



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)

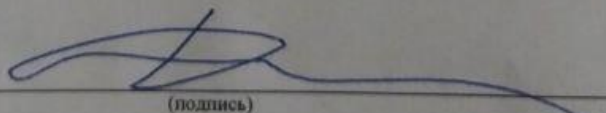
На тему Применение беспилотной аэрофотосъемки
при мониторинге опасных гидрологических явлений

Исполнитель Соломатов Андрей Вадимович
(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

Оглавление	
Введение	3
Глава 1. Физико-географическое описание объекта	6
1.1 климатическая характеристика района	6
1.2 Почвенный покров.....	7
1.3 Растительный покров.....	8
1.4 Геологическое строение	9
Глава 2. Методы дистанционного зондирования в мониторинге опасных гидрологических явлений	10
2.1 Космический мониторинг.....	13
2.2 Дистанционное зондирование с помощью аэрофотосъёмки	17
2.2.1 Рассчёт технических параметров аэрофотосъёмки речных бассейнов.....	18
2.2.2 Фотограмметрические требования к аэрофотосъёмочным работам	21
2.2.3 Гидрографическое дешифрование аэроснимков.....	24
2.2.4 Методика проведения полевых работ с БЛА.....	31
Глава 3. Мониторинг наводнения в г. Тулун, июнь 2019 года	36
3.1. Зоны затопления	36
3.2. Мониторинг возникновения мусорных заторов с помощью БЛА.....	38
Вывод	42
Список литературы	43

Введение

Актуальность темы

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) представляют собой одно из наиболее перспективных направлений развития технологий, применяемых в различных сферах человеческой деятельности. Одним из ключевых направлений использования БЛА в секторе общественной безопасности является мониторинг и ликвидация последствий весенних половодий и паводков. На сегодняшний день ряд российских ведомств уже обладает успешным опытом применения БЛА для наблюдения за территориями, подверженными затоплению.

В условиях угрозы наводнений использование большого количества вертолетов МЧС, требующих значительных финансовых затрат и специализированных инфраструктурных условий для взлета и посадки, становится нецелесообразным. В таких ситуациях БЛА демонстрируют высокую маневренность и оперативность. Своевременное получение данных с помощью БЛА позволяет эффективно отслеживать состояние ледового покрова на реках и оперативно реагировать на изменения уровня воды, что имеет критически важное значение для обеспечения безопасности населения.

БЛА могут использоваться как в сочетании с традиционной авиацией, так и в качестве самостоятельного инструмента, заменяющего дорогостоящие воздушные

суда, особенно в случаях, когда выполнение длительных миссий не требуется. Применение БЛА также актуально на этапе снижения уровня воды. Оперативное получение данных о масштабах разрушений и идентификация наиболее пострадавших районов способствуют оптимизации процесса ликвидации последствий паводков, планированию операций спасательных служб и предварительной оценке экономического ущерба.

Помимо мониторинга уровня воды и площади затопленных территорий, существуют различные методы дистанционного зондирования, позволяющие получать более детальную информацию о параметрах водных объектов. Исторически методы измерения параметров водных объектов по аэрофотоснимкам имеют длительную историю. Еще в 1960-х годах в аэрогеодезии активно применялись стереофотограмметрические методы для оценки глубин рек и прибрежных зон морей на основе анализа продольных параллаксов точек аэрофотоснимков, отображающих дно водоемов через прозрачный слой воды. При аэрофотосъемке водоемов проекционные лучи проходят через две среды – воздух и воду, обладающие различными коэффициентами преломления. Это приводит к изменению направления лучей в воде, что вызывает линейные искажения на аэрофотоснимках, которые используются для оценки глубины. Однако применение данного метода в гидрологии ограничивалось низкой прозрачностью речных вод, зависимостью от погодных условий, наличием прибрежной растительности и других факторов.

Развитие оптических методов привело к появлению подходов, основанных на связи глубины водного объекта с яркостью пикселей на RGB-аэрофотоснимках, поскольку более глубокие водоемы визуализируются как более темные участки на изображениях. Однако на отраженный сигнал, помимо глубины, влияют такие факторы, как цвет и мутность воды, а также отражательная способность донных отложений. Для устранения влияния этих факторов был предложен специализированный алгоритм.

Косвенные методы оценки скорости течения применяются в случаях, когда проведение инструментальных измерений невозможно. В гидрометрии широко используется метод, основанный на измерении времени перемещения поверхностных или глубинных поплавков (Δt) на участке реки известной длины (Δl). Скорость течения рассчитывается по формуле(1)

$$(1)V = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

Точность данного метода во многом зависит от условий проведения измерений.

На данный момент технологии дистанционного зондирования речных водотоков при помощи БЛА позволяют выполнять обширный Аспект изысканий, включая наблюдение за изменениями русла в плане, наблюдением зон затопления, и параметров течения реки.

Цель работы

Целью данной работы являлось изучение возможностей дистанционного зондирования при помощи БЛА в целях мониторинга наводнений.

Глава 1. Физико-географическое описание объекта исследований

Ия, река в Иркутской области Российской Федерации. Длина 486 км, площадь бассейна 18 100 км². Берёт начало на северных склонах Восточного Саяна. В верховьях имеет горный характер, ниже долина реки расширяется, течение становится спокойным. Впадает в Окинский залив Братского водохранилища, подпор от которого распространяется на 320 км. Питание главным образом дождевое. Средний годовой расход воды у г. Тулун (119 км от устья) 149 м³/с. Замерзает в конце октября — начале ноября, вскрывается в конце апреля — начале мая. Главные притоки: Кирей — правый; Икей, Илир — левые.

1.1. Климатическая характеристика района

Климат бассейна реки Ия определяется его положением в центре материка и значительной приподнятостью над уровнем моря. Период с отрицательными температурами воздуха продолжается с октября по март, устойчивые морозы наступают в конце октября-начале ноября. Самые низкие температуры приходятся на январь. Характерной особенностью зимнего периода являются инверсии температуры. Устойчивые инверсии наблюдаются начиная с второй половины ноября, когда в приземном слое происходит резкое понижение температуры воздуха. Переход температуры через 10 С наступает в конце мая - начале июня. Наибольшие температуры наблюдаются в

первой декаде июля. Годовые суммы осадков по водосбору изменяются от 400 до 800 мм.

1.2. Почвенный покров

Формирование почвенного покрова находится в прямой зависимости от комплекса природных факторов, включая геоморфологические характеристики территории, климатические условия, литологический состав почвообразующих пород и уровень залегания грунтовых вод. Анализ содержания гумуса демонстрирует значительную вариабельность показателей: от максимальных значений порядка 5,0% в бурых горно-лесных и бурых горно-лесных остепненных почвах до минимальных 1,1% в бурых горно-лесостепных остепненных малоразвитых сильносмытых почвах с высокой степенью обнажения пород (25-50% и более).

Интенсивность эрозионных процессов варьирует в зависимости от типа почв, природных условий и антропогенной нагрузки. Рельеф местности выступает ключевым фактором, определяющим динамику эрозии. Преобладающая часть почвенного покрова бассейна формируется в условиях сложного расчлененного рельефа с крутыми склонами, что характерно для бурых горно-лесных, дерново-карбонатных смытых, черноземов карбонатных и выщелоченных смытых почв. Именно эти типы почв отличаются наиболее высокими показателями как потенциальной, так и реальной эрозионной опасности, что обуславливает необходимость применения комплексных противоэрозионных мероприятий.

К числу наиболее эффективных мер защиты почв от эрозии относятся: организация системы регулирования поверхностного стока, создание террасных систем, проведение обработки почв поперек склонов, замена традиционной отвальной вспашки на безотвальные методы обработки (плоскорезная обработка), оптимизация севооборотов с увеличением доли озимых культур и многолетних трав, создание защитных кулис и лесополос, внедрение систем регулируемого выпаса скота, мероприятия по задержанию склонов и другие агротехнические приемы.

Наиболее устойчивыми к эрозионным процессам являются почвы, сформированные на выровненных участках с минимальными уклонами. К этой категории относятся отдельные массивы карбонатных черноземов, а также луговые почвы, приуроченные к речным долинам и понижениям рельефа. Эти почвенные разности характеризуются значительно меньшей степенью эрозионной опасности и требуют менее интенсивных защитных мероприятий по сравнению с почвами территорий склонов.

1.3. Растительный покров

Территория расположена главным образом в подзоне южной тайги и отчасти в подзоне подтайги остепненной. Относится к Средне-Сибирской таежной провинции, где преобладают сосновые леса, а в наиболее возвышенных участках - леса из сибирской лиственницы, ели и пихты. Континентальный климат с достаточной влажностью и

умеренными температурами способствовал образованию почв преимущественно подзолистого типа.

В результате пожаров сплошная кедрово-пихтово-еловая тайга на влажных и холодных почвах замещена вторичными березовыми лесами, а по склонам опускание кровли вечной мерзлоты под гарями и усиление подзолообразования способствовали частичному замещению сосняками темнохвойной тайги. Сосновые и сосново-лиственничные боры преимущественно негустые, с хорошо развитым ярусом кустарников, в основном из даурского рододендрона, и густыми зарослями луговых и лесных трав. Под такими лесами формируются слабоподзоленные или неоподзоленные дерново-лесные или дерново-лесные бурые почвы. Сосна здесь чаще всего поселяется на южных склонах и террасах с песчаными или щебнистыми почвами; лиственница более обычна на холодных почвах междуречий и северных склонах.

1.4. Геологическое строение

Бассейн расположен в южной части Средне-сибирского плоскогорья и охватывает часть северных склонов Восточного Саяна. Рельеф Средне-сибирского плоскогорья разнообразен: в одних местах это плоская аллювиальная равнина, в других - горная страна с крутосклонными речными долинами и узкими водоразделами. В пределах бассейна залегают породы разнообразного возраста почти всех систем геологической шкалы (от докембрийской до четвертичной). Мощность отложений архея и протерозоя измеряется несколькими километрами. Осадочные

образования представлены отложениями кембрийской системы, ордовика, силура, юры и в меньшей степени породами девонского каменноугольного и пермского возрастов. Верхний слой представляет карбонатную толщу, сложенную известняками. Ордовинские отложения занимают большие пространства центральной части бассейна. Они представлены мергелями, аргелитами, песчаниками, известняками с максимальной мощностью 600 м. Силурийские отложения представлены красноцветными породами. Третичные отложения сохранились на небольших участках в Восточной части бассейна. Общая их мощность на отдельных участках 280 м. сложены они преимущественно глинами, иногда песчаниками и редко песками, образующими прослой в глине или плиты мощностью до 30 м. Четвертичные отложения представлены главным образом аллювием (галечниками, песками, слоистыми супесями, суглинками), слагающими многочисленные террасы крупных рек. Аллювий горных рек, как правило, отличается более крупным составом.

Глава 2. Методы дистанционного зондирования в мониторинге опасных гидрологических явлений

Мониторинг опасных гидрологических явлений включает в себя широкий спектр исследований, направленных на анализ режима рек, трансформации русла и моделирования зон затопления. Реализация этих задач осуществляется с применением различных методов дистанционного зондирования, которые условно можно

классифицировать на космический мониторинг (подразделяющийся на радиолокационный и оптический) и аэрофотосъёмочные методы.

Как отмечают большинство исследователей, определение зон затопления представляет собой многоступенчатую процедуру, решаемую двумя основными подходами: геометрическим (ГИС-ориентированным) и гидродинамическим (физически обоснованным). В рамках геометрического подхода удовлетворительная точность расчётов достигается при наличии разветвлённой сети гидрологических постов [8]. Гидродинамический подход [9] предполагает моделирование динамики водных потоков (решение уравнений Сен-Венана или Навье-Стокса) с последующим совмещением полученной поверхности воды с цифровой моделью рельефа (ЦМР).

Ключевым фактором при оценке границ затопления является достоверность исходных данных. Независимо от выбранного подхода, точность расчётов во многом определяется детальностью топографической информации. Рельеф может быть получен различными способами: методами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), топографическими картами, спутниковой навигацией и др. Однако при моделировании затопления населённых пунктов использование ДЗЗ часто оказывается недостаточно точным из-за погрешностей планово-высотной привязки, а топографические карты дают приемлемые результаты лишь на участках со сложным рельефом, где уклоны водной поверхности значительны, а

масштаб картографических сечений сопоставим с величиной подъёма уровня воды.

В связи с этим возникает необходимость в уточнении рельефа речных долин посредством полевых исследований, включающих русловую съёмку (для крупных рек допустимо использование лоцманских карт) и топографо-геодезические работы в пойме. Традиционная топографическая съёмка требует значительных временных и трудовых затрат как на этапе полевых измерений, так и при камеральной обработке, особенно в условиях труднодоступных территорий. В настоящее время наиболее эффективным методом получения данных о рельефе является фотограмметрическая обработка материалов, полученных с беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

Главными достоинствами современной аэрофотосъёмки является:

- оперативность получения исходных данных;
- автоматизация обработки и высокая точность итоговых моделей;
- цифровой картографический материал в виде ортофотопланов и блоков точек.

Ортофотопланы являются важным источником информации при оценке количества объектов в зоне затопления.

В то же время корректность оценки повторяемости экстремальных гидрологических явлений во многом определяется продолжительностью рядов наблюдений. Ключевым вопросом здесь является недостаточная гидрологическая изученность рек. При значительной

удаленности расчетного створа от стационарного гидропоста возникает проблема определения максимального уровня воды, поскольку в соответствии с СП 33-101-20032 перенос отметок водной поверхности допускается в пределах небольших по длине речных участков (1–3 км). При гидродинамическом подходе такой проблемы не возникает, однако требуется более широкий перечень информации о гидравлических и морфометрических характеристиках русла и поймы, верификация численной модели по эмпирически полученным параметрам и значительные вычислительные мощности. Как итог, расчетные контуры зон затопления являются основой при внесении границ затапливаемых территорий в единый государственный реестр недвижимости, используются для планирования действий при чрезвычайных ситуациях или при разработке мероприятий по минимизации негативного воздействия вод, а также интегрируются в базы данных различных ГИС-систем и систем мониторинга.

2.1. Космический мониторинг

Система космического мониторинга схода снежного покрова и паводковой динамики включает несколько взаимосвязанных функциональных блоков: оперативного мониторинга, обзорно-аналитический, моделирования и передачи данных, среди которых центральное место занимает блок оперативного мониторинга.

Функциональная архитектура данной ГИС-технологии построена по трехуровневому принципу и предназначена

для решения комплекса задач, включая оперативный и обзорный мониторинг схода снежного покрова и паводковых процессов, анализ динамики водной поверхности, а также выполнение периодических специализированных задач, таких как мониторинг ледовых заторов.

На первом уровне системы осуществляется ежедневный анализ данных низкого пространственного разрешения, которые, несмотря на ограниченную детализацию, обладают высокой ценностью благодаря ежедневному охвату всей исследуемой территории, что позволяет оперативно оценивать текущее состояние объектов и отслеживать их динамику. Второй уровень предполагает использование данных среднего разрешения (15-70 метров), включая радарную информацию. Эти данные, обладая более узкой полосой съемки и меньшей периодичностью по сравнению с низкоразрешающими снимками, обеспечивают повышенную точность мониторинга. С 2014 года на данном уровне активно применяются оптические данные Landsat с пространственным разрешением 30 метров и стандартным размером сцены 180×180 км, отличающиеся высокой точностью геопривязки.

Наиболее детализированный третий уровень системы использует данные высокого (1-10 метров) и сверхвысокого (менее 1 метра) разрешения, получаемые как оптическими, так и радарными методами дистанционного зондирования. Несмотря на такие преимущества как высокая информативность, применение этих данных ограничивается их значительной стоимостью,

необходимостью предварительного заказа и стопроцентной предоплаты за 1-2 недели до съемки. Однако в условиях чрезвычайных ситуаций, связанных с масштабными затоплениями или разрушением гидротехнических сооружений, доступ к подобным данным может быть оперативно обеспечен через международные организации, координирующие мониторинг ЧС.

Обработка данных дистанционного зондирования осуществляется с помощью специализированных программных модулей, интегрированных в ГИС-среду, где процессы предварительной и тематической обработки выполняются в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Ключевой задачей на всех уровнях мониторинга является точное разделение водных и неводных объектов с возможностью последующей детализации классов подстилающей поверхности. Для водных объектов проводится дифференциация на покрытые льдом и свободные ото льда участки, тогда как для неводных территорий выделяются зоны с устойчивым снежным покровом и освободившиеся от снега, с дополнительным выделением областей активного снеготаяния, где температура поверхности превышает 0°C .

Важным аспектом классификации является разделение водных объектов на постоянные (стабильные), определяемые по космическим снимкам в период минимального уровня воды, и временные зоны затопления, вычисляемые как разница между текущей водной поверхностью и постоянными водными объектами. Для формирования масок постоянных водных объектов на первых двух уровнях используются осенние снимки

Landsat, тогда как для данных высокого разрешения применяются архивные материалы или информация с общедоступных спутниковых картографических сервисов.

Существенным фактором, влияющим на качество оптических данных, является облачный покров, для учета которого вводится специальный класс территорий с невозможностью определения состояния подстилающей поверхности. Применение методов атмосферной коррекции позволяет частично снизить влияние дымки и разреженной облачности. В отличие от оптических данных, радарная съемка демонстрирует значительно меньшую зависимость от облачности и времени суток, что делает ее особенно ценной для ночного мониторинга.

Анализ выявленных зон затопления включает оценку их потенциальной опасности, которая определяется динамикой развития и наличием в зоне влияния критически важных объектов инфраструктуры, жилых и промышленных зон. Для точной идентификации таких объектов используются специализированные тематические ГИС-слои, соответствующие уровню детализации данных, а также методы текстурного анализа высокоразрешающих снимков.

Обзорно-аналитическая составляющая системы базируется на обработке сезонных и многолетних рядов данных. В течение паводкового сезона на основе ежедневного мониторинга формируются. Сезонные карты, отражающие совокупные зоны затопления, служат основой для сравнительного анализа развития паводковой ситуации в различные годы и проведения районирования территорий

по степени риска затопления, оцениваемой частотой повторяемости событий за исследуемый период.

Многолетние данные мониторинга позволяют реконструировать пространственно-временную динамику паводков, выстраивая сценарии от минимальных до экстремальных проявлений, что имеет ключевое значение для разработки эффективных превентивных мер. Прогностическое моделирование осуществляется специализированной группой с применением гидрологической модели FLO-2D, цифровых моделей рельефа и комплекса картографических и гидрологических данных.

2.2. Дистанционное зондирование с использованием аэрофотосъемки

По сравнению с спутниковым мониторингом, применение БЛА для мониторинга обеспечивает более высокий уровень оперативности при значительно более низких затратах. Помимо этого, применение БЛА позволяет получать крайне детализированное изображение в реальном времени, что обеспечивает возможность получения данных, недоступных иным способам дистанционного зондирования.

Аэрофотосъемка подразделяется на несколько видов в зависимости от количества используемых снимков и их пространственного расположения. Основными типами являются одинарная, маршрутная и площадная аэрофотосъемка, каждый из которых применяется в

зависимости от поставленных задач и характеристик изучаемой территории.

Одинарная аэрофотосъемка используется в случаях, когда необходимо зафиксировать небольшой участок земной поверхности, не требующий серии снимков. Например, она применяется для документирования местоположения гидрологического поста или других локальных объектов, которые полностью умещаются в пределах одного аэроснимка. Такой метод отличается простотой исполнения, но имеет ограниченную область применения из-за малого охвата территории.

Маршрутная аэрофотосъемка предназначена для съемки протяженных линейных объектов, таких как реки, каналы, автомобильные или железные дороги, а также береговые линии морей и озер. Маршруты могут прокладываться по прямой, кривой или ломаной траектории в зависимости от конфигурации объекта. Важной особенностью этого метода является обязательное перекрытие соседних снимков, обеспечивающее непрерывность данных. Величина продольного перекрытия, то есть зоны наложения между последовательными кадрами, обычно составляет 60%, что обусловлено требованиями последующей фотограмметрической обработки. Такое перекрытие позволяет точно сопоставить снимки и построить корректные стереоскопические модели рельефа.

Площадная аэрофотосъемка применяется для исследования обширных территорий, включая крупные болотные массивы, водохранилища, озера и водосборные бассейны. В отличие от маршрутной съемки, здесь

используется система параллельных маршрутов, которые также перекрываются между собой. Это перекрытие, называемое поперечным, обычно составляет 30–40% и необходимо для полного покрытия территории без пропусков. Площадная съемка позволяет получать детальные данные о больших участках местности.

2.2.1 Расчет технических параметров аэрофотосъемки речных бассейнов

Помимо величин продольного и поперечного перекрытий аэроснимков, при планировании гидрологических исследований определяют масштаб аэрофотосъёмки, тип аэрофотоаппарата (АФА) и фокусное расстояние его объектива.

Установлено, что объект различим на аэроснимке, если его размер превышает 0,1 мм, а контрастность составляет не менее 0,06 (практически до 0,10). Масштаб плановой аэрофотосъёмки в данном случае зависит от габаритов идентифицируемого гидрографического объекта с учётом разрешающей способности снимка и тонового контраста между объектом и фоном, то есть разницы их оптических плотностей.

При проведении маршрутной аэрофотосъёмки вдоль реки для последующих измерений её ширины методика определения минимального масштаба съёмки иная. Он задаётся требуемой точностью измерений, графической погрешностью определения длины отрезка на аэроснимке и шириной водотока.

Измерения протяжённых водных объектов (рек, каналов) обычно выполняют по фотопланам, составленным из трансформированных аэроснимков, приведённых к единому масштабу и скорректированных на угол наклона оптической оси АФА в момент съёмки. Допустимая погрешность монтажа снимков по опорным точкам составляет $\pm 0,5$ мм. С учётом инструментальной погрешности измерений средняя ошибка определения длины реки на фотоплане достигает $\pm 0,6\text{--}0,7$ мм. Если предельная абсолютная погрешность измерения длины реки или канала не должна превышать, например, ± 10 м, то масштаб фотоплана должен быть не мельче 1:15 000 [6].

Для создания фотопланов равнинных территорий аэрофотосъёмку выполняют в масштабе, в 2,5–3 раза мельче итогового, что обеспечивает необходимую точность монтажа увеличенных снимков.

Во всех рассмотренных случаях речь идёт о плановых измерениях водных объектов без учёта высотных характеристик. Для минимизации искажений положений точек на аэроснимках, вызванных рельефом местности, применяют длиннофокусные АФА.

В практике аэрофотогеодезических исследований водных объектов часто возникает необходимость в стереофотограмметрическом определении глубин водоёмов, высот бровок речных русел, превышений между точками местности и уклонов водосборных поверхностей.

Ключевыми факторами, влияющими на точность стереоскопических измерений превышений по аэроснимкам, являются масштаб аэрофотосъёмки, высота фотографирования, фокусное расстояние объектива АФА,

характер рельефа, степень экранирования водосборов растительностью.

Как правило, чем крупнее масштаб съёмки и короче фокусное расстояние объектива, тем выше точность определения высот точек речных водосборов. Такой масштаб обычно в 1,5–2,5 раза крупнее, чем при съёмке для изготовления фотопланов.

Важно подчеркнуть, что при расчёте параметров аэрофотосъёмки для определения превышений и высот объектов высота фотографирования является первичным параметром, а не производным.

В предгорных и горных районах (абсолютные высоты 500–2000 м) высоту съёмки увеличивают. Точность стереофотограмметрических измерений превышений составляет порядка $\pm 1,0$ м для открытых водосборов и $\pm 2,0$ м — для закрытых.

В зависимости от степени расчленённости рельефа аэрофотосъёмку для стереофотограмметрических измерений выполняют короткофокусными аэрофотоаппаратами с различным фокусным расстоянием.

2.4. Фотограмметрические требования к аэрофотосъёмочным работам

Точность измерительных операций на аэроснимках, полнота и достоверность результатов дешифрирования объектов местности в значительной степени зависят от качества материалов аэрофотосъёмки, что обуславливает необходимость соблюдения специальных технических

требований к проведению съемочных работ. Контроль выполнения этих требований осуществляется посредством фотографической и фотограмметрической оценки качества аэроснимков.

Фотографическая оценка качества аэроснимков основывается на анализе сенситометрических показателей, включающих величину плотности вуали, минимальную и максимальную оптические плотности, коэффициент контрастности фотоизображения. Все указанные параметры должны находиться в пределах установленных нормативных допусков.

Фотограмметрические требования к аэрофотосъемочным работам предусматривают, что отклонение маршрутов съемки от заданного направления не должно превышать 15 мм в масштабе аэроснимка, степень непрямолинейности съемочных маршрутов ограничивается 8%, а угол непараллельности базиса фотографирования сторонам аэроснимка не должен быть более 5°. При этом минимальные значения продольного и поперечного перекрытий аэроснимков составляют соответственно 56% и 17%.

Фотограмметрическая дисторсия объектива АФА вызывает искажения на аэроснимках, проявляющиеся в искривлении прямых линий, которые приобретают выпуклую или вогнутую форму относительно центра снимка в зависимости от характера дисторсии. Кроме того, возникает систематическая погрешность при измерении расстояний от центра снимка до произвольной точки изображения, причем величина этой погрешности не пропорциональна расстоянию. В случаях, когда указанные

искажения превышают допустимые значения, они подлежат обязательному учету и коррекции.

Определение величины дисторсии объектива АФА для различных зон аэроснимка осуществляется в процессе калибровки элементов внутреннего ориентирования, которые устанавливают положение снимка относительно центра проектирования. Главная точка аэроснимка определяется как основание перпендикуляра, опущенного из центра проектирования на плоскость прикладной рамки АФА (аэронегатива), при этом длина этого перпендикуляра соответствует фокусному расстоянию объектива. Координаты главной точки (x_0 , y_0) в системе координат снимка совместно с величиной фокусного расстояния составляют элементы внутреннего ориентирования.

Процедура определения элементов внутреннего ориентирования и дисторсии объектива выполняется на специализированной оптической скамье, оборудованной зрительной трубой, измерительной сеткой, горизонтальным измерительным кругом (лимбом) и микроскопом-микрометром. Измерения проводятся не только по осям x и y аэроснимка, но и по его диагоналям, что позволяет выделить радиальную и тангенциальную составляющие дисторсии. Полученные значения радиальной и тангенциальной дисторсии вносятся в паспортные данные АФА.

Компенсация влияния дисторсии объектива достигается при обработке аэроснимков на универсальных стереофотограмметрических приборах за счет использования принципа обратимости проектирующих лучей, существовавших в момент фотографирования.

Контроль стабильности высоты полета в пределах аэросъемочного маршрута осуществляется с помощью статограммы статоскопа, которая фиксирует превышения между соседними центрами проектирования (концами базиса фотографирования). В нормальном режиме работы прибора статограмма содержит среднюю прямую линию, соответствующую неработающему колену прибора и выполняющую функцию оси симметрии, на которой точками отмечены моменты экспозиций, а также две симметричные кривые, формируемые менисками работающего колена статоскопа.

Для определения изменения высоты полета между двумя конкретными аэроснимками анализируются соответствующие им отсчеты на статограмме. Под отсчетом по статограмме понимается расстояние в миллиметрах, измеренное по перпендикуляру к оси симметрии между кривыми линиями, причем отсчет считается положительным, если прерывистая кривая расположена выше оси симметрии, и отрицательным - если ниже. При этом анализ статограммы выполняется со стороны эмульсионного слоя, а направление полета соответствует движению слева направо.

2.2.3. Гидрографическое дешифрование аэроснимков

Дешифрирование аэроснимков представляет собой комплексный процесс исследования фотоизображения местности, направленный на выявление, идентификацию и анализ объектов с определением их качественных и количественных характеристик. В практике различают два

основных вида дешифрирования: общегеографическое и специальное (тематическое). Общегеографическое дешифрирование характеризуется универсальностью подхода, при котором все элементы местности отображаются с одинаковой степенью детализации на аэроснимках, фотопланах или топографических основах. Специальное дешифрирование отличается целевой направленностью и ориентировано на выявление специфических объектов, которые могут быть незначительными по размерам или слабо выраженными на снимках, но имеющими принципиальное значение для решения конкретных исследовательских задач.

Гидрографическое дешифрирование, являясь разновидностью специального дешифрирования, специализируется на анализе водных объектов суши. Оно включает определение параметров рек, озер и водохранилищ, классификацию типов болот и оценку их увлажненности, изучение характеристик водосборных поверхностей, анализ влияния этих факторов на формирование речного стока, а также картирование границ снежного покрова. Для проведения региональных исследований, таких как мониторинг разливов рек во время паводков, динамики снежного покрова или ледовых явлений на крупных водоемах, требуется использование разновременных космических снимков земной поверхности. Мелкомасштабные космические снимки обеспечивают получение однородных данных на обширных территориях благодаря широкому охвату местности.

Решение специализированных гидрологических задач, например, изучение динамики речных наносов или русловых процессов, требует применения крупномасштабных аэроснимков, позволяющих выполнять высокоточные измерения. Синхронное проведение космических и аэрофотосъемочных работ повышает достоверность дешифровочных признаков объектов на космических изображениях. Оптимальная организация гидрографических исследований предполагает комплексное использование данных мелкомасштабной космической съемки, крупномасштабной аэрофотосъемки и результатов наземных гидрологических наблюдений, проводимых на стационарных станциях и постах.

Качество дешифрирования напрямую зависит от информативности аэроснимков, что предъявляет особые требования к условиям проведения аэрофотосъемки. К ключевым природным факторам относятся особенности ландшафта, освещенность, спектральная отражательная способность объектов, наличие атмосферной дымки и время выполнения съемочных работ. Внешний облик ландшафтов, формируемый растительностью, рельефом и водными объектами, существенно изменяется в зависимости от сезона. Например, аэрофотосъемка тундровых районов в конце лета позволяет зафиксировать состояние растительного покрова и водных объектов в период летней межени, а осенняя съемка лесных массивов дает возможность дифференцировать типы древостоя по характеристикам крон деревьев.

Важное значение для качества съемки имеет высота солнца, влияющая на контрастность изображения. Выбор

оптимального спектрального диапазона съемки должен основываться на анализе спектральных коэффициентов яркости характерных для данной местности групп объектов, что позволяет достичь их четкого разделения на снимках. Учет влияния атмосферной дымки, снижающей контрастность изображения, требует применения соответствующих светофильтров при съемке с больших и средних высот.

Наряду с природными факторами, существенную роль играет правильный выбор технических средств аэрофотосъемки. Комплексный учет географических, атмосферно-оптических и технических аспектов съемки определяет потенциальную информативность получаемых аэроснимков. Методика дешифрирования строится по принципу "от общего к частному" - от четко выраженных крупных объектов к менее заметным деталям, что позволяет минимизировать вероятность пропусков и ошибок при интерпретации изображения.

Помимо того, что построение ортофотопланов по результатам аэрофотосъёмки позволяет отслеживать планово-высотные изменения русла и поймы, производить построение зон затопления, современные методы обработки позволяют использовать фото- и видеозаписи с БЛА для выявления глубин и скорости течения исследуемого объекта.

Глубокая обработка снимков, основанная на разнице светопропускаемости воды для разных основных цветов, при съёмке в различных спектрах позволяет выделить на снимках зоны различных глубин, зоны затапливаемой поймы, переувлажнённые зоны.

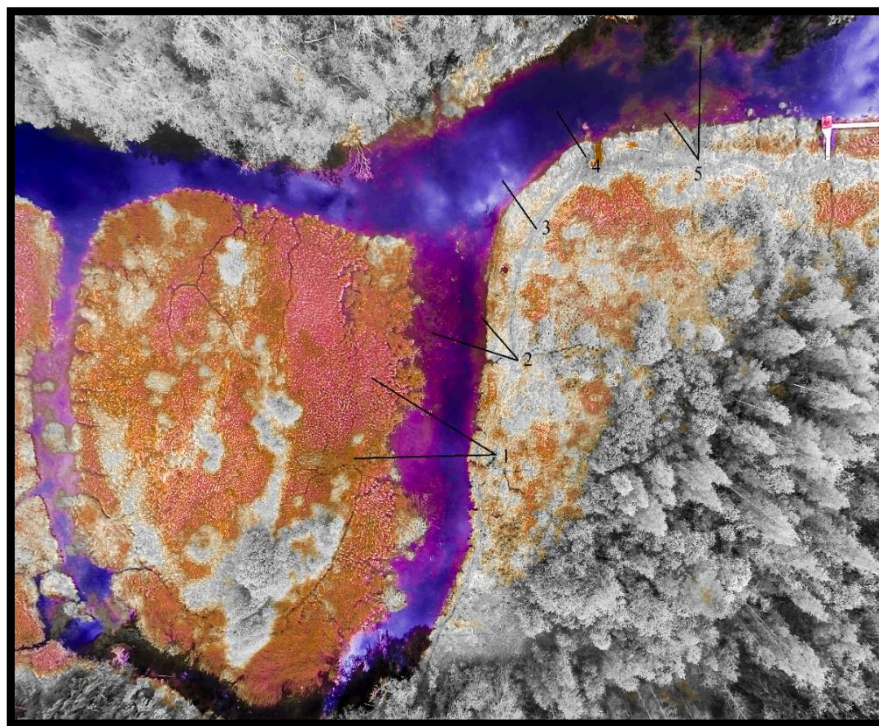


Рисунок 1. Снимок участка русла реки Оредеж в красно-синем спектре

На снимке в красно-синем спектре можно выделить переувлажнённые и подтопленные участки поймы (1), зоны малых глубин (2), зону наибольших глубин (4) и зону малых глубин, обусловленных наличием водной растительности (5).

Таким образом можно выявить диапазон, отвечающий за определённую зону, и рассматривать интересующую область.

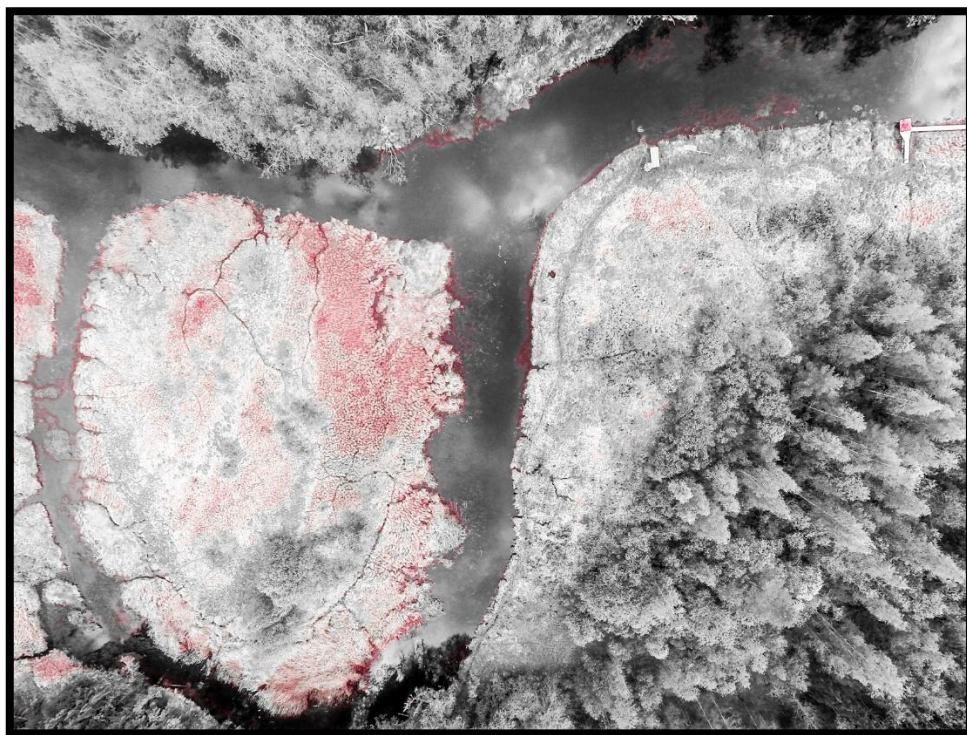


Рисунок 2. Снимок в красном спектре - зона наиболее малых глубин (до 10 см)

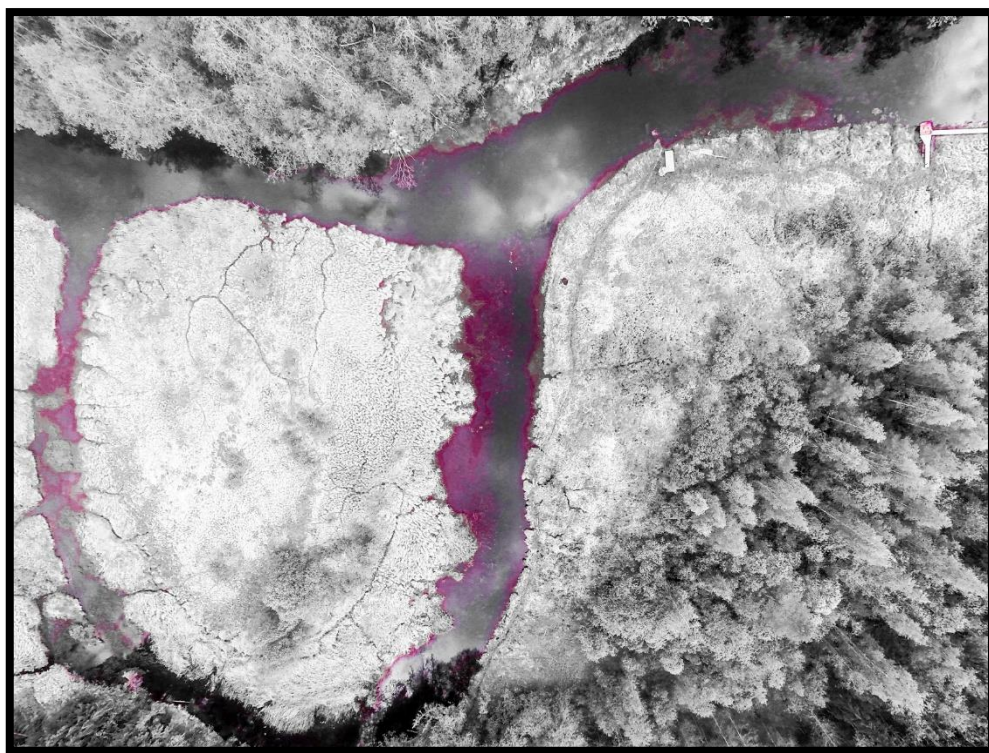


Рисунок 3. Пурпурный спектр- зона малых глубин (10-40 см)

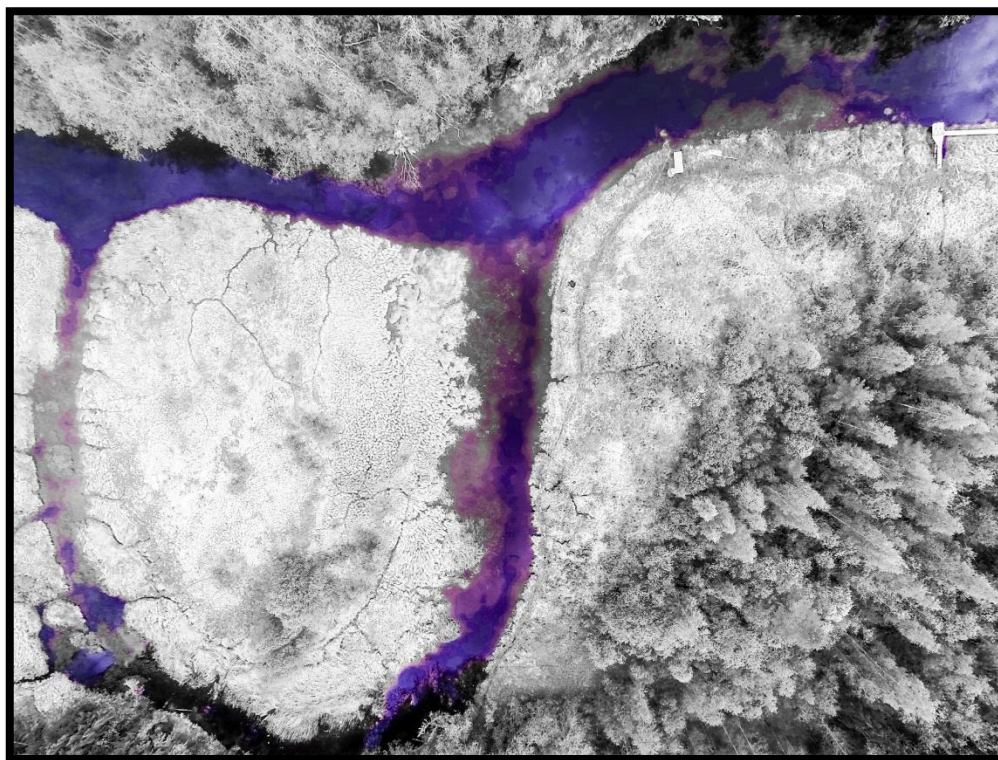


Рисунок 4. Лиловый спектр – зона больших глубин (от 40 см)

Помимо этого, существует возможность применения дистанционного зондирования с БЛА для измерения поверхностных течений по косвенным признакам. Одним из возможных для решения этой задачи методов является наблюдение деформаций сгенерированной волны.

Так как известно, что в условиях стоячей воды волны от исходной точки распространяются во все стороны с одинаковой скоростью, их деформации возможно привязать к распределению скоростей в потоке.



Рисунок 5. Деформация сгенерированной волны.

На рисунке 5 мы видим отклонение фактической от предполагаемой идеальной сгенерированной волны. Фактически волна имеет вытянутую в направлении течения форму, и неравномерность отклонения фактической волны от предполагаемой позволяет наблюдать разницу скоростей течений по ширине потока.

2.2.4. Методика проведения полевых работ с БЛА

Современные технологии дистанционного зондирования Земли находятся в состоянии постоянного прогресса и совершенствования. Данные, получаемые методами аэрофотосъемки и космической съемки, находят все более широкое применение в многообразных сферах человеческой деятельности. В настоящее время для создания геопривязанных ортофотопланов местности отпала необходимость использования дорогостоящих

методов аэрофотосъемки, таких как спутниковая съемка или съемка с использованием малой авиации. Такие возможности появились благодаря интенсивному развитию технологий сверхмалой беспилотной авиации. Современные беспилотные летательные аппараты демонстрируют высокую производительность, позволяя за один полет осуществлять съемку территорий площадью от нескольких десятков до нескольких тысяч гектаров, получая при этом значительное количество снимков, которые впоследствии используются для построения точных ортофотопланов.

Для выполнения кадастровых и ряда других специальных работ требуются высокоточные ортофотопланы с пространственным разрешением не менее 5 см на пиксель и точностью определения плановых координат от 10 см и выше. Обеспечение такой точности географической привязки конечных продуктов достигается применением двух основных методов. Первый метод предполагает предварительную разметку на местности специальных пунктов планово-высотного обоснования. Эти пункты представляют собой контрастные маркеры, координаты которых определены с высокой точностью инструментальными методами, и которые должны быть четко идентифицируемыми на получаемых аэрофотоснимках. Процесс географической привязки растровых данных выполняется на этапе камеральной обработки с использованием координат этих опорных пунктов.

Второй метод основан на использовании беспилотных систем, оснащенных высокоточными геодезическими

приемниками, работающими в комплексе с наземной базовой станцией. Базовая станция устанавливается в точке с известными координатами и выполняет непрерывный мониторинг спутниковой группировки с частотой записи данных от 1 до 10 Гц. В процессе постобработки специализированное программное обеспечение анализирует данные спутниковых наблюдений, полученные как с борта летательного аппарата, так и с наземной станции, вычисляя точные координаты центров фотографирования с учетом всех параметров пространственного положения БПЛА в момент съемки.

Ранее для подобных работ преимущественно применялись БПЛА самолетного типа, обладающие значительной площадью покрытия за один полет. Однако такие системы имеют существенные эксплуатационные ограничения, обусловленные их конструктивными особенностями: необходимость в протяженных взлетно-посадочных полосах, использование катапультных устройств, невозможность оперативного прерывания и возобновления полетного задания. В сравнении с ними БЛА вертолетного типа демонстрируют существенные преимущества, имея возможность старта с минимальной площадки в несколько квадратных метров, при этом по производительности не уступая некоторым моделям самолетного типа. Важным достоинством мультироторных систем является их способность выполнять полеты на меньших высотах с пониженными скоростями, что в конечном итоге обеспечивает получение аэрофотоснимков с исключительно высоким пространственным разрешением.



Рисунок 6. БЛА вертолётного типа DJI Phantom 4 PRO

В рамках рассматриваемых работ использовался квадрокоптер DJI Phantom 4 PRO, занимающий значительную долю рынка мультироторных БПЛА. Данная модель отличается оптимальным сочетанием стоимости и технических характеристик, включая 20-мегапиксельную камеру с трехосевым гиростабилизированным подвесом. Для повышения точности позиционирования аппарат оснащается специализированной ГНСС-платой, заменяющей штатный GPS-приемник. Этот модуль обеспечивает высокоточную навигацию и запись спутниковых данных в кинематическом режиме. В процессе постобработки методом РПК (Post Processing Kinematic) на основе данных с бортового приемника и базовой станции вычисляются уточненные координаты центров фотографирования. Специальная плата

синхронизации фиксирует точный момент срабатывания затвора камеры, что позволяет в процессе обработки получить высокоточные пространственные привязки каждого снимка.

Подготовительный этап работ включает создание сети опорных пунктов планово-высотного обоснования, используемых для контроля качества ортофотопланов и их географической привязки. Эти пункты представляют собой контрастные маркеры, обеспечивающие надежное распознавание при камеральной обработке. При отсутствии высокоточной ГНСС-аппаратуры на борту БПЛА рекомендуется равномерное распределение пунктов по площади съемки с плотностью 200-500 метров между соседними маркерами.

Определение точных координат опорных пунктов выполняется с использованием спутникового оборудования в режиме RTK (Real Time Kinematic). Технология предполагает использование базовой станции, устанавливаемой на пункте государственной геодезической сети, которая в реальном времени передает корректирующие поправки на мобильный приемник через CSD-канал связи.

Планирование полетного задания осуществляется с учетом характеристик рельефа и объектов местности с использованием специализированного программного обеспечения. Перед выполнением работ проводится комплексная проверка технического состояния БПЛА, включая осмотр корпуса, проверку двигателей, состояния пропеллеров, работы подвеса камеры и показаний навигационных систем.

Непосредственно перед запуском базовая станция переводится в режим статического наблюдения с частотой 1-5 Гц. Взлет выполняется с открытой площадки после подтверждения устойчивого спутникового сигнала. На рабочей высоте осуществляется фокусировка камеры в надирном положении с последующей фиксацией фокуса на весь период съемки.

Завершающим этапом является контроль качества полученных материалов, включающий проверку наличия и качества аэрофотоснимков, а также анализ спутниковых данных. RINEX-файлы с бортового оборудования и базовой станции проверяются на соответствие критериям качества сигнала: 30-50 дБГц для частоты L1 и 25-50 дБГц для частоты L2.

Глава 3. Мониторинг наводнения в г. Тулун, июнь 2019 года

3.1. Зоны затопления

Масштабное наводнение, произошедшее в г. Тулун, река Ия, а июне 2019 года, по масштабу нанесённого ущерба стало один из крупнейших в России за последние десятилетие и актуализировало проблему возможностей мониторинга опасных гидрологических явлений.

В работе «Построение зон затопления на реке Ия средствами ГИС» было проведено исследование участка реки Ия у города Тулун, были построены зоны затопления для уровней воды различной обеспеченности(1%, 5%, 10%).

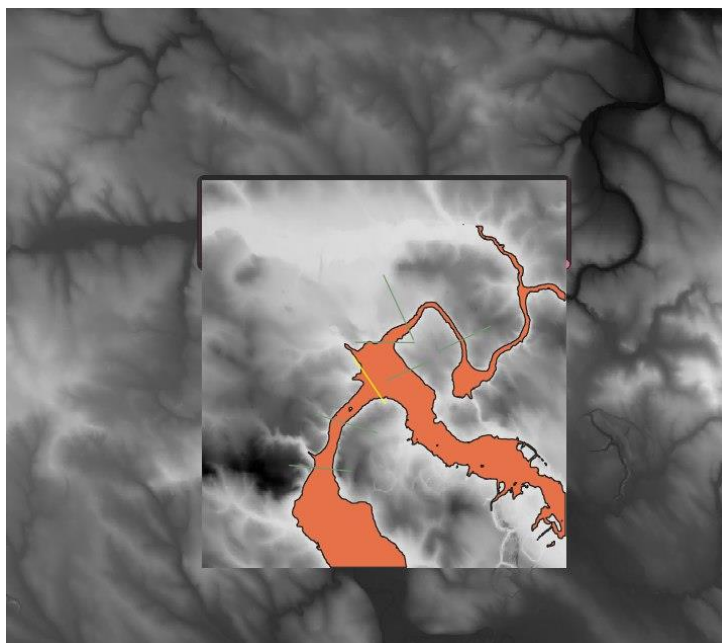


Рисунок 7. Эмпирическая зона затопления

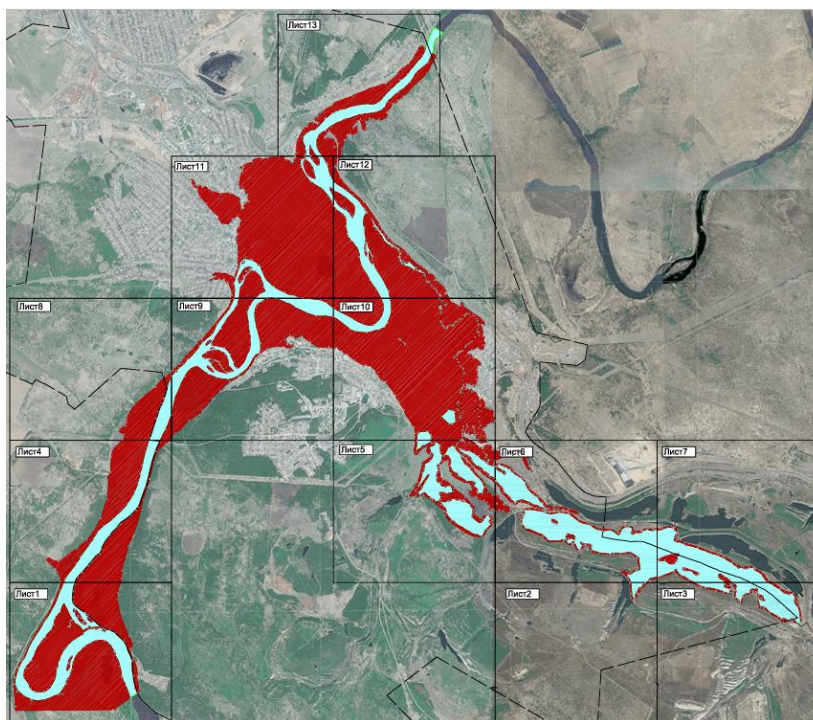


Рисунок 8. Зона затопления при прохождении максимальных расходов паводка

Автор работы подчёркивает[3], что эмперически рассчитанные зоны затопления отличаются от фактических как по площади, так и по распространению водных потоков. Это происходит из-за неучтённых при расчёте зон затопления факторов, таких как мусорные заторы.[3] Мониторинг с помощью БЛА позволяет выявлять такие факторы, отслеживать движение потоков и формирование мусорных заторов.

3.2. Мониторинг возникновения мусорных заторов с помощью БЛА



Рисунок 9 Мусорные заторы у правого берега р. Ия, наводнение в г. Тулун

На съёмке с дрона можно увидеть сформировавшиеся снесённых потоком зданий и растительности мусорные заторы. На рисунке 9 отчётливо видно скопления мусора,

возникшие вследствие наличия на пути потока преград в виде деревьев и построек. На момент выполнения съёмки признаков наличия существенных скоростей потока в этой местности не наблюдалось.



Рисунок 10. Мусорные заторы у моста через р. Ия, наводнение в г. Тулун

На рисунке 10 вновь можно наблюдать отдельные мусорные заторы, сформированные у деревьев, а так же массу зданий и их конструктивных элементов, сформировавших крупный затор у автомобильного моста, представляющий собой существенную преграду для потока, сильно уменьшая пропускную способность русла под мостом, что ведёт к большему распространению воды.



Рисунок 11. Движение потоков воды при наводнении в г. Тулун

Помимо скопления и движения мусора, на представленных кадрах можно увидеть движение отдельных водных потоков и причиняемые ими деформации рельефа и разрушения инфраструктуры, оказывающие влияние на распространение затопления. На рисунке 11 видно направления потоков воды, перекатывающихся через разрушаемую ими насыпь грунтовой автодороги.



Рисунок 12. Мусорные заторы и движение потоков воды при наводнении в г. Тулун

На рисунке 12, помимо отчётливо видимого направления движения потока, можно различить образовавшийся между построек затор, сформированный видимым потоком и ограничивающий его движение.



Рисунок 13. Мусорные заторы и движение потоков воды при наводнении в г. Тулун

На рисунке 13 можно наблюдать более сложное движение потока. Преодолев полосу застройки, расположенную вдоль русла реки, он меняет направление на параллельное течению реки, перекашиваясь через автодорожную насыпь и размывая её. Далее можно рассмотреть затор, сформированный принесённым этим потоком мусором.

Вывод

В ходе работы нами были изучены методы дистанционного зондирования речных бассейнов, изучены возможности и перспективы применения БЛА для мониторинга опасных гидрологических явлений, как уже активно используемые, так и перспективные. На примере работ, проведённых на реке Ия во время наводнения в городе Тулун в 2019 году были продемонстрированы возможности применения дистанционного зондирования с БЛА для выявления факторов, учёт которых позволит уточнить модели зон затопления. Были изучены съёмки с БЛА, выполненные во время наводнения в городе Тулун на реке Ия в 2019 году. В результате анализа материала были выявлены возможности по определению областей образования мусорных заторов и направлений движения потоков.

Список использованной литературы:

1. Мониторинг паводков и наводнений: [электронный ресурс]// Геопространственное агентство ИННОТЕР. URL: <https://innotes.com/articles/>
2. DJI blog: [Электронный ресурс]/ URL: <https://dji-blog.ru/>
3. К.О. Балабин, Н.В. Лагай. Построение зон затопления на реке Ия средствами ГИС
4. <https://na-journal.ru/>
5. Ергина Е. И., Тимченко З. В. Почвы бассейна реки Ангара / Ергина Е. И., Тимченко З. В. - Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. Том 2 (68). №2. 2016 г. С. 86–94.
6. Ю. А. Федоров. Практикум по аэрогеодезическим исследованиям вод суши / Ю. А. Федоров. – Российский Государственный Гидрометеорологический институт, 1992. – 86 с.
7. Ресурсы поверхностных вод СССР том 16 выпуск 2. Ангара / Гидрометиздат, 1972. – 595 с.
8. Волчек А.А., Петров Д.О., Костюк Д.А. Алгоритм вычисления границ области затопления для речной сети с моделированием распространения воды по растровому представлению рельефа // Доклады БГУИР. Брест: Брестский государственный технический университет, 2016. № 5. С. 73–78
9. Лепихин А.П., Любимова Т.П., Ляхин Ю.С., Тиунов А.А., Богомолов А.В., Перепелица Д.И., Паршакова Я.Н. Гидродинамическое моделирование реки Вятки в среднем течении: постановка задачи, результаты расчетов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 3. С. 16–32.