классификации радиолокационного снимка Sentinel-1 юго-востока Печорского моря, полученный в результате применения других нейросетевых алгоритмов, существующих в настоящий момент. Полученный результат позволяет не только анализировать ледовую обстановку на локальном уровне, но и осуществлять точную проводку судна и прогнозировать дрейф отдельных ледовых образований [13].

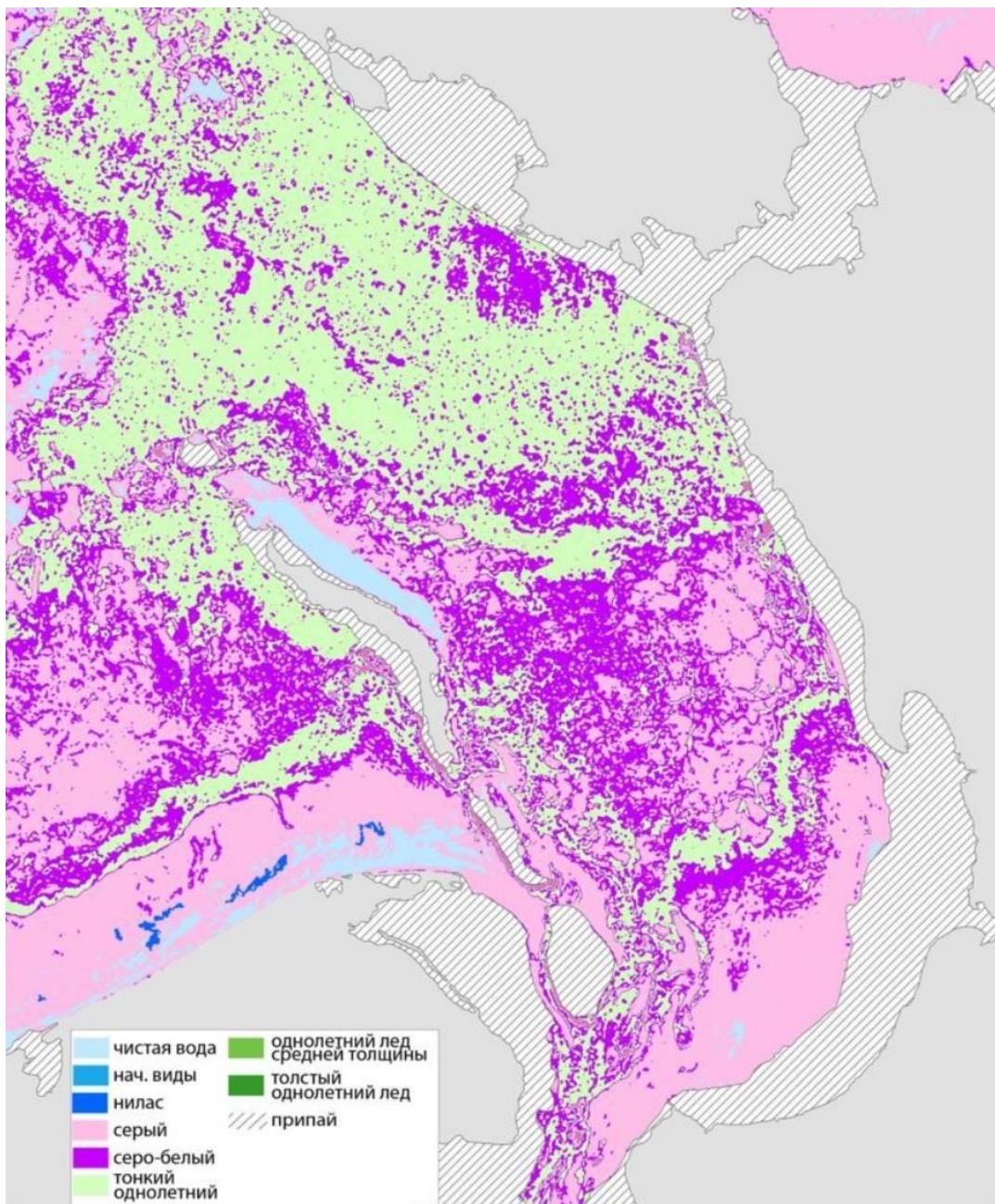


Рисунок 2.9 – Пример многоклассовой классификации льда на основе нейросетей

Использование пары изображений, полученных с разницей не более 24 часа, обеспечивает расчет полей скорости и направления дрейфа в автоматическом режиме. В основе алгоритмов подобного типа лежит поиск маркеров – тех точек, которые наблюдаются на обоих изображениях, и расчет для них характеристик смещений с использованием корреляторов. Рассчитанное поле скорости и направления дрейфа используется для

определения зон сжатий и разряжений льда на основе вычислений конвергенции и дивергенции.

Результаты работы всех автоматизированных методов дешифрирования требуют обязательной экспертной заверки, поскольку автоматизированное дешифрирование может включать ошибки, связанные со структурами и физическими особенностями льда, а также вызванные физическими особенностями радиолокационной съемки (наличие спектрального шума, шумов радиолокатора и т.п.). Кроме того, эксперт при анализе опирается и на дополнительную информацию, включающую гидрометеорологические сведения, что позволяет интерпретировать развитие ледовой обстановки с учетом смены гидрометеорологических параметров.

Определение ледовых фаз в настоящий момент возможны только на основе экспертного анализа космических снимков [13].

Аэрофотоснимки играют важную роль при оценке ущерба от стихийных бедствий, так как содержат информацию о масштабах и местоположении повреждений. С помощью аэрофотоснимков и картографических данных можно оперативно определить расположение пострадавших районов (даже если в полевых изображениях нет информации о местоположении) и масштабы разрушений.

В 2019 году на Багамские острова обрушился ураган «Дориан», являющийся самым мощным ураганом, когда-либо обрушающимся на острова.

На интернет-ресурсе <https://www.pix4d.com/support/> есть примеры применения аэрофотоснимков в различных сферах жизни и деятельности человека, в промышленности, в сельском хозяйстве и даже в искусстве. Одним из таких является проект, цель которого является быстрое создание карты после катастрофы с использованием ПО PIX4Dreact [14]. Программное обеспечение PIX4Dreact позволяет быстро создавать карты, ортофотопланы и карты высот по отснятым фотографиям с БПЛА.

На рисунке 2.10 представлен один из аэрофотоснимков, на основе которых и построена карта последствий катастрофы.



Рисунок 2.10 – Аэрофотоснимок последствий урагана «Дориан» на Багамских островах в 2019 году

Аэрофотоснимки с БПЛА охватывают большие территории и помогают быстро провести разведку пострадавшей от стихии местности, оперативно и эффективно оценить последствия стихийных бедствий, в режиме реального времени показывают какие изменения произошли в последствии пройденного стихийного бедствия (разрушения, экологическая ситуация, изменения рельефа и т.д.).

На интернет-ресурсе <https://www.pix4d.com/support/> помимо проектов применения аэрофотоснимков есть также множество обучающих видео и справочного материала по обработке и применение ортофотоснимков.

2.4 Мониторинг изменений береговой линии и процессов эрозии с использованием БПЛА

Береговая эрозия представляет собой сложный процесс, на который влияют различные природные и антропогенные факторы. Традиционные методы оценки деформаций, разрушений, размывов берегов и эрозии достаточно трудоёмки и в целом недостаточно точны для оценки пространственных изменений береговой линии. Развитие технологий, в особенности геоинформационных, позволило получать данные с недостижимой для традиционных методов скоростью и точностью. В частности, высокие точность и детальность изменений очертания береговой линии достигаются при использовании роботизированных тахеометров, глобальных навигационных спутниковых систем (Global Navigation Satellite System) (GNSS) и наземных лазерных 3D-сканеров (НЛС). Однако каждый из них имеет один существенный недостаток – проведение измерений возможно только локально и при идеальных условиях. Кроме того, съёмка с применением этих методов занимает достаточно продолжительное время. Решением этой проблемы могло бы стать использование воздушного лазерного сканирования (ВЛС), но стоимость соответствующего оборудования сводит на нет целесообразность его применения [15].

Следует отметить, что построение трехмерной модели рельефа возможно не только на основе непосредственного измерения координат точек, как в случае с лазерным сканированием. Точность, соизмеримую с достижаемой при лазерном сканировании, можно получить, используя технологию фотограмметрии. Несомненным преимуществом фотограмметрии перед лазерным сканированием также является скорость получения данных в поле и плотность точек, достигаемая при конечной обработке.

В последние несколько лет разработка и доступность беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и возросшее качество цифровых камер,

используемых для проведения съемки с их бортов, активизировало научные исследования с использованием такого рода оборудования. Конечным продуктом использования БПЛА является трехмерное облако точек, производными которого являются цифровые модели местности (ЦММ) и рельефа (ЦМР) в мировой системе координат. Однако в сравнении с трехмерным лазерным сканированием себестоимость БПЛА в комплекте с программным обеспечением для обработки измерений на порядок ниже. Лидерами по производству беспилотных аппаратов являются ГК Геоскан (Россия) и DJI Technology (Китай). Последние сосредоточились на производстве летательных аппаратов в форм-факторе коптера.

Квадрокоптеры бюджетного типа также используются для изучения карстовых процессов. Кроме того, беспилотные аппараты такого типа используются для мониторинга опасных оползневых процессов.

Основой для проведения такого рода работ является позиционирование и регистрация точек съемки. Точное позиционирование результатов фотограмметрии позволяет выполнять работы по мониторингу объемных и пространственных изменений любого изучаемого объекта, включая рельеф местности. Геореференцирование результатов фотограмметрии с помощью БПЛА возможно несколькими способами. Первым и наименее трудозатратным является использование встроенных в БПЛА модулей GPS. Однако погрешность позиционирования в данном случае может достигать нескольких метров. Вторым способом является позиционирование с помощью специальных марок, координаты которых получены с помощью RTK-DGPS приемников. При этом достигается дециметровая точность позиционирования по высоте. Третий способ представляет собой модификацию второго, здесь в качестве источника получения координат марок берется тахеометрия. В таком случае достигается миллиметровая точность позиционирования. Несмотря на эталонную точность, третий способ предполагает проведение дополнительных работ по геодезическому

обоснованию, что является слишком трудозатратным, особенно на больших территориях.

Использование БПЛА в форм-факторе квадрокоптеров позволяет не только производить рекогносцировочные работы, но и обеспечит построение высокоточных моделей рельефа миллиметрового разрешения при использовании опорных наземных точек с фиксированными координатами. Использование данного метода даёт возможность проведения количественной оценки изменения береговой линии водного объекта. Данную технологию можно также успешно применять для оценки темпов плановой и высотной деформации берегов. Кроме того, существуют ограничения, связанные с погодными условиями. Так, полеты невозможны производить при скорости ветра более 8 м/с, во время выпадения осадков, а также при температуре окружающей среды ниже 0 °C.

Технология проведения мониторинга изменения береговой линии водного объекта с использованием БПЛА в общем случае (в зависимости от ситуации, условий и задач могут возникать еще дополнительные работы) выглядит следующим образом.



Рисунок 2.11 – Участок проведения мониторинга

На первом этапе выполняется рекогносцировка местности. Далее выполняется раскладка на местности опорных опознавательных знаков (маркеров) по периметру участку съемки, в понижениях и на возвышениях, а также на переломных точках рельефа (Рисунок 2.12).



Рисунок 2.12 – Расположение маркеров на участке проведения работ

Далее идет подготовка БПЛА к полету и собственно сам полет. Следующий этап заключается в камеральной обработке полученных данных.

В специализированных программных комплексах (таких как Agisoft Metashape Professional, Anisoft, 3Dsurvey, Pix4D). Рассмотрим для примера обработку аэрофотоснимков в программном комплексе Agisoft Metashape Professional. На первом этапе происходит выравнивание снимков. Программа определяет положение камер и строит разреженное облако точек на основании фотографий. Далее идет расчёт карт глубины. Для пар перекрывающихся снимков вычисляются карты глубины, один снимок перекрывается сразу с несколькими соседними, поэтому для каждого снимка

рассчитывается несколько карт глубин. Далее приступаем к формированию плотного облака точек (Рисунок 2.13).



Рисунок 2.13 – Плотное облако точек, полученное с БПЛА

В конечном итоге алгоритмами программы выполняется построение цифровой модели рельефа обследуемого участка (ЦМР) (Рисунок 2.14).

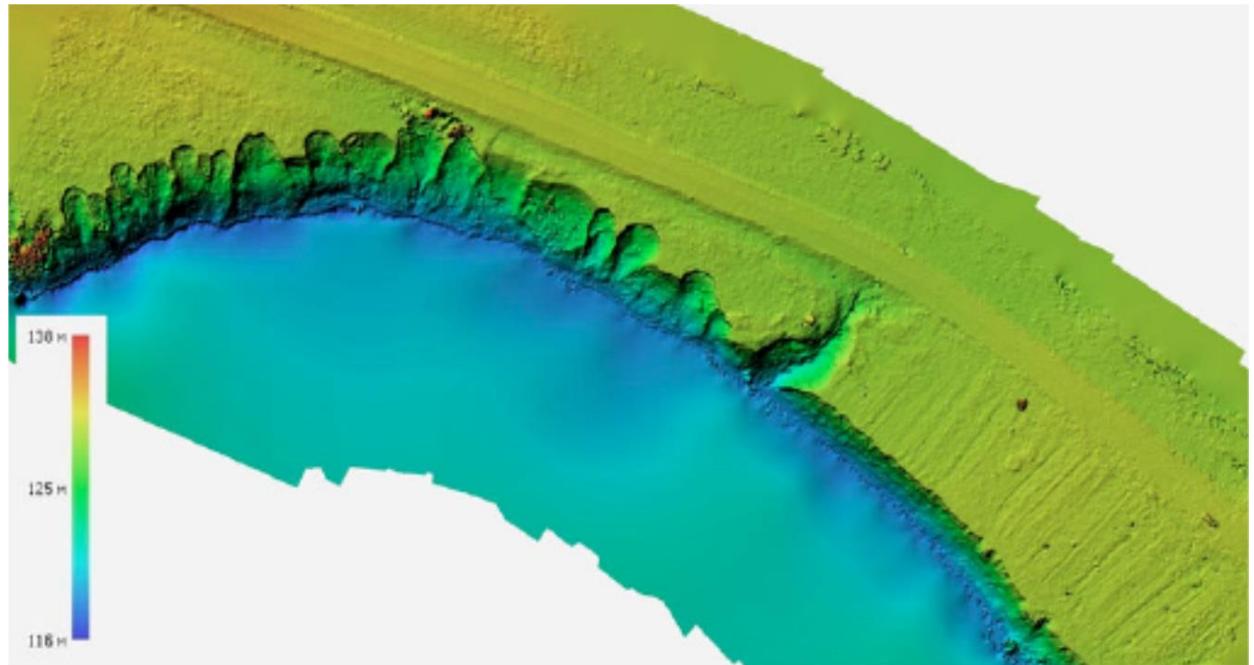


Рисунок 2.14 – Карта высот участка обследования, полученная на основе плотного облака точек

Для проведения сравнительного анализа изменения береговой линии, полученные за разные периоды ЦМР накладываются друг на друга и далее оцениваются изменения (Рисунок 2.15 – 2.16).

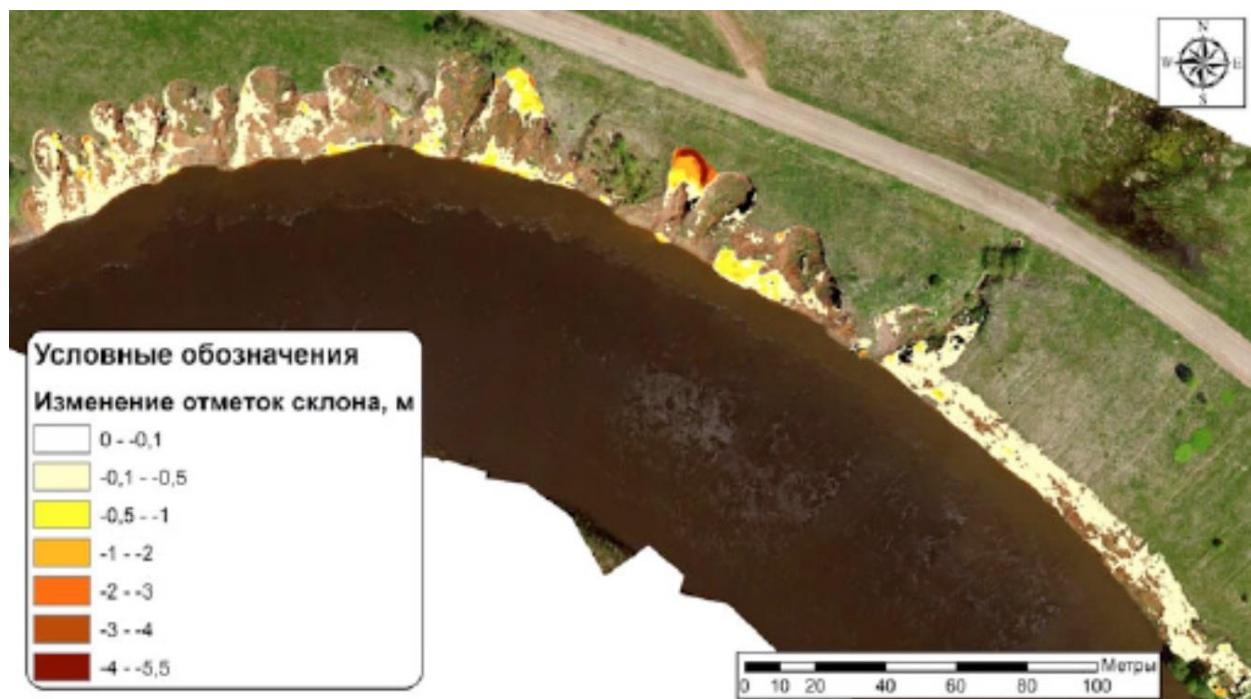


Рисунок 2.15 – Изменения высот склонов береговой линии

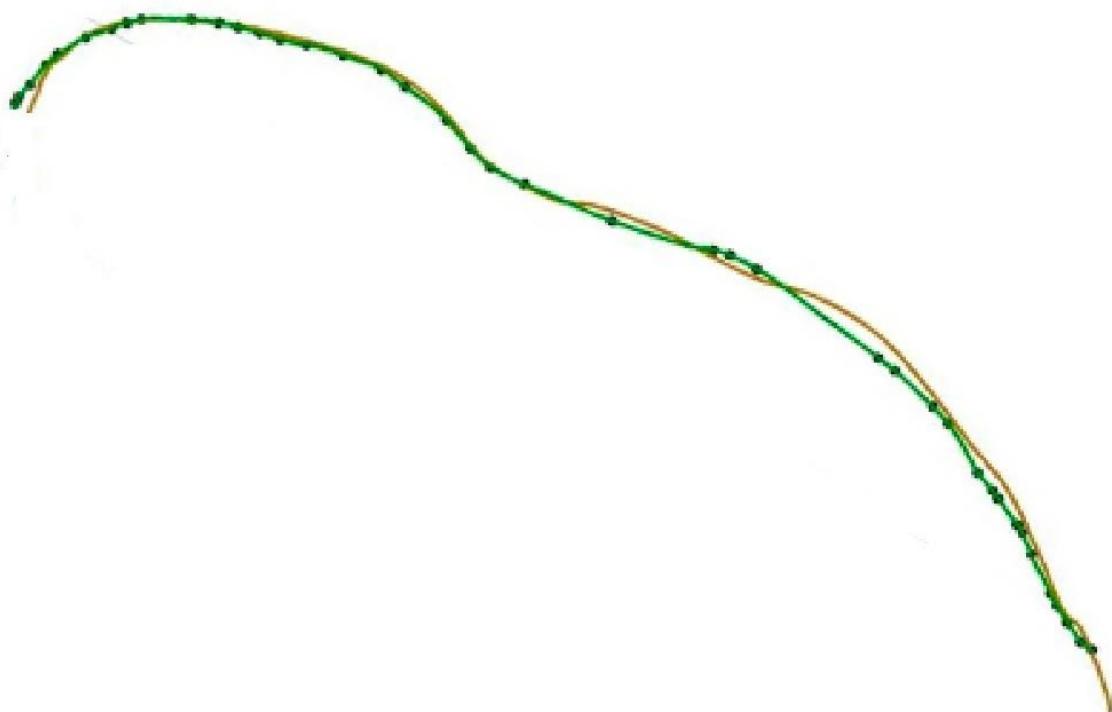


Рисунок 2.16 – Изменения береговой линии водного объекта

Применение БПЛА при мониторинге изменений береговой линии имеет свою эффективность. Главным образом, она обусловлена малыми временными затратами на полевые изыскания, возможностью выполнения всего объема работы одним специалистом, а также актуальностью получаемой информации. Последняя, в свою очередь, позволяет, при необходимости более оперативно реагировать на возможные неблагоприятные последствия переформирования берегов [15].

При использовании классических методов мониторинга отметим высокие затраты на рабочую силу и время, ограниченные возможности, не оперативны. Первоначальные инвестиции в оборудование БПЛА могут быть высокими, но долгосрочные затраты на рабочую силу снижаются. Появляется возможность оперативного реагирования на изменяющиеся условия среды. Преимущества БПЛА заключается в том, что происходит снижение затрат на труд, и происходит повышение производительности и возникает более эффективное использование ресурсов.

Сравнение классических методов мониторинга и использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) демонстрирует значительные преимущества последнего подхода. Классические методы, хотя и проверены временем, часто требуют значительных затрат на рабочую силу и время, а также могут быть менее эффективными. Визуальные осмотры и анализы, как правило, ограничивают объем собираемой информации и могут не отражать полную картину состояния. С другой стороны, БПЛА предлагают инновационные решения для оптимизации мониторинговых процессов. Использование аэрофотосъемки и специализированных сенсоров позволяет быстро и точно собирать данные о состоянии водных объектов, что значительно улучшает мониторинг.

Несмотря на первоначальные инвестиции, связанные с приобретением и обслуживанием БПЛА, долгосрочные выгоды включают снижение затрат на труд и ресурсов, повышение производительности и улучшение качества получаемой информации. С учетом всех вышеперечисленных факторов,

можно утверждать, что будущее гидрологического мониторинга будет неразрывно связано с использованием современных технологий, включая беспилотные летательные аппараты.

3 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ БПЛА ДЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Использование БПЛА в сфере мониторинга за водными объектами обусловлено их экономичностью и простотой применения. Данные, получаемые с БПЛА, дают исследователям существенно более полную информацию, чем точечные наблюдения на гидрологических постах и метеорологических станциях. Применение БПЛА является современной альтернативной заменой классическим методам по сбору гидрологической, топографической и экологической информации.

3.1 Методология и оборудование проведения полевых работ

Местом проведения полевых исследовательских работ является река Чеснава, Брейтовский район, Ярославская область, вблизи села Горелово (Рисунок 3.1).

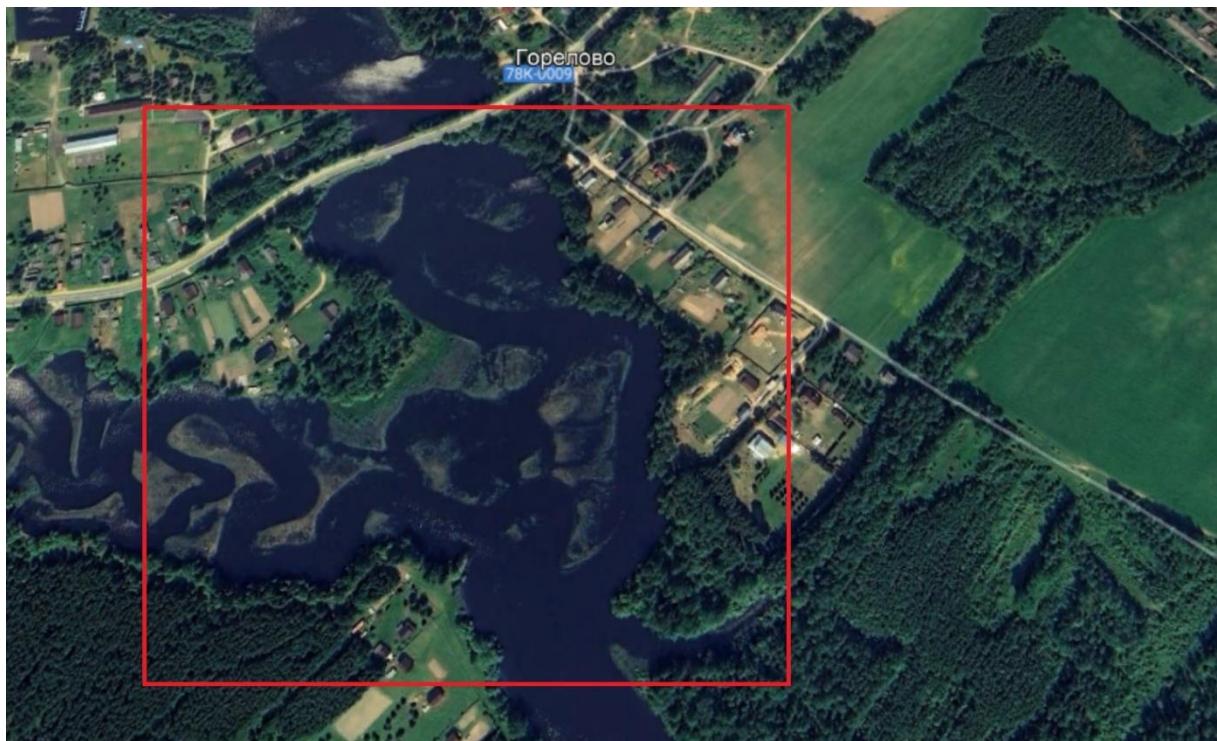


Рисунок 3.1 – Участок реки, охваченный съемкой с БПЛА

Полеты БПЛА производились летом 2024 года, с периодичностью один раз в неделю.

Цель полетов: проанаблюдать изменения состояния зарастаюши речного русла реки и промониторить изменения берегов линии реки в течении периода проведения наблюдений.

В качестве оборудования для сбора данных в исследовании использовался БПЛА DJI Mavic 2 Pro и камера Hasselblad L1D-20c (Рисунок 3.2). Основные параметры приведены в таблице 3.1.

Предварительная обработка изображений с БПЛА выполняется в программном обеспечении PhotoMod и Agisoft PhotoScan. Последующая обработка фотоснимков происходит в Adobe Raw – плагин для Adobe Photoshop.



Рисунок 3.2 – БПЛА DJI Mavic 2 Pro с камерой Hasselblad L1D-20c

Таблица 3.1 – Основные параметры БПЛА DJI Mavic 2 Pro

№	Параметр	Значение
1	Размер в сложенном виде	214×91×84 мм (Д×Ш×В);
2	В разложенном виде	322×242×84 мм (Д×Ш×В)
3	Размер по диагонали	354 мм
4	Макс. допустимая скорость ветра	29 – 38 км/ч
5	Макс. скорость взлета	5 м/с (режим S); 4 м/с (режим P)
6	Макс. скорость снижения	3 м/с (режим S); 3 м/с (режим P)

Продолжение таблицы 3.1.

№	Параметр	Значение
7	Макс. скорость	72 км/ч (спорт-режим без ветра)
8	Макс. высота полета над уровнем моря	6000 м (над уровнем моря)
9	Максимальное время полета	до 31 мин (без ветра при постоянной скорости 25 км/ч)
10	Макс. время зависания	29 мин (без ветра)
11	Макс. расстояние полета (в штиль)	18 км (при скорости 50 км/ч)
12	Рабочая температура	-10 ~ 40 °C
13	Режим GPS	GPS / ГЛОНАСС
14	Точность зависания	В вертикальной плоскости
15	Макс. угол наклона	35° (режим S, с пультом управления); 25° (режим P)
16	Мощность передатчика (ЭИИМ)	2.400–2.483 ГГц FCC : ≤26 дБм; CE : ≤20 дБм; SRRC : ≤20 дБм; MIC : ≤20 дБм
17	Диапазон рабочих частот	2.400 – 2.483 ГГц
18	Взлетная масса	907 гр
19	Макс. угловая скорость	200 °/с
20	Объем внутренней памяти	8 Гб

Таблица 3.2 – Параметры камеры Hasselblad L1D-20c

№	Параметр	Значение
1	Сенсор	Матрица 1" CMOS
2	Объектив	FOV: около 77° 35 мм, (эквивалент формата 24 мм), диафрагма: f/2.8–f/11, фокус: от 1 м до ∞
3	ISO Видео	100-6400
4	ISO Фото	100-3200 (авто), 100-12800 (ручной)
5	Выдержка затвора	Скорость электронного затвора: 8–1/8000 с
6	Макс. размер изображения	5472 × 3648
7	Режимы видео	4K: 3840×2160 24/25/30p, 2.7K: 2688x1512 24/25/30/48/50/60p, FHD: 1920×1080 24/25/30/48/50/60/120p

Продолжение таблицы 3.2

№	Параметр	Значение
8	Максимальный битрейт видео	100 Мбит/с
9	Поддерживаемые файловые системы	FAT32 (\leq 32 Гбайт) или exFAT ($>$ 32 Гбайт)
10	Цветовой профиль	Dlog-M (10 бит), поддержка видео HDR (HLG 10 бит)
11	Рабочая температура	0 ~ 40 °C
12	Качество видео	4К
13	Число эффективных пикселей	20 Мп
14	Режимы фотосъемки	Единичный снимок, серийная съемка: 3/5 кадров, автоматическая экспокоррекция (AEB): 0.7 EV с шагом 3/5 ступени, интервальная (JPEG: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 с, серийная съемка RAW
15	Поддерживаемые форматы фото	JPEG, DNG
16	Поддерживаемые форматы видео	MP4 / MOV (MPEG-4 AVC/H.264, HEVC/H.265)

Проводимое исследование разделено на два части: полевые работы и камеральная обработка.

Методика проведения полевых работ заключается в том, что на первом этапе исследования выполняется рекогносцировка местности. На этом этапе был выполнен сбор и анализ имеющихся геодезических и картографических материалов по исследуемой территории; обследование пунктов геодезической основы и межевых знаков, определение их фактической пригодности для спутникового наблюдения. Далее был выполнен визуальный осмотр исследуемой местности; описание её рельефа, определение мест пересечения с дорожной сетью, линиями ЛЭП и другими коммуникациями. На следующем шаге определились с местом подготовки к БПЛА к полету,

задали маршрут облета. Далее происходила подготовка БПЛА к полету и собственно сам полет.

На первом этапе камеральной обработки в специализированном программном комплексе Agisoft Metashape Professional выполнялось построение цифровой модели рельефа обследуемого участка (ЦМР). Основной задачей при обработке снимков, является трансформирование нелинейных искажений с минимальной потерей информации. Для корректировки снимков, были изучены такие программы как: Photoshop, Lightroom, Panorama Studio Pro, AutoCAD, Credo, Global Mapper. Последующая обработка фотоснимков заключалась в наложении различных фильтров в плагине Adobe Raw для Adobe Photoshop.

Применение БПЛА при мониторинге водного объекта имеет свою эффективность. Главным образом, она обусловлена малыми временными затратами на полевые изыскания, возможностью выполнения всего объема работы небольшой группой специалистов, а также актуальностью получаемой информации.

3.2 Результаты проведенного мониторинга на р. Чеснава

После проведения полетов, в специализированном программном комплексе Agisoft Metashape Professional построили ЦМР обследуемого участка реки Чеснава (Рисунок 3.4).

В программном комплексе Adobe Photoshop и плагине Camera Raw применяли различные фильтры, позволяющие проанализировать результаты мониторинга, выполнить сравнение и сделать выводы (Рисунок 3.5, Рисунок 3.7).

В программном комплексе Autodesk Autocad выполнили отрисовку очертания береговой линии реки Чеснава.



Рисунок 3.3 – Исходный снимок обследуемого участка р. Чеснава в начале периода мониторинга

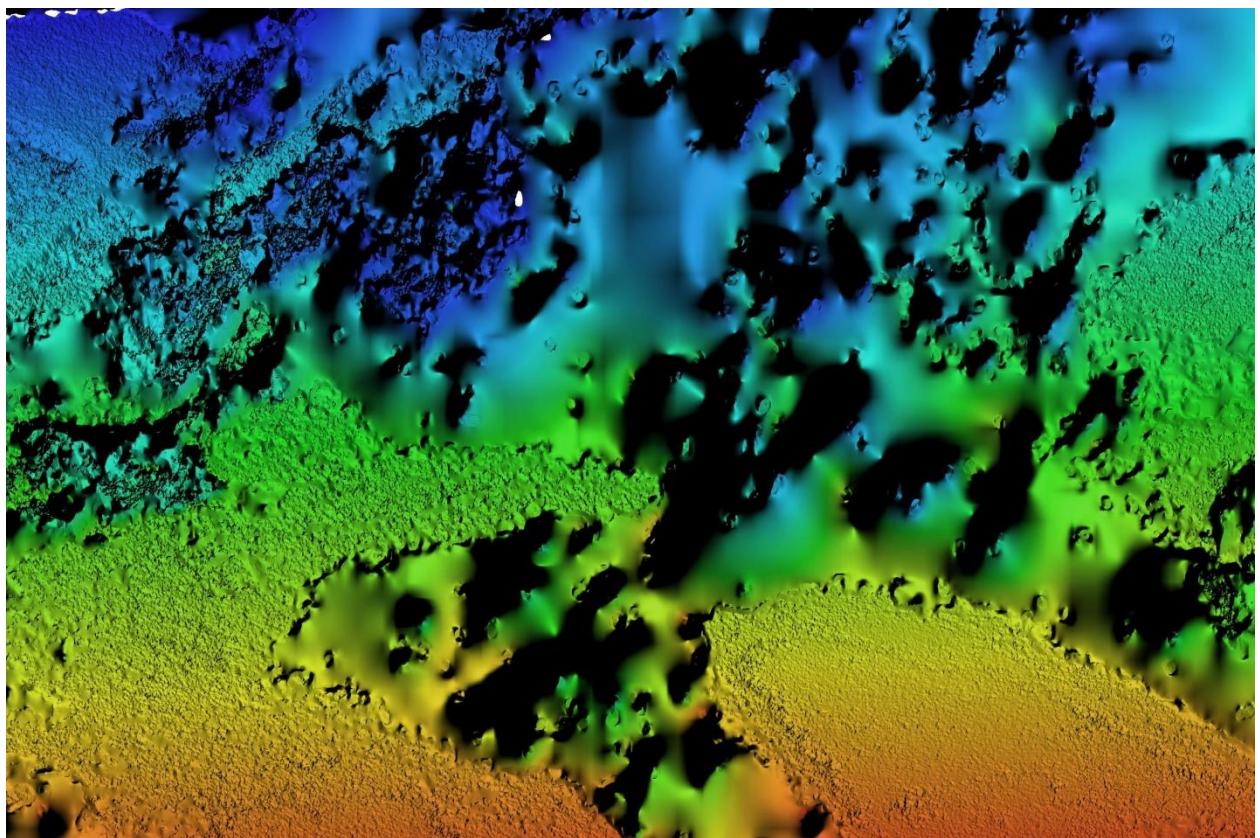


Рисунок 3.4 – ЦМР обследуемого участка р. Чеснава



Рисунок 3.5 – Исходный снимок в начале периода проведения мониторинга с применением фильтров Camera Raw



Рисунок 3.6 – Исходный снимок обследуемого участка р. Чеснава в конце периода мониторинга

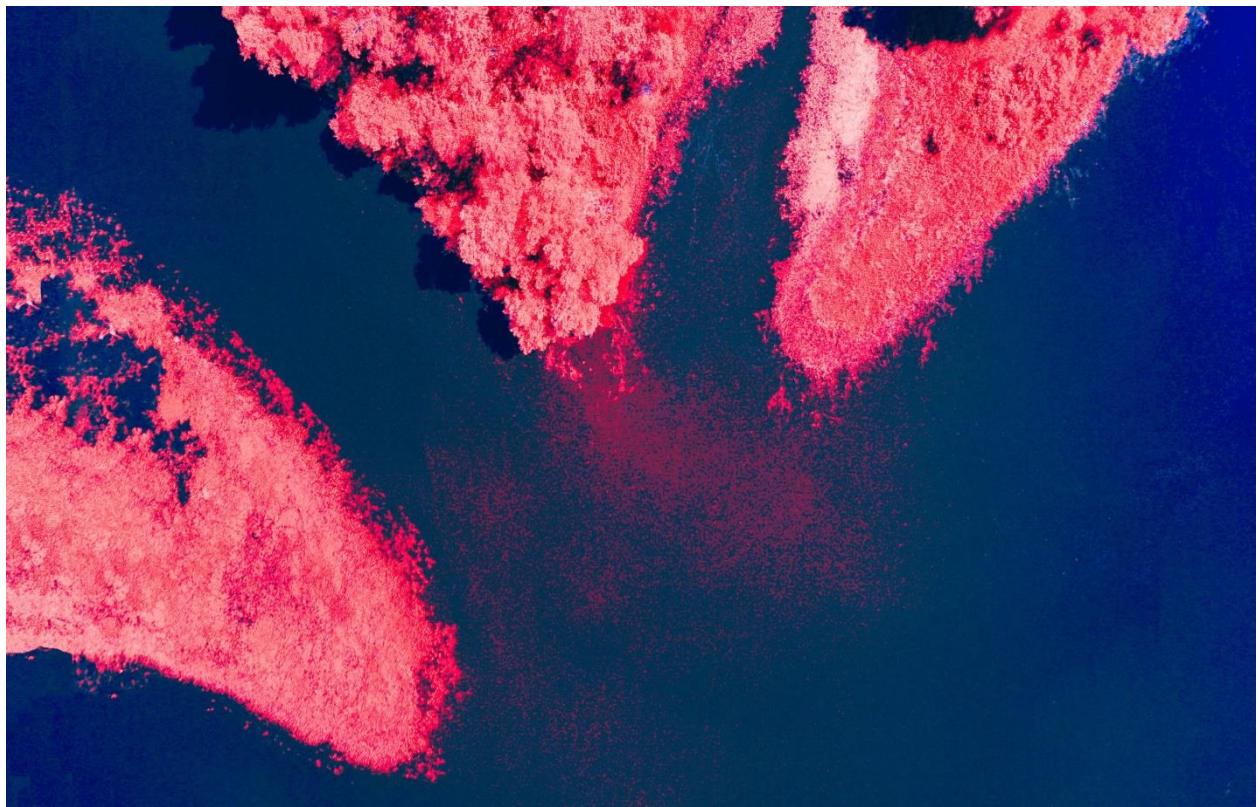


Рисунок 3.7 – Исходный снимок в конце периода проведения мониторинга с применением фильтров Camera Raw

В программном комплексе Autodesk Autocad выполнили отрисовку границ зарастания речного русла и очертания береговой линии реки Чеснава в начале и в конце периода проведения мониторинга (Рисунок 3.8 – 3.9).

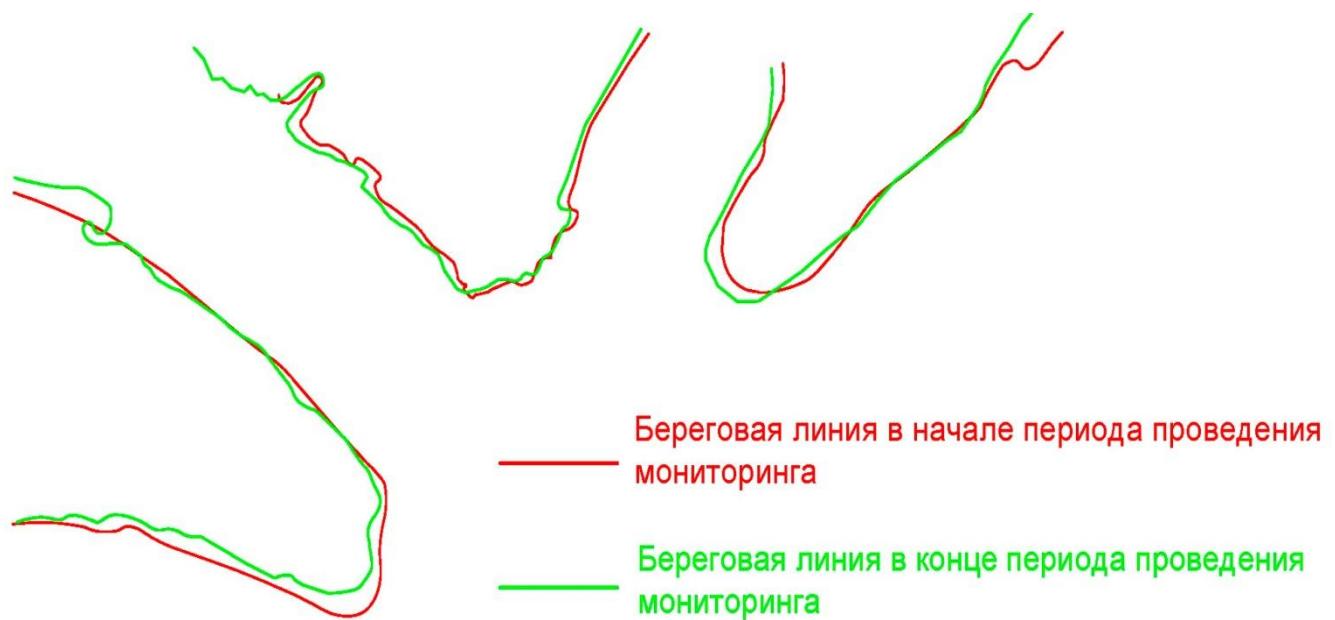


Рисунок 3.8 – Сравнение очертаний береговой линии в начале и в конце мониторинга.



Рисунок 3.9 – Изменение очертаний зарастаемости в речном русле в начале и в конце мониторинга.

Для того, чтобы проверить эффективность и достоверность получаемой информации с БПЛА, проверили натурные измерения по определению очертания береговой линии р. Чеснава. Определение очертания береговой линии реки производилось GNSS-оборудованием EFT M4. Результаты сравнения приведены на рисунке 3.10.

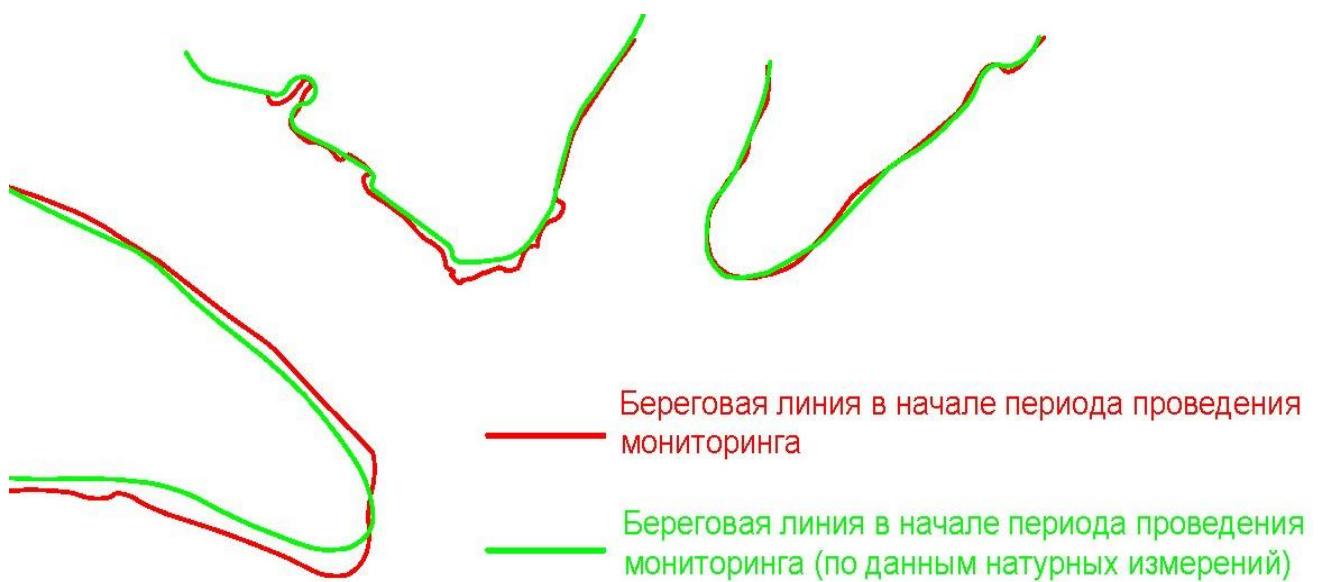


Рисунок 3.10 – Сравнение очертаний береговой линии участка р. Чеснава, полученных с БПЛА и по данным натурных замеров.

При анализе полученных результатов можно заметить, что очертания береговой линии обследуемого участка реки Чеснава, полученных с применением БПЛА и при данным натурных измерений, практически схожи между собой. Это позволяет сделать вывод об эффективности и достоверности получаемой информации с БПЛА. А учитывая оперативность получения результатов, получение данных в реальном времени, уменьшение времени проведения измерений, обхват мониторингом сразу большой территории, с уверенностью можно утверждать, что внедрение технологии применения БПЛА в реальные проекты и условия, в которых они могут быть наиболее полезными, является вполне эффективной, и показала себя побольшой части исключительно с положительной стороны. Но, стоит отметить, что применение БПЛА в мониторинге водных объектов имеет и свои недостатки, хотя и в меньшем количестве (погодные условия, неоднородность рельефа, помехи и препятствия в виде птиц, различных коммуникаций, особенностей местности и ландшафта, дороговизна стоимости оборудования и ПО, и др.).

3.3 Анализ данных: выводы и рекомендации

Проведенное исследование по применению БПЛА для мониторинга водных объектов позволяет сделать несколько выводов, а также выделить преимущества и недостатки этого метода мониторинга.

Результаты проведенного исследования позволяют выделять ряд преимуществ применения БПЛА в мониторинге за водными объектами:

- обеспечения достоверными качественными данными для пространственного мониторинга водных объектов;
- оперативность получения результатов;
- уменьшение времени на проведение полевого этапа мониторинга;

- уменьшение затрат на проведение полевого этапа мониторинга (количество специалистов, необходимое для проведения полевых работ, уменьшается, а, следовательно, уменьшаются затраты на их командировку);
- эффективность и качество полевых материалов улучшаются;
- обхват сразу большой территории;
- данные в реальном времени;
- экономическая эффективность.

Однако не смотря на такое большое количество достоинств, применение БПЛА для мониторинга водных объектов имеет и ряд недостатков:

- погодные условия: выполнение полетов возможно только при определенных погодных условиях, ожидание их может увеличить сроки проведения полевых работ;
- неоднородность рельефа, помехи и препятствия в виде птиц, различных коммуникаций, особенностей местности и ландшафта;
- экономическая эффективность.

Экономическая эффективность применения БПЛА для мониторинга водных объектов одновременно является положительной и отрицательной стороной этого метода. С одной стороны, применение БПЛА снижают необходимость в дорогостоящих пилотируемых операциях, таких как облеты вертолетов или патрулирование лодок, что обеспечивает значительную экономию денежных средств, человеческих ресурсов и времени. Уменьшаются расходы на командировку специалистов к месту проведения работ. С другой стороны, использование БПЛА требует достаточно больших и крупных изначальных финансовых вложений:

- дороговизна стоимости оборудования и ПО;
- траты на обучение персонала (доп. затраты для организации);

- требуется современная вычислительная техника (ПК с хорошей технической составляющей, позволяющая выполнять сложную графическую обработку. Такая техника требует больших финансовых затрат).

Представим приблизительный расчет оценки экономической выгоды, выраженный в у.е. (условные единицы), использования БПЛА при мониторинге водного объекта.

Предположим, организация, занимающаяся мониторингом, решает инвестировать в БПЛА (к примеру, квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro для мониторинга водных объектов.

Начальные затраты:

- Стоимость БПЛА: 2000 у.е.
- Программное обеспечение: 3400 у.е. (Agisoft Metashape).
- Обучение персонала: 600 у.е.
- Современный ПК: 150 у.е.

Итого начальные затраты: $2000 + 3400 + 600 + 150 = 6150$ у.е.

Операционные затраты (ежегодно):

- Обслуживание БПЛА: 200 у.е.
- Заработка оператора: 12000 у.е.

Итого операционные затраты: $200 + 12000 = 12200$ у.е.

Экономия и выгоды. Несмотря на первоначальные инвестиции, связанные с приобретением и обслуживанием БПЛА, долгосрочные выгоды включают снижение затрат на труд и ресурсов, повышение производительности и улучшение качества получаемой информации. Можно утверждать, что будущее гидрологического мониторинга будет неразрывно связано с использованием современных технологий, включая беспилотные летательные аппараты.

Стоимость услуги разработка комплексной программы мониторинга водного объекта стоит ориентировочно 12000 у.е. за год. Уже на третий год проведения мониторинга водного объекта с использованием БПЛА окупит свои первоначальные вложения. Эти цифры могут варьироваться в

зависимости от конкретных условий и задач, но они дают общее представление о потенциальной выгоде от использования БПЛА при проведении мониторинга водного объекта.

В практическом аспекте полученные в результате работы материалы позволяют наметить возможные пути совершенствования методов применения БПЛА в сфере мониторинга водных объектов, совершенствование профессиональной деятельности сотрудников гидрометеорологической сферы, осуществляющих работу с БПЛА (увеличивается эффективность работы, качество полевых материалов улучшается).

Результаты исследования показали, что внедрение технологии применения БПЛА в реальные проекты и условия, в которых они могут быть наиболее полезными, является вполне эффективной, и показала себя побольшой части исключительно с положительной стороны. Но, стоит отметить, что применение БПЛА в мониторинге водных объектов имеет и свои недостатки, хотя и в меньшем количестве (погодные условия; неоднородность рельефа, помехи и препятствия в виде птиц, различных коммуникаций, особенностей местности и ландшафта; дороговизна стоимости оборудования и ПО; и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время БПЛА стали важными инструментами для мониторинга и охраны водных зон. Эти летательные аппараты обеспечивают эффективную и безопасную альтернативу классическим методам наблюдения (такие как: наземные наблюдения на постах и станциях, гидрографические замеры, использование стационарных станций контроля качества воды и аналитические лаборатории, отбор проб воды и др.), а их адаптивность и универсальность делают их незаменимыми при решении задач, возникающих при выполнении работ на гидрологических объектах. БПЛА помогают оперативно оценивать и отслеживать уровень загрязнения, цветение водорослей и другие факторы окружающей среды (экологические, физические, химические, биологические и др.).

Применение специализированных влагозащищённых беспилотных летательных аппаратов для пространственного мониторинга водных объектов имеет ряд достоинств и преимуществ, среди которых отметим:

- **устойчивость к погодным условиям:** в отличие от обычных беспилотников, влагозащищенные дроны могут продолжать работу во время сильных дождей, штормов и высокой влажности.
- **универсальность:** БПЛА можно развертывать в различных водных средах, от открытых океанов до небольших озер, соответствующим образом корректируя интегрированные комплексы обнаружения.
- **экономическая эффективность:** БПЛА снижают необходимость в дорогостоящих пилотируемых операциях, таких как облеты вертолетов или патрулирование лодок, что обеспечивает значительную экономию денежных средств, человеческих ресурсов и времени.
- **повышенная безопасность:** допуская удаленный мониторинг, влагозащищенные БПЛА минимизируют риски для операторов в опасных условиях.

➤ *данные в реальном времени*: дроны предоставляют видеопотоки в реальном времени, фотографии и данные датчиков, что ускоряет процесс принятия решений в критических ситуациях.

Помимо очевидных достоинств и преимуществ, применение беспилотных летательных аппаратов для пространственного мониторинга водных объектов имеет несколько недостатков и нюансов, среди которых выделим:

- небольшие БПЛА могут сбиваться с маршрута при наличии ветра более 10 м/с;
- помехами в съёмках могут быть неоднородность ландшафта, атмосферный шум, положение солнца, столкновение с птицами, городские воздушные коммуникации и т.д;
- непродолжительное время полета;
- ограничения по весу и грузоподъёмности.

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) или дронов уже давно получило более широкое применение и распространение, чем использование в силовых структурах и специализированно-коммерческих сферах. Теперь их можно увидеть в частных руках. В сфере развлечения дроны за последние времена стали намного более доступны и получили набор серьезных инструментов – камеры, автопилоты и т.д. Стоимость их стала приемлемой, функционал вырос, управление стало проще. По всему миру разрабатываются и внедряются правила использования беспилотных летательных аппаратов для регулирования полетов и ликвидации потенциальных опасностей, которые не редкость.

Цель выпускной квалификационной работы заключалась в оценке возможности обеспечения достоверными качественными данными при применении беспилотных летательных аппаратов для пространственного мониторинга водных объектов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- были изучены существующие методики пространственного мониторинга с использованием БПЛА;
- были определены какие необходимые для мониторинга параметры окружающей среды можем получить посредством БПЛА;
- был изучен рынок моделей БПЛА и выбрать наиболее оптимальное оборудование;
- было проведено сравнение данных полученных со съемок БПЛА с натурными данными.

В первой главе проведён анализ классических методов мониторинга водных объектов, таких как гидрографические замеры, использование стационарных станций контроля качества воды и аналитические лаборатории. Рассмотрено современное оборудование, включая БПЛА, их технические характеристики и возможности. При сравнение современных технологий акцент сделан на использовании БПЛА при сборе данных для изучения текущего состояния водоема.

Вторая глава посвящена применению БПЛА для мониторинга различных аспектов водных объектов, включая качество воды, экосистемы и изменение береговой линии. Приведены примеры успешных проектов и исследовательских работ, выполненных с помощью БПЛА. Повествование сосредоточено на методах сбора данных, их обработке и анализе.

В третьей главе представлено практическое исследование, основанное на проведённых полевых работах с БПЛА на реке Чеснава, Брейтовский район, Ярославская область, вблизи села Горелово. Описываются технологии и методология, используемые в процессе, проведенные замеры, а также полученные результаты и их анализ с точки зрения точности, эффективности и практического применения. Также обсуждается внедрение технологий в реальные проекты и условия, в которых они могут быть наиболее полезными.

В практическом аспекте полученные в результате работы материалы позволяют наметить возможные пути совершенствования методов

применения БПЛА в сфере мониторинга водных объектов, совершенствование профессиональной деятельности сотрудников гидрометеорологической сферы, осуществляющих работу с БПЛА (увеличивается эффективность работы, качество полевых материалов улучшается). Более того, применение БПЛА оправдано и с экономической точки зрения. Был проведен примерный экономический расчет, который показал, что на третий год выполнения мониторинга водных объектов с применением БПЛА, организация окупит свои первоначальные, достаточно крупные, финансовые вложения.

Классические методы наблюдений и контроля не оперативны и характеризуют состав загрязнений объектов природной среды только в моменты проведения мониторинга на объекте. Неизвестно, что происходит с водным объектом в периоды между проведения мониторинга. К тому же лабораторные анализы занимают немалое время (включая и то, что требуется время для транспортировки отобранных проб с пункта наблюдения). Особенно эти методы неэффективны в экстремальных ситуациях, в случаях аварий. Они не оперативны и характеризуют исследуемый водный объект только в моменты проведения работ. Применение БПЛА позволяет проводить изучение и исследование труднодоступных участков водных объектов и их прибрежной территории, а при использовании специального оборудования, такого как лидар, возможности аэрофотосъемки расширяются.

Использование БПЛА является современной альтернативной заменой классическим методам по сбору гидрологической, топографической и экологической информации. Если раньше специалисту требовалось самому лично выезжать на обследуемый объект (участок проведения работ), проводить все необходимые замеры и измерения на местности, то теперь появилась возможность проводить необходимые полевые работы дистанционно и оперативно. Полностью отказаться от выездов специалиста на объект, на данный момент, пока не получится. Однако методика выполнения работ и доля участия изменились.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев А.В., Шмидт С.В. Водно-технические изыскания. – Л.: Применение арометодов в гидрометрии, 1987.
2. Экологический мониторинг окружающей среды: учеб. пособие для вузов: в 2 т. / Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Ю.Д. Эдельштейн, Д.П. Вент; под ред. П.Д. Саркисова. – М.: Химия, 2005.
3. Королев, В.А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: учеб. пособие / В.А. Королев; под ред. В.Т. Трофимова. – М.: КДУ, 2007. – 416 с.
4. Экологическое право: учебник для вузов / под ред. С.А. Боголюбова. – М.: Высшее образование, 2006. – 485 с.
5. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития // Национальная и глобальная безопасность. Научные записки Пир-центра. – Вып. № 2 (26), 2004.
6. Цепляева Т.П., Морозова О.В. Этапы развития беспилотных летательных аппаратов. М., «Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии», № 42, 2009.
7. Павлущенко М., Евстафьев Г., Макаренко И. БПЛА: история, применение, угроза распространения и перспективы развития. М., «Права человека», 2005.
8. Большая российская энциклопедия - [Электронный ресурс] – URL: https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/4087725
9. Экологический мониторинг окружающей среды / Д. А. Припутнев, И. Н. Мальцев, В. И. Лукьяненко, А. М. Чуйков // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: сборник статей по материалам IV Всероссийской научно – практической конференции с международным участием. Ч. 1. – Воронеж, 2015.

10. Федосеева, Н. А. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов / Н. А. Федосеева, М. В. Загвоздкин // Научный журнал. — 2017.
11. Инженерная геодезия: учебное пособие. Часть II / Е. С. Богомолова, М.Я. Брынь, В. А. Коугия [и др.]. — Санкт-Петербург: Петербургский государственный университет путей сообщения, 2008. — 93 с.
12. Медведков, Д. А. Практика беспилотных летательных аппаратов в целях ведения земельно-кадастровых работ / Д. А. Медведков, Н. Г. Овчинникова // Сборник статей по материалам Международной студенческой научно-практической конференции. — Краснодар, 2019.
13. Шабалин, Н. В. БПЛА и спутниковые данные в исследованиях ледовой обстановки при инженерно-гидрометеорологических изысканиях на шельфе и в прибрежной зоне / Н. В. Шабалин, М. И. Семенова, П. Г. Михайлюкова, Т. М. Гизатулин, А. А. Евдокимов // Neftegaz.RU: деловой журнал. — 2021.
14. Pix4d - [Электронный ресурс] – URL: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360000235126> (дата обращения: 10.06.2025).
15. Опыт применения беспилотных летательных аппаратов для оценки состояния берегов поверхностных водных объектов [Текст] / А. И. Лучников, Ю. С. Ляхин, А. П. Лепихин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. - № 1. - Библиогр.: 46 с.
16. Федоров С.И., Хаустов А.В., Крамаренко Т.М., Долгих В.С. Классификация БПЛА и системы их интеллектуального управления // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2016. №74.
17. Соболь И.С., Хохлов Д.Н. Применение аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата для мониторинговых исследований береговой зоны водохранилища // Приволжский научный журнал. 2016. №4.
18. В. В. Шабанов, В. Н. Маркин. Введение мониторинга водных объектов в современных условиях: Монография / В. В. Шабанов, В. Н. Маркин М.: Изд-во РГАУ-МСХА, 2015, 151 с.