



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

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

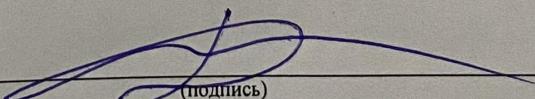
На тему **Применение беспилотных технологий
при выполнении гидрологических работ**

Исполнитель Ферингер Эрик Генрихович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Г.Н., доцент
(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)

«02» июня 2025г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

| | |
|---|----|
| Оглавление | |
| Введение..... | 3 |
| Глава 1. Физико-географическое описание района работ | 8 |
| 1.2 Гидрологическая характеристика реки Чеснава..... | 10 |
| 1.3 Климатические характеристики объекта исследования | 12 |
| 1.4 Экологическая характеристика объекта исследования..... | 12 |
| Глава 2. Сравнительный анализ применения БПЛА и классических методов в гидрометеорологических изысканиях..... | 14 |
| 2.1 Классические методы | 14 |
| 2.1.1 Измерения расхода воды..... | 14 |
| 2.1.2 Промерные работы | 16 |
| 2.1.3 Измерение расхода наносов | 18 |
| 2.1.4 Наблюдение и измерения температуры..... | 20 |
| 2.1.5 Построение модели местности | 22 |
| 2.2 Современные методы | 23 |
| 2.2.1 Бесспилотный гидрограф..... | 24 |
| 2.2.2Методика выполнения гидрологических изысканий с использованием гидрографа Molt Boat..... | 27 |
| 2.2.3 Бесспилотные летательные аппараты в гидрологии | 28 |
| 2.2.4 Технология выполнения работ БПЛА | 29 |
| 2.2.5 Принцип работы RTK в аэрофотосъемке..... | 34 |
| 2.3 Преимущества и недостатки классических и современных методов..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Глава 3. Использование БПЛА в гидрологических изысканиях на примере участка реки Чеснава Ярославской области при предпроектной проработке прокладки газопровода по дну водоема..... | 39 |
| Вывод..... | 45 |
| Список литературы | 47 |

Введение

Цель работы – применение беспилотных современных методов измерений при производстве гидрологических изысканий.

Для реализации данной цели необходимо решить следующие задачи:

Произвести физико-географическое и геодезическое обследование района производства работ;

1. Создать геодезическое обоснование;
2. Выбрать и обосновать методы производства работ;
3. Выполнить калибровочные работы спутниковым методом для определения параметров перехода координат из WGS-84 в местную систему координат с оценкой точности;
4. Произвести топографическую съемку в границах проектируемого объекта и соответствующих охранных зон;
5. Построить ЦММ в программе Agisoft Metashape;
6. Выполнить производственный контроль качества выполненных работ;
7. Составить технический отчёт об инженерно-геодезических изысканиях.

Беспилотные технологии в последние годы широко применяются в гидрологии, благодаря своим преимуществам: высокая мобильность, универсальность применения, отсутствие необходимости во взлётно - посадочных площадках.

Современные возможности в сфере геодезии постоянно расширяются. Использование ГНСС-приемников позволяет получить высокую точность измерений координат, создавать и обновлять геодезическую сеть, производить топографическую съемку, мониторить гидрологические явления. Одним из перспективных направлений современных геодезических исследований является

интеграция RTK-модулей (Real-Time Kinematic) с беспилотными аппаратами (БА), демонстрирующая значительный технологический прогресс в области аэрофотосъемки и дистанционного зондирования. Такой комплекс технологий, при обработке полученных материалов, позволяет создавать с сантиметровой точностью цифровые модели местности и облака точек.

Развитие систем беспилотных технологий вызывает интерес у широкого круга специалистов ввиду перспектив и возможностей, которые они предоставляют. Современные технологии и разработки в области электроники и программного обеспечения (В 2009 году компания Pixhawk разработала первый полноценный полетный контроллер, а также программное обеспечение с открытым исходным кодом для настройки БПЛА и протокол связи MAVLink. Появившиеся стандарты программного обеспечения и интерфейсов благоприятствовали появлению возможности управлять дроном при помощи планшета или телефона) способствовали улучшению характеристик и возможностей беспилотных аппаратов (БА) [1]. Развитие датчиков и сенсоров позволяет собирать больше данных (например, координаты точек с точностью до 1–2 см, термальные данные, мультиспектральные показатели растительности) и увеличивает их точность.

БА позволяют решить целый ряд актуальных задач:

1. Сократить экономические затраты;
2. Минимизировать ущерб экологической среде;
3. Уменьшить риски для операторов;
4. Оптимизировать скорость выполняемых работ;
5. Расширить возможность на труднодоступной территории.

Согласно распоряжению (№ 1630-р) Правительства Российской Федерации утверждена стратегия развития беспилотной авиации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года, что будет способствовать распространению БА в различных сферах деятельности, включая гидрологию [2].

Использование БА в гидрологии имеет широкий спектр применения [3]:

1. Картографирование дна

Карты подводного рельефа обеспечивают решение большого круга инженерных (проектирование мостовых опор, прокладка подводных трубопроводов, расчет устойчивости гидротехнических сооружений), природопользовательских (оптимизация судоходных фарватеров, планирование зон рыболовства, оценка запасов донных полезных ископаемых) и природоохранных задач (мониторинг эрозии берегов, контроль заиливания нерестилищ, выявление несанкционированных сбросов грунта). В результате обработки информации, полученной в процессе съёмки можно построить карты дна водного объекта.

2. Инженерно – гидрометеорологические изыскания

К инженерно-гидрометеорологическим работам относится комплекс изыскательских работ, позволяющих получить данные о ситуации, рельефе и водной поверхности для составления топографических планов и профилей водных объектов (русл рек, акваторий водохранилищ, озер, прибрежной части морей и прилегающей к ним части берега, со всеми их характерными особенностями).

3. Мониторинг состояния прибрежных конструкций

В результате активной хозяйственной деятельности по освоению водных объектов, а также прибрежной зоны возводится большое количество инфраструктурных объектов: портовых сооружений, ГЭС, мостов, путепроводов и т.д. Существующая тенденция применения современных технологий, увеличивающаяся скорость строительства и применение новых материалов (высокопрочных бетонов, углепластиков, стабилизированной проволоки и др.) требуют непрерывного контроля и надзора за строительством и последующей эксплуатацией, а применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для

мониторинга наземных и прибрежных территорий позволяет дистанционно определять дефекты конструкций.

4. Мониторинг подводных переходов трубопроводов и сооружений

Подводные переходы магистральных трубопроводов (ППМТ) через реки являются весьма специфическими инженерными сооружениями и сравнительно сложными природно-техническими комплексами. Контроль за их состоянием БА способен обеспечить в должной мере, поскольку имеет возможность проникать в труднодоступные человеку участки (например трекерные роботы – передвигаются на гусеницах или колесах, оснащены камерами, лазерными сканерами, ультразвуковыми датчиками).

5. Замеры перед очищением и восстановлением водоёмов

При попытке исправить существующее загрязнение воды в естественной среде или провести дноуглубительные работы важно иметь возможность точно оценить качество воды, а также морфометрические показатели дна с помощью датчиков. Далеко не каждый водный объект находится в легкой доступности человеку, а потому использование БА при взятии проб является более целесообразным и экономически выгодным.

6. Измерение параметров потока

При измерении скорости потока обычно преследует две цели: вычисление по измеренным скоростям расхода воды и построение плана течения или векторного поля скоростей. Эта информация используется для правильной компоновки сооружений мостовых переходов, выбора их размеров и очертаний, защиты от размыва, ледохода, для корректировки местоположения строительной техники при прокладке подводных кабелей, труб, а также для научных изысканий и нужд метеорологии при изучении фаз водного режима рек или экологического мониторинга. и т. д. Всё большую популярность в инженерно-гидрологических работах приобретают методы определения скорости потока, основанные на эффекте рассеивания акустического сигнала в толще воды. Метод LSPIV

позволяет определять поверхностную скорость без вмешательства в поток по результатам анализа последовательных видеокадров.

7. Измерение объёма грунта

Определение объёма грунта на дне водоёмов требуется при производстве строительных подводных работ, дноуглубительных работ, а также в целях обоснования выбранных методик, при мониторинге и проектировании гидротехнических сооружений, в целях расчёта объёма работ по изъятию или распределению грунта, в т.ч. на хвостохранилищах и прудах-отстойниках.

8. Оценка экологического состояния вод

Оценка и сохранение водных ресурсов является важной задачей рационального водопользования. Водохозяйственные органы, а также компании и частные лица, в чьём ведении находятся водные объекты, предпринимают много усилий для защиты этого ресурса.

9. Определение расхода воды

Расход воды (количество воды, протекающего через поперечное сечение русла водотока за единицу времени) является одной из важнейших характеристик, применяемых в гидрологии. Чаще всего расход воды определяют при изучении фаз водного режима рек, для нужд метеорологии, а также в океанологии при изучении характеристик водообмена через морские проливы или при оценке переноса вод течениями. Кроме того, информация о расходе воды используется в различных отраслях, связанных с водным хозяйством, например, водоснабжением, водоотведением, канализацией и т.д.

10. Поиск и диагностика подводных сооружений и затонувших объектов

Использование гидроакустических систем позволяет значительно повысить эффективность работ по поиску и диагностике объектов на дне,

особенно в условиях пониженной видимости (мутная вода) или заиленных объектов, а также в водах, содержащих опасные для здоровья человека вещества. Кроме того, высокая скорость проведения работ в сочетании с высокой детализацией информации позволяют оперативно обнаружить повреждения сооружений (прорыв трубопровода, деформации подпорных стенок) для принятия решений по предотвращению катастроф.

Глава 1. Физико-географическое описание района работ

Работы по прокладке распределительного газопровода проводятся в деревне Горелово, расположенной в Брейтовском районе Ярославской области. Этот район находится на территории Восточно-Европейской равнины, для которой характерно чередование возвышенностей и низменностей. Участок работ расположен вблизи реки Чеснава, недалеко от её впадения в Рыбинское водохранилище. Водоем отличается мелководностью, его средняя глубина от пяти до шести метров. В отдельных местах встречаются впадины глубиной до 30 метров. Ширина Рыбинского водохранилища в самом широком месте составляет 56 километров, а длина береговой линии 1724 км. [4, 15, 16]

Район, где расположено Рыбинское водохранилище, находится под воздействием воздушных масс с теплых морей и континента, лето здесь умеренно теплое, а зима не слишком холодная. Зимой при вторжении теплых ветров с Атлантики появляются оттепели, а континентальные холодные ветра предшествуют похолоданию. Само Рыбинское море за семьдесят лет своего существования изменило климат в этой местности – он стал влажным и умеренно континентальным.

Почвы на участке проведения работ дерново-сильнопозолистые, а их механический состав средние и легкосуглинистые (см. рисунок 1). Четвертичные

отложения представлены озерно – ледниковыми и аллювиальными отложениями. [5]



Рисунок.1 Почвенные карты Брейтовский район

1.2 Гидрологическая характеристика реки Чеснава

Река Чеснава берёт начало у деревни Завражье в Некоузском районе (см. рисунок 2). Её протяжённость составляет около 37 км, а площадь водосбора — 256 км². Река протекает через Брейтовский и Некоузский районы Ярославской области, направляясь на север и северо-восток. Вдоль её берегов расположены несколько населённых пунктов.

После деревни Кальтино в Чеснаву впадает река Корбуха. Далее река протекает через ряд деревень, после чего её берега становятся более дикими и заболоченными, а русло разделяется на несколько рукавов. После впадения реки Изохи местность становится более открытой, и Чеснава проходит через деревни Никола и Горелово. Горелово стоит на мысу и огибается Чеснавой почти по кругу.

В деревне Горелово в Чеснаву впадает её правый приток — река Вая. Через реку проходит автодорога Шестихово — Брейтово, являющаяся основной транспортной магистралью района. Недалеко от Горелово Чеснава впадает в Рыбинское водохранилище. [6]

Весенний подъем уровня воды в реках бассейна начинается обычно 5–15 апреля. Для рек бассейна Рыбинского водохранилища характерно одновершинное половодье, но в отдельные годы в зависимости от погодных условий наблюдается несколько пиков подъема уровней. Средняя продолжительность периода половодья составляет 30–60 дней, наибольшая — 60–120 дней и наименьшая — 25–30 дней. Весеннее половодье сменяется периодом низких уровней воды — летне-осенней меженем. Низшие уровни в период открытого русла наступают преимущественно в июле–августе.

Ледовые явления на реках бассейна, как правило, начинаются в первой декаде ноября и продолжаются в среднем 150–160 суток. Средние даты установления ледостава — 10 ноября, разрушения — 20 апреля.



Рисунок 2. Схема расположения р. Чеснава на карте

1.3 Климатические характеристики объекта исследования

Климат района умеренно-континентальный. Самая низкая температура наблюдается в феврале ($-15,9^{\circ}\text{C}$), а самая высокая — в июле ($+24,4^{\circ}\text{C}$). Среднегодовая температура составляет $+5,36^{\circ}\text{C}$. [7]

Район богат реками и ручьями. Сейсмическая активность в районе отсутствует.

Глубина промерзания грунта в бассейне Верхней Волги в среднем для суглинков составляет 1,2–1,5 м, для песка 1,6–1,9 м, для крупнообломочного грунта 1,8–2,0 м. Эти предельно большие значения соответствуют высокому расположению зеркала грунтовых вод, сильным морозам, отсутствию снежного покрова. Фактическая глубина промерзания значительно меньше расчетных величин и обычно не превышает 1 м. От года к году она может меняться от 0,1 м и менее до 1,1 м и более.

Бассейн Верхней Волги относится к зоне достаточного увлажнения — количество осадков превышает испарение.

1.4 Экологическая характеристика объекта исследования

Согласно данным Гидрохимического института, воды Брейтовского района относятся к категории «загрязнённых». Основными источниками загрязнения являются предприятия жилищно-коммунального хозяйства, нефтеперерабатывающие заводы и машиностроительная промышленность. (см. табл. 1)

Таблица 1

| Класс загрязнения | Доля в % |
|-------------------|----------|
| 1 | 0 |
| 2 | 3,7 |
| 3 | 96,3 |
| 4 | 0 |
| 5 | 0 |

Как видно из таблицы 1, 96,3% вод относятся к 3 классу загрязнения, что указывает на значительное влияние антропогенных факторов на экологическую обстановку в районе.

Глава 2. Сравнительный анализ применения БПЛА и классических методов в гидрометеорологических изысканиях

Гидрометеорологические изыскания — это комплекс исследований, направленных на изучение водных объектов, климатических условий и опасных природных процессов для строительства и проектирования. Традиционные методы включают полевые измерения, стационарные наблюдения и лабораторные анализы, тогда как БПЛА предлагают инновационные подходы с использованием аэрофотосъемки, лидаров и мультиспектральных датчиков.

2.1 Классические методы

Гидрологические измерения расхода воды, скорости течения, уклона, уровня воды, расхода наносов, производится вручную при помощи гидрометрических вертушек, поплавков, эхолотов, реек, родниковых термометров, нивелиров, теодолитов, тахеометров. Метеорологические наблюдения за температурой воздуха, ветром, влажностью — проводятся на метеостанциях или переносными приборами.

2.1.1 Измерения расхода воды

Всего существует 5 способов измерения расхода воды при помощи гидрологической вертушки:

1. Детальный. При детальном способе измерения расхода воды принято измерять скорости в пяти точках скоростной вертикали: у поверхности, 0,2h, 0,6h, 0,8h, у дна.

2. Основной. При основном способе, помимо сокращения числа вертикалей, уменьшается и число точек измерения скоростей на вертикали, 0,2h и 0,8h.

3. Сокращенный. При сокращенном способе измерения расхода скорости на вертикали измеряются в двух точках: 0,2h и 0,8h рабочей глубины или же в одной точке – 0,6h рабочей глубины.

4. Интеграционный. Интеграционное измерение скорости можно производить по вертикали, по горизонтали и по всему живому сечению. Для этого вертушку медленным равномерным движением опускают от поверхности до дна и затем без остановки поднимают.

5. Ускоренный. При ускоренном методе измерения скоростей вертушку вдвое меньше по времени располагается на всех глубинах.

Поплавковый метод измерения расхода. На участке реки должно находиться три створа: основной гидrostвор и по одному створу выше и ниже основного створа. Створы располагаются на равном расстоянии друг от друга. На малых реках поплавки кидают с берега выше верхнего створа, а на больших реках поплавки запускают с лодки. При помощи секундомера устанавливается время движения поплавка от верхнего створа до нижнего. На малых реках, когда поплавок проходит основной гидrostвор – засекается место пересечения по тросу, перетянутому через реку. На больших реках используются угломерные инструменты для определения места пересечения основного гидроствора.

Скорость, измеренная поплавками, получается делением расстояния между верхним и нижним створом на время хода поплавка.

Этапы вычисления расхода воды поплавками:

1. Вычисляется средняя скорость каждого поплавка
2. Строится поперечный профиль по промерам на основном гидростворе.

3. На поперечный профиль наносятся значения скоростей в соответствующих точках и проводится плавная эпюра распределения поверхностных скоростей.

4. В характерных местах эпюры назначают скоростные вертикали.

5. Аналитическим способом рассчитывается фиктивный расход воды.

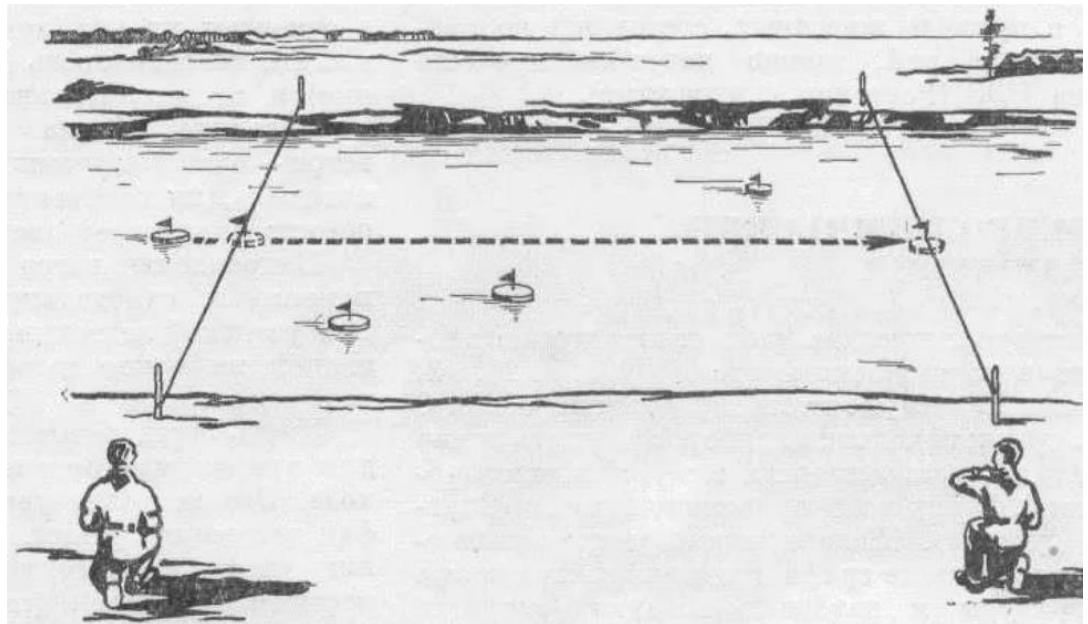


Рисунок 3. Измерение скорости течения поверхностными поплавками [8]

2.1.2 Промерные работы

Промерные работы — это измерения глубин и рельефа дна водных объектов (рек, озер, водохранилищ) для изучения русловых процессов, навигационных целей или проектирования гидротехнических сооружений. Классические методы включают ручные промеры с помощью реек, штанг и лотов, которые до сих пор применяются.

Принцип работы вертикальной рейки довольно прост: рейка с делениями (в см) устанавливается в воду для замера уровня воды у берега или на мелководье, однако не подходит для глубоких участков.

Гидрометрическая штанга более устойчива, чем рейка что позволяет ее использовать на участках с быстрым течением.

Принцип работы ручного лота заключается в следующем: лот на мерном тросе опускается до дна, глубина определяется по длине вытравленного троса. Такой лот позволяет работать на больших глубинах (50-100 м), однако дает большую погрешность из-за наклона троса.

Методика проведения промерных работ:

1. Назначение промерных вертикалей. Их количество зависит от ширины реки и характера очертания поперечного профиля дна. Если река неширокая, промеры производят через каждый метр, расстояние фиксируют от постоянного начала по мерному тросу или мерной ленте. Если река широкая и судоходная, то промерные вертикали назначают реже, при этом расстояние от постоянного начала определяют методом засечек.

2. Измерение глубин. Глубины можно измерять как на отдельных неподвижных вертикалях, так и путём непрерывных промеров (профилирование дна), перемещаясь по определённым направлениям вдоль или поперёк реки.

3. Наблюдение за уровнем воды. Отметки уровня воды в месте работ определяются по показаниям водомерных постов. На время промеров, выполняемых на длинных участках рек или на озёрах и водохранилищах, устанавливают временные водомерные посты.

4. Использование приборов. Глубины измеряют различными приборами и приспособлениями, которые по своему устройству и принципу действия можно разделить на три группы: ручные, механические и акустические.

5. Обработка результатов промеров. Результаты промеров записывают в книжку для записи промеров глубин стандартного образца. В записях для каждого профиля приводят следующие сведения: местоположение профиля по отношению к магистрали, способ определения координат промерных точек,

наименование прибора, которым измеряли глубины, время начала и конца промера, отсчет уровня воды на ближайшем водомерном посту, отметка уровня воды на профиле.

6. Использование данных промеров. Данные промеров используют в дальнейшем для построения поперечных профилей и вычисления морфометрических характеристик русла, составления продольного профиля участка реки и других целей.

Ещё одним важнейшим гидравлическим элементом потока является уклон поверхности воды. Уклон водной поверхности определяется по следующей формуле:

$$i = \frac{H_2 - H_1}{L_{2-1}}$$

где H_1 и H_2 – отметки урезов в начале и в конце участка, а L_{2-1} – длина участка. Уклоны рек изменяются в довольно широких пределах; они больше на горных реках и меньше на равнинных. Продольный уклон непрерывно изменяется и в пределах одной реки: в верховье он обычно больше, а по мере продвижения к устью убывает.

Уклоны могут быть найдены по карте по имеющимся на ней отметкам урезов воды или, что точнее, непосредственно на местности путем нивелирования урезов воды.

2.1.3 Измерение расхода наносов

При изучении режима наносов и растворенных веществ измеряют мутность и ее изменение в пространстве и во времени, зерновой состав влекомых наносов и количество растворенных веществ. Одним из методов определения

мутности является отбор проб воды с последующим фильтрованием и измерением массы сухого осадка на фильтре. Могут измеряться мгновенные и осредненные по времени значения мутности, что обычно практикуется при срочных наблюдениях на речных гидрометрических станциях и постах.

Методика отбора проб взвешенных наносов на примере батометр – бутылки ГР-16М: Батометр–бутылка ГР-16М, состоит из литровой широкогорлой бутылки, укрепляемой на штанге при помощи специальной обоймы, стабилизатора, обеспечивающего установку прибора по течению.

Предварительно перед отбором проб измеряется расход воды вертушкой, основным методом.

Прибор опускается на скоростные вертикали, на глубины 0,15; 0,5; 0,85.

Для взвешивания наносов применяется метод фильтрования под давлением с помощью прибора Куприна (рисунок 3).



Рисунок 3. прибор Куприна

Проба воды вливается в стеклянный баллон, вмонтированный в крышку фильтровальной камеры. Верхняя часть баллона закрывается крышкой со

штуцером, к которому присоединяется резиновый шланг. Воздух в баллон нагнетается ручным насосом.

Фильтрование происходит в следующем порядке. Открывается зажим, баллон отклоняется на шарнире и промывается чистой водой. В сетку воронки укладывается бумажный фильтр, предварительно смоченной водой.

Баллон устанавливается на место и закрепляется зажимом. Открывается крышка вверху баллона и в него вливается проба воды, затем крышка завинчивается до упора. В баллон нагнетается воздух, под давлением которого начинается процесс ускоренного фильтрования. Бумажные фильтры взвешивают до фильтрования. Затем они укладываются в сушильный шкаф для того, чтобы высушить пробы. После просушки они также взвешиваются, и рассчитывается расход взвешенных наносов.

2.1.4 Наблюдение и измерения температуры

Температура воды является одним из важных физических показателей, характеризующих направление и скорость химических, биохимических и гидробиологических процессов, протекающих в воде. Значение и динамика колебаний температуры зависит от многих факторов, таких как действие солнечной радиации, испарение, турбулентный теплообмен с атмосферой и т.д. Значения температуры используют при расчетах различных форм щелочности воды, степени насыщения её кислородом, для оценки состояния карбонатно-кальциевой системы, при изучении тепловых загрязнений, в ходе лимнологических и гидрохимических исследований.

Для измерения t^0 воды применяется водный или родниковый термометр в оправе. Термометр опускается в воду на бечевке в отвесном положении так, чтобы стаканчик оправы находился на глубине 0,3-0,5 м от поверхности воды.



Рисунок 4. Родниковый термометр

2.1.5 Построение модели местности

В гидрологии моделирование рельефа, основанное на геодезических измерениях, необходимо для анализа водосборных бассейнов, прогнозирования паводков, проектирования гидротехнических сооружений и изучения русловых процессов. Применяется для созданий продольных и поперечных профилей реки, определения уклонов водной поверхности.

Принцип работы заключается в измерении превышений между точками методом геометрического нивелирования различной точности [9]

Этапы:

1. Закрепление реперов (опорных точек);
2. Последовательное нивелирование по створам;
3. Построение профиля с отметками высот.

Тахеометрическая съемка позволяет одновременно измерять горизонтальные углы, расстояния и превышения.

Данные со съемки обрабатываются вручную или в специализированных программах (пример: Credo, AutoCAD). Тахеометрическая съемка проводится для получения точных пространственных данных о местности, а построение рельефа необходимо для решения инженерных и проектных задач. Построение цифровой модели рельефа (ЦМР) необходимо для проектирования строительства, гидрологического моделирования, создания картографических материалов.

2.2 Современные методы

Применение беспилотных аппаратов (БПА) [10] в гидрологии существенно расширяет возможности исследований (предлагают оперативность и безопасность там, где классические методы трудоемки или опасны), снижает экономические затраты по сравнению с традиционными методами (снижение трудозатрат и времени работ, минимизация дорогостоящего оборудования, уменьшение логистических расходов).

Основные направления использования БА в гидрологии включают:

1. Мониторинг водных объектов

Создание ортофотоплана и цифровых моделей водного объекта и прилегающей территории, оценка состояния береговой линии – выявление размывов, оползней, изменений русла, контроль паводков и наводнений – оперативная съемка зон затопления. Современные приборы и программное обеспечение (ПО) существенно оптимизируют процесс работы.

2. Измерение гидрологических параметров

Определение зон затопления – с помощью лидаров [11] или фотограмметрии (смещения объектов на снимках, сделанных с разных точек, позволяет восстанавливать 3D-геометрию по 2D-изображениям), оценка скорости течения по движению поверхностных частиц, батиметрия мелководных зон – при использовании БПЛА с эхолотами или мультиспектральными датчиками.

3. Исследование качества воды

Анализ мутности и содержания взвешенных веществ – по данным мультиспектральной съемки.

4. Изучение ледового покрова и снежного запаса

Оценка толщины и таяния льда – тепловизоры + фотограмметрия, измерение снежного покрова – лидары и стереосъемка для расчета водного эквивалента.

5. Прогнозирование опасных гидрологических явлений

Мониторинг селевых потоков и эрозии – оперативное выявление зон риска, контроль состояния гидротехнических сооружений (плотин, дамб) – выявление деформаций и протечек.

2.2.1 Беспилотный гидрограф

Одним из современных приборов для гидрометеорологических изысканий является беспилотный гидрограф, который представляет собой автономный измерительный комплекс, сочетающий в себе гидрологические датчики (уровень, температура, электропроводность), навигационное оборудование (GPS/ГЛОНАСС), систему передачи данных (радиоканал, GSM, спутниковая связь), автономный источник питания.

Технические характеристики гидрографа (на примере MOL'T Boat) [12]

| Характеристика | Значение |
|------------------|----------------------------------|
| Тип конструкции | Катамаран с алюминиевым корпусом |
| Длина × Ширина | 1.8 м × 1.2 м |
| Вес | 35 кг |
| Грузоподъемность | До 20 кг |

| | |
|----------------------|--|
| Скорость движения | До 10 км/ч |
| Автономность | 6-12 часов (в зависимости от нагрузки) |
| Дальность управления | До 5 км |
| Защита от воды | IP67 |

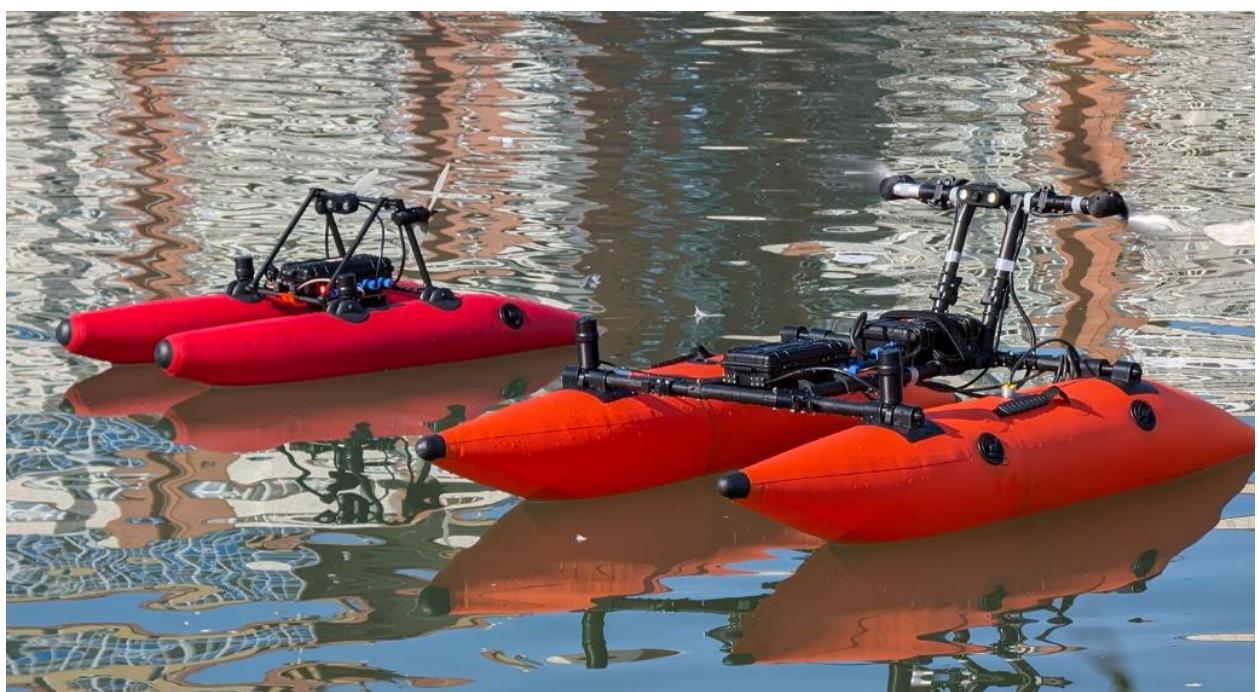


Рисунок 5. гидрографы MOL'T Boat

Навигация и управление осуществляется при помощи GPS/ГЛОНАСС с точностью позиционирования до 2 см (RTK-коррекция). Автопилот позволяет задать маршрут. Управление может осуществляться с планшета/ноутбука через специализированное ПО.

Стандартная комплектация представлена следующим образом:

| Датчик | Параметры |
|-----------------------------|--|
| Эхолот | Глубина до 100 м, точность ± 1 см |
| ADCP (акустический допплер) | Скорость течения, направление |
| Мультипараметрический зонд | Температура, pH, электропроводность, растворенный кислород |
| Гидростатический уровнемер | Измерение уровня воды с точностью ± 0.5 см |

На гидрографе имеется возможность поставить опциональные модули, например:

Гидролокатор бокового обзора (ГБО) – для детального сканирования дна

Подводная камера – визуальный контроль донных отложений

ПО Molt HydroSoft – планирование маршрутов, сбор и обработка данных.

Имеется поддержка GIS (QGIS, ArcGIS).

Облачная аналитика – автоматическое построение карт глубин, 3D-моделей дна.

2.2.2Методика выполнения гидрологических изысканий с использованием гидрографа Molt Boat

- 1) Подготовительный этап заключается в следующем:
 1. Определение границ акватории исследования;
 2. Разработка маршрутных галсов;
 3. Зарядка аккумуляторов (рекомендуется 150% от планового времени работ);
 4. Проверка герметичности отсеков;
 5. Калибровка датчиков.
- 2) Полевой этап
 1. Установка на воду с соблюдением балансировки;
 2. Проверка связи с пультом управления;
 3. Тестовый проход длиной 50-100 м для проверки работы датчиков.
- 3) Выполнение съемки
 1. При глубинах до 10 м: скорость движения 3-5 км/ч;
 2. При глубинах 10-50 м: 2-3 км/ч.
- 4) Контроль качества данных
 1. Визуальный мониторинг траектории на экране планшета;
 2. Проверка заполнения "гребенки" эхолота;
 3. Точечные контрольные замеры классическими методами.

2.2.3 Беспилотные летательные аппараты в гидрологии

В XXI в. беспилотные летательные аппараты (БЛА) находят самое широкое применение в мире как военной, так и гражданской-научно-прикладных областях. Внедрение современной цифровой техники на БЛА позволяет более эффективно использовать диапазон сверхвысоких частот, комплексно применять одновременно в одном и том же районе несколько БЛА. Вопросы регионального мониторинга с БЛА атмосферы, гидросферы, в частности, рек и озер, нижележащей поверхности, объектов природной среды и техносферы являются востребованными в научных исследованиях.

Основные направления применения БПЛА:

1. Картографирование водных объектов (реки, озера, водохранилища)
2. Мониторинг паводковой ситуации
3. Изучение русловых процессов
4. Контроль состояния береговой линии
5. Измерение температуры воздуха и воды
6. Оценка влажности атмосферы
7. Исследование приземного слоя атмосферы

БПЛА способны производить аэрофотосъемку (АФС), для создания цифрового ортофотоплана (ЦОФП).

2.2.4 Технология выполнения работ БПЛА

В процессе подготовительных работ Исполнитель из официальных и открытых источников осуществляет сбор и изучение съемочных и картографических материалов, материалов ранее выполненных топографо-геодезических работ. Имеющиеся материалы должны быть проанализированы с точки зрения их актуальности, точности и возможности использования. В рамках подготовительных работ Исполнитель получает в установленном законодательством порядке значения локальных параметров преобразования координат, а также определяет наличие ранее вычисленных локальных параметров преобразования полученных при выполнении работ в рамках государственных контрактов прошлых лет и определяет возможность их использования при выполнении работ по текущему заданию.

При проведении аэрофотосъемки с использованием пилотируемых воздушных судов должны применяться полноформатные и среднеформатные цифровые топографические аэрофотосъемочные системы. При проведении аэрофотосъемки с использованием БПЛА применяются специализированные топографические камеры. Требования предъявляемые к материалам съемки с БВС должны соответствовать требованиям к материалам аэрофотосъемки, получаемых с ПВС.

В качестве аэросъемочных систем (камер), для выполнения полноформатной топографической аэрофотосъемки, могут использоваться:

- кадровые цифровые топографические аэрофотосъемочные системы, основанные на использовании матриц светочувствительных элементов;
- цифровые топографические аэрофотосъемочные системы сканерного типа, основанные на использовании линеек светочувствительных элементов.

Цифровая топографическая аэрофотосъемочная система, независимо от ее типа, должна:

- иметь жесткую конструкцию, обеспечивающую в процессе выполнения аэрофотосъемки стабильность геометрических параметров системы (элементов внутреннего ориентирования и дисторсии объектива);
- обеспечивать возможность получения стереоскопических изображений;
- обеспечивать компенсацию сдвига изображения;
- обеспечивать автоматическое определение и установку экспозиции.



Рисунок 6. беспилотное воздушное судно «GEOSCAN»

Аэрофотосъёмочная система на базе БВС должна включать следующие компоненты:

- 1) аэрофотокамеру;
- 2) средства (блок) управления аэрофотокамерой;
- 3) гироплатформу или иную стабилизирующую переходную платформу (при наличии технической возможности);
- 4) аппаратно-программные средства навигации, обеспечивающие ведение беспилотного воздушного судна по запроектированным аэрофотосъемочным маршрутам;

5) высокоточный мультичастотный, мультисистемный ГНСС-приемник или OEM-модуль геодезического класса, ГНСС антенну.



Рисунок 7. Пусковая установка для запуска беспилотного летательного аппарата

Требования к проектированию аэрофотосъемки и ее параметрам:

Объект аэрофотосъемки может делиться на съемочные участки. Деление объекта на съемочные участки определяется возможностью или необходимостью использования специфических для съемочного участка

значений таких параметров, как абсолютная высота полета и направления маршрутов. Перепады высот ΔH в пределах съемочного участка не должны превышать 7% от высоты фотографирования Нф для равнинной, 15% - для всхолмленной, 25% - для горной местности. Для создания рабочего проекта должны использоваться специальные программные средства, обеспечивающие как непосредственно проектирование осей аэросъёмочных маршрутов и точек фотографирования, так и навигацию и управление процессом аэрофотосъемки. Результаты такого проектирования вводятся в бортовой компьютер и используются непосредственно в процессе аэрофотосъемочного полета. Если проектом предусматривается использование бортовых средств определения положения и ориентации, имеющих в своем составе инерциальное измерительное устройство, то проектирование АФС должно выполняться с учётом ограничений, обусловленных применением конкретного средства, например, ограничения на длину прямолинейного маршрута или продолжительность прямолинейного полета. АФС с применением БВС рекомендуется применять для съемки незначительных по площади территорий и НП с застройкой не более 5 этажей, а также в случаях экономической нецелесообразности использования ПВС.

Требования к выполнению аэрофотосъемки:

Аэрофотосъёмка должна выполняться при высоте Солнца над горизонтом не менее 20° , если аэрофотосъемка выполняется при отсутствии сплошной облачности она должна обеспечивать отсутствие плотных теней, препятствующих дешифрированию объектов местности и инфраструктуры.

При необходимости дополнительно выполняется радиометрическая коррекция изображения для улучшения фотографического качества.

Если позволяют погодные условия, допускается проведение АФС под сплошной высокой облачностью при условии достаточной освещенности местности.

Высота фотографирования не должна отличаться от заданной более чем на 3% при съемке равнинных территорий и 5% - при съемке всхолмленных и горных территорий. При высоте фотографирования менее 1000 м погрешность выдерживания высоты не должна превышать 30 м.

Развороты воздушного судна при переходах с маршрута на маршрут должны выполняться при углах крена, не превышающих критических значений для условий определения координат бортовым ГНСС-приемником.

АФС должна выполняться в беспаводковый период года, а также в период, когда уровень рек (др. водоемов) близок к уровню, определенному по многолетним наблюдениям (межень). При проведении съемки не допускается наличие сезонного снежного покрова. [13]

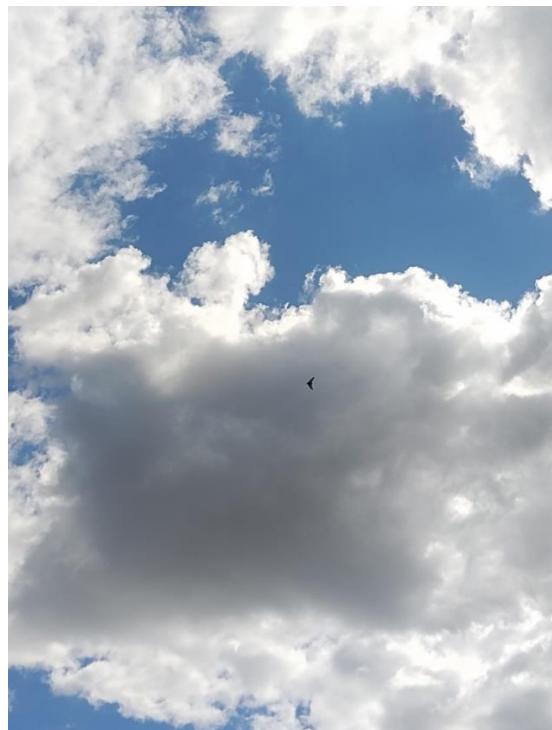


Рисунок 8. беспилотное воздушное судно «GEOSCAN» в полёте

2.2.5 Принцип работы RTK в аэрофотосъемке

Real-Time Kinematic (RTK) — технология коррекции позиционирования в реальном времени, обеспечивающая точность 1-2 см в плане и 2-3 см по высоте.

Подготовка к аэрофотосъемке следующая:

1. Установка базовой станции на точке с известными координатами (неподвижно);
2. Калибровка системы – проверка связи БПЛА с базовой станцией;
3. Планирование полёта в ПО (пример Pix4Dcapture);
4. Параметры маршрута:
 1. Высота 50-150 м
 2. Скорость 6-8 м/с
 3. Перекрытие 80%/65%(продольное/поперечное)
5. Проведение съемки:
 1. Автоматический взлёт и выход на маршрут;
 2. Контроль параметров в реальном времени (количество спутников ≥ 15 для RTK).

Режим работы RTK-Fixed (точность 1-2 см) — оптимальный, RTK-Float (точность 20-100 см) — резервный.

Аэрофотосъемка с RTK обеспечивает беспрецедентную точность без использования наземных опорных точек, сокращая время полевых работ.

2.3 Преимущества и недостатки классических и современных методов.

Классические методы

Несмотря на развитие современных технологий (БПЛА, дистанционное зондирование, автоматические датчики), классические методы сохраняют свою актуальность благодаря ряду **ключевых преимуществ**:

1. Высокая точность измерений

Ручные замеры лотом или нивелирование дают меньшую погрешность, что критично для проектирования гидротехнических сооружений.

2. Независимость от внешних условий

При сильном ветре или осадках БПЛА не могут летать. В зонах с плохим спутниковым сигналом (леса, горные ущелья) и при наличии препятствий (мостов, деревьев) работа БА так же затруднена.

3. Устойчивость к электромагнитным помехам (в отличии от электронных датчиков)

4. Прямой контакт с объектом исследований

Визуальная оценка параметров (определение характера донных отложений, фиксация загрязнения, отбор проб воды и грунта с точной привязкой к месту).

5. Отсутствие технологических ограничений

Отсутствует необходимость в зарядных станциях для дронов, дорогое ПО для обработки данных, квалификации оператора БА.

6. Доступность оборудования

Лот, рейка, термометр, вертушка – простые и недорогие инструменты.

7. Экономическая эффективность для локальных задач

Для небольших объектов классические методы дешевле, чем аренда/покупка БА с лидаром.

8. Юридическая и нормативная база

Все нормативные документы (СНиП, СП) изначально разработаны для классических методов. Данные, полученные таким методом, не требуют дополнительных сертификаций.

Хотя традиционные методы остаются важным инструментом, они имеют ряд существенных **ограничений** по сравнению с современными технологиями:

1. Низкая производительность

Замеры расходов воды на участке реки требуют многих часов работы бригады из 3 человек, тогда как гидрограф справляется с этой задачей за считанные минуты.

2. Субъективность и ошибки

Человеческий фактор может служить причиной неточностей и погрешностей

3. Ограниченный мониторинг динамических процессов

Ручные промеры уровней воды не показывают пиковые значения при паводках, невозможно зафиксировать быстрые изменения.

4. Безопасность и доступность

Существуют большой риск для персонала при работе на обрывистых берегах при сильном течении или зимой при замере толщины льда.

Болота и горные реки часто остаются неисследованными из-за сложности доступа.

5. Длительная обработка

Построение профиля русла по нивелированию может занимать несколько дней, а цифровая модель по данным с БПЛА может быть построена за несколько часов.

6. Технические ограничения

Одновременный замер уровня, скорости течения и качества воды требует разного оборудования, а современные датчики фиксируют все параметры сразу.

7. Экономическая неэффективность для крупных проектов

Обследования больших объектов требуют многих недель работы бригад, что вызывает большие затраты на зарплаты, проживание и транспорт

Современные методы

Ключевые преимущества современных методов гидрометеорологических изысканий заключаются в следующем:

1. Высокая скорость и масштабность исследований

Быстрое покрытие больших территорий при помощи БПЛА с лидаром в разы увеличивает объем работы по сравнению с классическими методами.

Автоматические гидропосты передают данные каждый 15 мин.

2. Автоматизация сбора данных

Минимизация ошибок при записи и обработке

3. Комплектность измерений

Уровень, расход, температура, химический состав воды фиксируется одновременно.

4. Безопасность и доступность

Минимален риск для человека при работе в опасных зонах во время паводков, оползней и техногенных авариях.

Облегчен доступ к труднодоступным местам (горные реки, болота)

5. Экономическая эффективность

Автоматизированный мониторинг больших объектов дешевле содержаний полевых бригад

Комплексы БА+датчики окупаются за несколько сезонов

Несмотря на впечатляющие возможности, современные технологии имеют ряд существенных **ограничений**:

1. Высокая стоимость внедрения

Комплекты БПЛА с RTK стоят от 3 млн руб.

Обновление ПО и лицензий до нескольких сотен тысяч в год.

2. Зависимость от погодных условий

БПЛА не летают при сильном ветре и дожде

3. Ограниченный ресурс работы

Аккумуляторы работают до 90 мин

4. Требования и квалификация персонала

Специалисты должны владеть ГИС-технологиями, обработкой данных и управлением сложным оборудованием.

5. Проблема с достоверностью данных

Данные, полученные современными методами, необходимо верифицировать при помощи классических методов.

6. Юридические и нормативные барьеры

Ограничение полётов БПЛА вблизи аэропортов, государственных границ, военных баз. Ограничение максимальной высоты полета 150 м. Сертификация данных требует подтверждения точности для проектной документации.

Вывод

Современные технологии кардинально изменили гидрометеорологию, обеспечив беспрецедентные возможности для науки и практики водного хозяйства. Современные методы требуют тщательного планирования и дублирования традиционными способами для обеспечения надежности данных. Использовать классические методы точечно — для калибровки оборудования и контроля критически важных параметров, а основную съемку проводить современными способами.

Глава 3. Использование БПЛА в гидрологических изысканиях на примере участка реки Чеснава Ярославской области при предпроектной проработке прокладки газопровода по дну водоема

План полевых работ на реке Чеснава заключался в следующем:

1. Выполнить фотофиксацию участка работ и р. Чеснава (берега, вид на реку, на мост);
2. Проложить морфоствор с промерами глубин, урез с двух сторон. Проложить створ до верхушки бровок;
3. Провести промеры глубин в границах KML файла.



рисунок 9. Схема границ участка работ

Для проведения гидрологических работ необходимо получить крупномасштабный картографический материал, в данном случае выполнена беспилотная аэрофотосъемка и получен ортофотоплан. Масштаб выбран 1:500 (согласно СП 47.13330.2016 для проектирования линейных объектов, в данном случае распределительный газопровод). [14]

Перед полётом необходимо подготовить беспилотник, оснащенный камерой с разрешением ≥ 20 Мп, GPS/ГЛОНАСС с записью координат в EXIF, RTK модуль, контроллер/планшет с ПО для планирования полёта (в данном случае Pix4Dcapture).

Перед полётом в программе Pix4Dcapture необходимо установить следующие параметры:

| Параметр | Значение |
|-------------|----------|
| Высота | 100 м |
| Скорость | 5-7 м/с |
| Перекрытие | 80%/65% |
| Угол съемки | 90° |

В программе Pix4Dcapture устанавливается точка запуска дрона, его маршрут и место посадки.

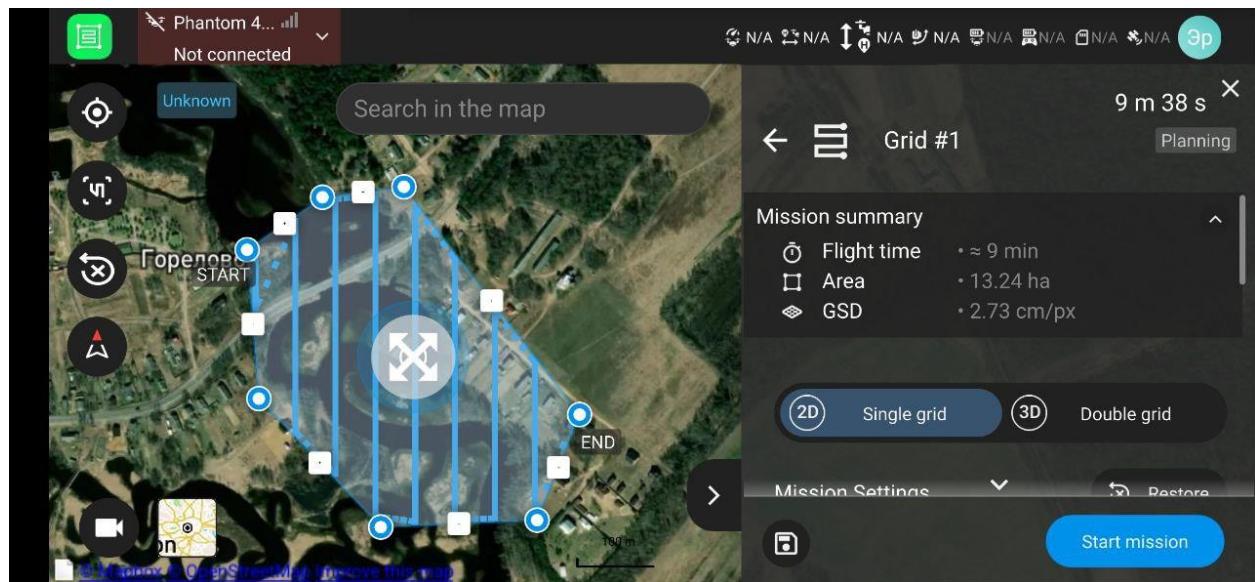


рисунок 10. план полёта над объектом обследования (Pix4D)

По результатам полёта было получено 209 отметок координат. (рисунок 11).

По соответствующим координатам были построены в программе QGIS изолинии на месте изыскания (рисунок 12).

Фотографии, полученные с дрона, позволили создать цифровой ортофотоплан (ЦОФП) местности в программе metashape (рисунок 13)

По данным с гидрографа в программе QGIS были построены изобаты на р. Чеснава в границах изыскания. (рисунок 14)

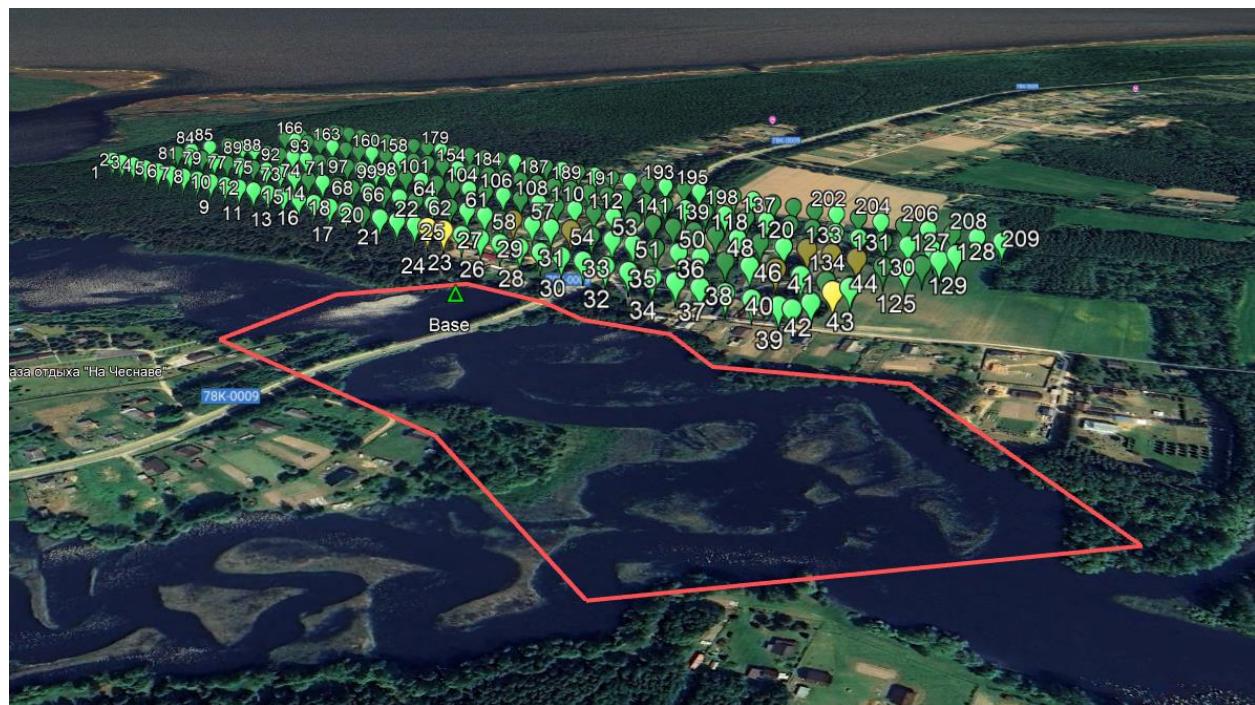


Рисунок 11. Точные центры снимков

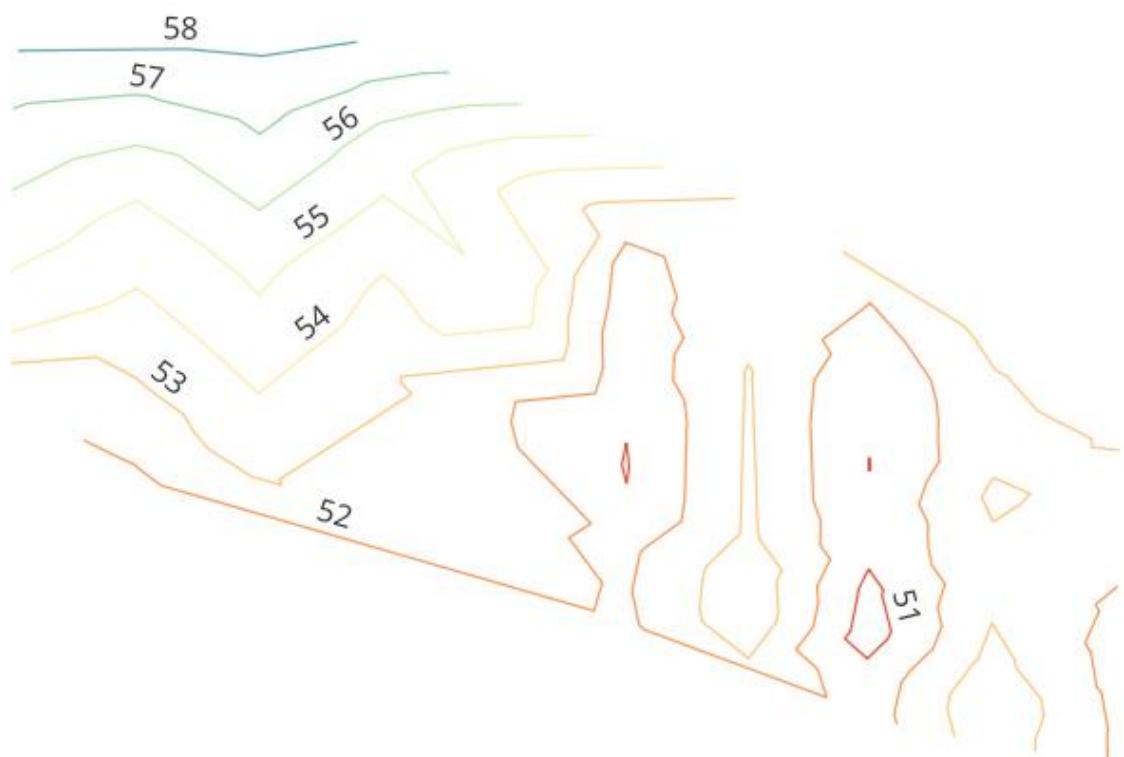


рисунок 12. Изолинии по данным съёмки с БПЛА



рисунок 13. Цифровая модель местности

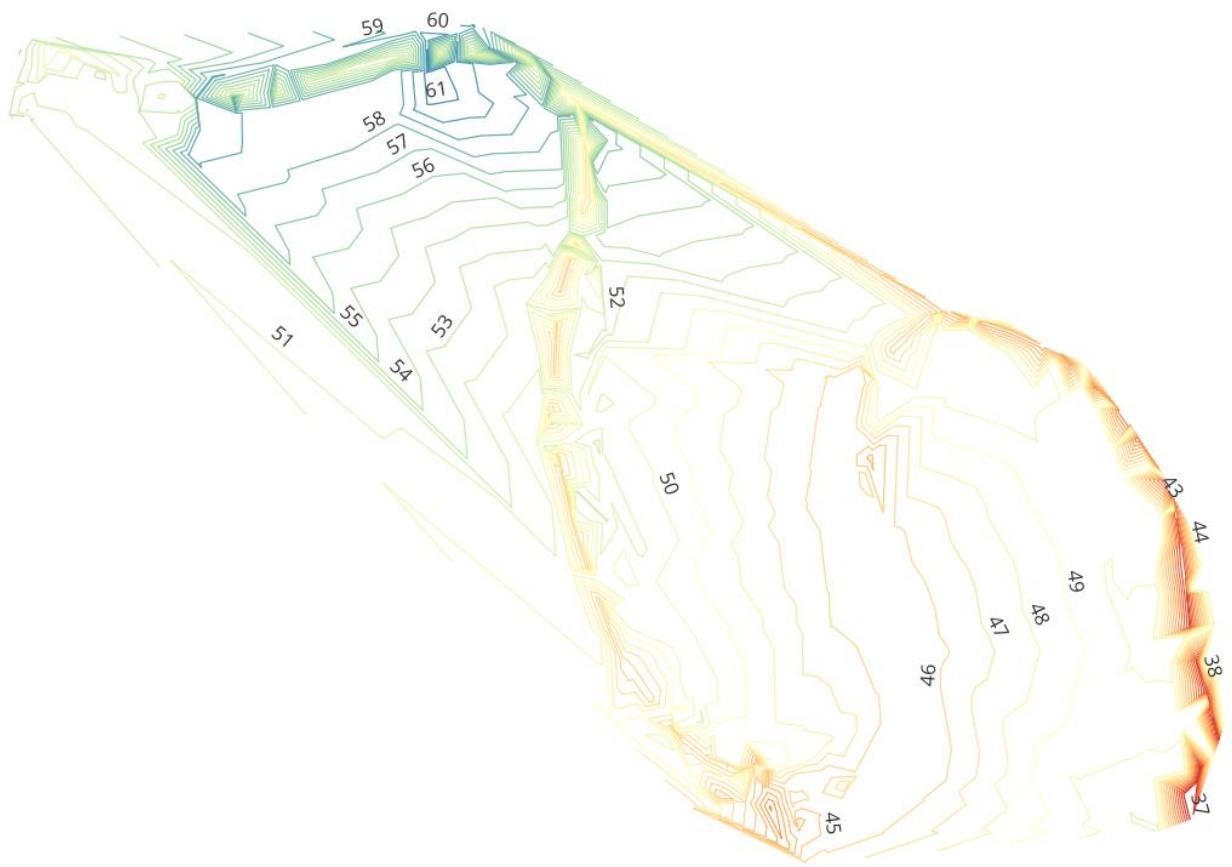


рисунок 14. Изобаты на р.Чеснава

Вывод

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность применения беспилотных технологий (БПЛА и гидроботов) в гидрометеорологических изысканиях. Современные методы продемонстрировали ряд преимуществ:

1. Оперативность: съемка 1 км² реки с помощью БПЛА занимает в 10 раз меньше времени, чем классические промеры.
2. Точность: RTK-коррекция обеспечивает погрешность 1–3 см, что сопоставимо с нивелированием.
3. Безопасность: исключен риск для персонала в опасных зонах (паводки, обрывистые берега).
4. Комплексность: одновременный сбор данных о рельефе, скорости течения, качестве воды.

Однако классические методы (лоты, гидрометрические вертушки, нивелирование) остаются незаменимыми для:

1. Верификации данных БПЛА (например, контрольные промеры глубин).
2. Работ в сложных условиях (шторм, густая растительность, отсутствие связи).
3. Точечных измерений с эталонной точностью (например, расход воды методом поплавков).

Для максимальной эффективности гидрологических изысканий рекомендуется комбинированный подход:

1. Разведка и масштабные работы – БПЛА и гидроботы:
 - о Аэрофотосъемка для создания ЦМР и ортофотопланов.

- Мониторинг динамических процессов (паводки, деформации русла).

2. Детальные измерения – классические методы:

- Калибровка датчиков БА по контрольным точкам.
- Замеры расхода воды и наносов в ключевых створах.

3. Верификация и отчетность – интеграция данных:

- Сравнение результатов БПЛА с нивелированием и промерами.
- Построение гибридных моделей (например, ЦМР на основе БПЛА + уточнение уклонов по геодезическим данным).

Перспективы внедрения

Предложенная методика позволяет:

1. Сократить затраты на изыскания на 30–40% за счет уменьшения времени полевых работ.
2. Повысить точность прогнозов паводков и оценок экологического состояния водных объектов.
3. Создать основу для цифровых двойников рек и водохранилищ.

Для успешного внедрения необходимо разработать нормативную базу, регламентирующую совместное применение БА и классических методов.

Беспилотные технологии не заменяют классические методы, а дополняют их, создавая новый стандарт точности, скорости и безопасности гидрологических исследований.

Список литературы

1. История развития систем управления беспилотных воздушных судов (DOI 10.22314/2073-7599-2023-17-3-4-15)
2. Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1630-р (<http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202306280006>).
3. <https://gidro.prin.ru/>
4. http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/rid_eb6f461bd3cb45119877723e72d4a154.pdf#page=6&zoom=100,109,141
5. Атлас Ярославской области (Главное Управление Геодезии и Картографии Государственного и Геологического комитета СССР. Москва 1964 г.)
6. <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Чеснава>
7. <http://meteo.ru/>
8. <https://studfile.net/preview/5428280/page:6/>
9. Геодезические работы в строительстве (СП 126.13330.2017)
10. СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНЫЕ АВИАЦИОННЫЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ (ГОСТ Р 71886-2024)
11. <https://skymec.ru/blog/drone-use-cases/geodeziya/dron-s-lidarom-osobennosti-kartografirovaniya/>
12. <https://molt.boats/info>
13. РТУ ЦОФП_2000_10000_ЕЭКО
14. СП 47.13330.2016
15. РЕЖИМ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА КАК ОСНОВНОЙ ФАКТОР ФОРМИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В ОСУШНОЙ ЗОНЕ - Ю.С. Васильев, В.И. Масликов, М.Б. Шилин.
16. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 10. Верхне-Волжский район. Книга 1. 1973 г.