



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 БПЛА в
гидрометрической практике

Исполнитель Архипов Матвей Андреевич
(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)

«01» июня 2026 г.

Санкт-Петербург
2026

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. НЕОБХОДИМОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЕЙ БЕРЕГОВ. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ.	5
1.1 Необходимость проведения наблюдений.....	5
1.2. Общие принципы проведения наблюдений.....	7
2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДЕФОРМАЦИЕЙ БЕРЕГОВ.....	9
2.1 Геодезические методы наблюдения.....	9
2.1.1 Съёмка береговой линии.	9
2.1.2 Выполнение тахеометрической съёмки участка береговой линии..	12
2.1.3. Примеры выполненных работ с использованием геодезических методов	15
2.2. Спутниковые методы наблюдения	21
2.2.1 Описание методики спутниковых наблюдений	21
2.2.2 Обработка спутниковых данных	23
2.2.3 Пример выполненной работы по наблюдению за деформацией берегов с использованием спутниковых методов.....	25
3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЕЙ БЕРЕГОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА.	27
3.1 Технические характеристики и возможности БПЛА.....	27
3.2 Методика наблюдения за деформациями берегов с использованием БПЛА	29
3.2.1 Съёмка области исследования с БПЛА.....	29
3.2.2 Обработка аэрофотосъёмки местности.....	31
3.3. Пример выполненной работы по наблюдения за деформацией берегов согласно предлагаемой методики	34
4. АНАЛИЗ РАССМОТРЕННЫХ МЕТОДИК НАБЛЮДЕНИЯ.....	39
4.1. Геодезические методы.....	39
4.1.1 Положительные стороны применения геодезических методов наблюдения	39
4.1.2 Отрицательные стороны применения геодезических методов наблюдения	40
4.2. Спутниковые методы (оптические снимки, радиолокационная съёмка)	40

4.2.1 Положительные стороны использования спутниковых методов наблюдения.	40
4.2.2 Отрицательные стороны использования спутниковых методов наблюдения	41
4.3. Предлагаемая методика наблюдения за деформациями с использованием БПЛА	41
4.3.1 Положительные стороны использования предлагаемой методики.	41
4.3.2 Отрицательные стороны использования предлагаемой методики. .	42
4.4 Выводы по сравнению методик.	43
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ	45
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	48

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии в изыскательной сфере сделали огромный скачок в своем продвижении. Большинство известных ранее технологий во многом на данный момент можно смело назвать устаревшими. Применение новейших разработок в области изысканий и получения полевой информации позволяют многократно увеличить точность и оправдываемость дальнейших расчетов. Одной из стремительно развивающихся технологий можно назвать аэровидеосъемку с беспилотного летательного аппарата с последующей обработкой. С помощью данной технологии можно проводить исследования для выполнения большинства гидрологических изысканий.

Упрощая все данные технологии и адаптируя к методикам отечественной гидрологии в данной ВКР предложена, современная методика выполнения изысканий по наблюдению деформацией береговой линии.

Актуальность данной работы обусловлена стремительным прогрессом в области использования беспилотных летательных аппаратов (далее БПЛА) в качестве приборов наблюдения. Так, например использование БПЛА в гидрологии позволит наиболее точно отслеживать изменчивость берегов и возможности дальнейшего меандрирования.

Гипотеза: предполагается, что использование БПЛА позволит сократить ресурсные и временные затраты на проведение изыскательских работ, увеличить точность получаемой изыскательной информации.

В данной работе была поставлена **цель:** представить современную методику выполнения изыскательских работ, направленных на изучение плановой деформации берегов с использованием современного оборудования. Основываясь на уже существующих технологиях. Выделить положительные и отрицательные стороны ее использования.

Чтобы достичь цель были определены следующие **задачи:**

- Выделение необходимости проведения данных изысканий и общий принцип анализа данных.

- Анализ существующих методов наблюдения за изменениями планового положения береговой линии.
- Представление современного способа проведения изыскательных работ
- Выделение положительных и отрицательных сторон каждой из представленных методик.

В качестве **объектов** исследования выступают: береговая линия, аэрофотосъемки берега

Предметом исследования является технология проведения дистанционного наблюдения.

Данная, выпускная квалификационная работа (ВКР) состоит из 4 глав, введения, заключения.

В первой главе ВКР представлено обоснование необходимости проведения наблюдений за деформацией береговой линии.

Во второй главе ВКР представлены существующие методики, имеющие легитимное обоснование.

В третьей главе ВКР представлена предлагаемая методика, подразумевающая использование БПЛА для проведения изысканий.

В четвертой главе ВКР представлено сравнение существующих методик наблюдения с предлагаемой.

В заключении ВКР сделаны окончательные выводы относительно предлагаемой методики.

Бакалаврская работа содержит 11 рисунков, 3 таблицы, 4 приложения и список использованных источников из 9 наименований. Общий объем работы 54 страницы.

1. НЕОБХОДИМОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЕЙ БЕРЕГОВ. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОВЕДЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ.

1.1 Необходимость проведения наблюдений.

Береговая линия – динамическая граница водного объекта, по которой пересекаются водная поверхность и поверхность суши. Зачастую береговую линию относят к месту соприкосновения водной поверхности при среднем многолетнем уровне воды. [1]

Береговая линия каждого водного объекта суши имеет высокое значение для проведения любых видов деятельности, связанной с водными объектами.

Одной из наиболее важных причин необходимости проведения наблюдений за деформацией берегов является инженерная защита и предотвращение катастроф. При проведении любого строительства вблизи водного объекта, согласно установленным правилам, должна проводиться оценка происходящего на пойменной части водоема, будь это размыв или намыв наносов. [2]

В случае непроведения данных изысканий может случиться катастрофическая ситуация, похожую можно наблюдать во многих отдаленных от городов деревнях. Исторически сложилось, что население любых городов и деревень всегда стремилось расположиться вблизи рек и озер, в целях быстрого доступа к водным ресурсам. Одновременно с этим большинство населения начинали строительства бань на берегах данных водоемов. Исключая из рассмотрения сооружения, установленные с нарушениями законов, наиболее часто наблюдается ситуация, как баня, ранее стоявшая на достаточном удалении от берега, на данный момент находится в постоянном размыве. Размыв исключительно негативно влияет на сооружения. Данную проблему можно так же увидеть и при строительстве более сложных строений.



Рисунок 1.1 Бани в д. Кереть на берегу р. Кереть

Немаловажную часть в необходимости проведения изыскательских работ, направленных на изучение деформации берегов, являются и политические причины. Большая часть границ как регионов, так и целых государств проходит по водным объектам. В случае намыва или размыва берегов середина водного объекта будет смещаться в одну из противоположных сторон. Решение вопросов о переносе границ очень сложное и высокзатратное мероприятие, для избежания которого необходимо проводить наблюдения и принимать меры на ранних стадиях развития.

Третьим примером выступит внутригосударственное судоходство по речным направлениям. При размывии берегов образующиеся наносы могут откладываться в русле реки, тем самым создавая перекаты, косы, или поднимать уровень фарватера. Данные ситуации также влекут за собой экономические затраты, которые можно урегулировать до наступления тяжелых последствий.

Существует также масса других причин проведения изыскательских работ по наблюдению за плановыми деформациями, которые при несоблюдении всех норм и правил могут в дальнейшем привести как к

большим экономическим и ресурсным затратам, так и к человеческим жертвам.

1.2. Общие принципы проведения наблюдений.

Наблюдение за деформацией берегов при использовании любого метода заключается в повторном (периодическом) определении пространственных координат одних и тех же реперов или природных маркеров на деформируемом берегу относительно стабильной опорной сети, вынесенной за пределы зоны деформаций, и последующем вычислении векторов смещения как разности координат между циклами измерений

В проведении таких изысканий можно выделить два фундаментальных принципа, благодаря которым возможно выполнить данные изыскания. [3]

1. Принцип внешней системы отсчёта – Все измерения деформации выполняются относительно стабильных опорных знаков (реперов), заложенных вне зоны деформации (на коренных породах, за бровкой устойчивого берега). Без такой системы любые измерения теряют достоверность.
2. Принцип идентичности (монотонности методики) – для сопоставления всех изысканий каждое из которых должно выполняться: тем же методом, по одним стандартам, при схожих условиях.

Единоразовая съёмка не позволит в полной мере оценить скорость деформации берега, такую информацию позволит получить лишь постоянное повторение наблюдений.

В случае если наблюдение выполняется с помощью геодезических методов, то каждый последующий маршрут должен полностью повторять прошлый, благодаря этому и возникает возможность проводить сравнение результатов. Если используются спутниковые методы, то сравнение происходит по всему объёму данных полученных.

Принцип наблюдения заключается в математическом приращении координат одной и той же точки во времени, вычислений вектора смещения за определенный временной промежуток.

Вычисление длины векторов смещения:

$$\vec{X} = Xt_1 - Xt_2, \vec{Y} = Yt_1 - Yt_2, \vec{H} = Ht_1 - Ht_2, \quad [1]$$

где

$\Delta X, \Delta Y, \Delta H$ – длина вектора смещения

Xt_i, Yt_i, Ht_i – Координата точки в момент времени

Вычисление полного горизонтального смещения:

$$\Delta S = \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2}, \quad [2]$$

где

ΔS – длина вектора смещения

$\Delta X, \Delta Y$ – длина вектора смещения

Упрощая и адаптируя данный способ расчета длины вектора смещения к методикам наблюдения, представленным в данной работе, можно внести некоторые изменения. При выполнении работ с изучением не только определенных точек, имеющих жестко зафиксированное положение на местности, а береговой линии в целом, как единого объекта.

$$\vec{S}_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{смещ}}}{L_{\text{бер.лин}}}, \quad [3]$$

где

$\vec{S}_{\text{ср}}$ – средняя длина вектора смещения

$F_{\text{смещ}}$ – площадь, заключенная между линиями за t_1 и t_2

$L_{\text{бер.лин}}$ – длина исследуемой части берега, по прямому пути.

2. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДЕФОРМАЦИЕЙ БЕРЕГОВ.

2.1 Геодезические методы наблюдения.

Геодезические методы наблюдения являются эталонными способами наблюдения за деформациями берегов. Они предоставляют наиболее точным измерения. Основными инструментами для осуществления наблюдения благодаря данным методам являются: нивелир, тахеометр, GNSS-приемник, наиболее реже встречается теодолит. В зависимости от выбранного инструмента различается дальнейшая методика выполнения наблюдений.

2.1.1 Высотная съемка береговой линии.

Данный метод позволяет зафиксировать высотные изменения смещения береговой линии, которые в дальнейшем дополняются плановым смещением. Использование данной методики, как единичного способа наблюдения, то есть без дополнительных изыскания, не позволяет в полной мере оценить происходящую ситуацию.

Изыскания должны проводится согласно «Инструкции по нивелированию I, II, III, и IV классов» ГКИНП (ГНТА)-03-010-02 принятой Федеральной службы геодезии и картографии, разработанной Центральным научно-исследовательским институтом геодезии, аэросъемки и картографии в Москве в 2003 году. [4]

Согласно данной инструкции, а именно «Таблице 1» на странице 3, допустимая невязка при нивелировании IV класса рассчитывается по формуле:

$$20\text{мм} \times \sqrt{L} , \quad [4]$$

где

L – периметр полигона или длина линии, км.

При нивелировании допускается выполнение как способом «из середины», так и «вперед».

Для прокладывания нивелирного хода способом из середины необходимо: 2 нивелирные рейки любого образца, прибор нивелир. Рейки и прибор должны быть одобрены Росреестром и допущены к выполнению данных мероприятий. Прибор должен быть зарегистрирован и проходить все проверки. При выполнении способом нивелирования из середины прибор устанавливается на равноудаленном расстоянии от точек измерения превышения. После установки необходимо провести горизонтирование инструмента. На заднюю точку и переднюю устанавливаются рейки, в случае нивелирования IV класса допускается удержание рейки на руках, без использования штатива, Перпендикулярное положение рейки, по отношению к поверхности земли, проверяется через уровень, установленный на рейке в жестком соединении. Если при выполнении нивелирного хода используются точки, которые не имеют жесткого основания, то используется геодезический «башмак».

После окончания проведения всех подготовительных работ приступают к снятию отсчетов с рейки, первый отсчет снимается с «задней» рейки, после чего с «передней» рейки. После выполнения первых измерений «передняя» рейка сохраняет свое положение, прибор перемещается на следующую точку стояния, «задняя» перемещается вперед и становится «передней» рейкой. Данные операции повторяются до окончания нивелирного хода.

Для прокладывания нивелирного хода способом «вперед» необходимо: минимум 1 рейка, прибор, рулетка или измерительная лента. Все приборы аналогично способу «из середины» должны быть одобрены Росреестром и проходить все возможные проверки. Первой точкой стояния, в данном способе, выступает репер. Прибор устанавливается над репером, измеряется высота от точки отсчета высоты репера до уровня визирования при правильно настроенном приборе. Рейка, аналогично способу «из середины» допускается

к удержанию на месте измерения на руках, при соблюдении перпендикулярного положения по отношению к земле.

По окончании проведения всех подготовительных работ приступают к съемке превышений. После съемки прибор переносится на место стояния рейки, измеряется высота от точки с известным превышением до уровня визирной плоскости.

При выполнении нивелирования любым из способов важно учитывать:

- Первой точкой измерения должен служить опорный пункт любого класса Государственной нивелирной сети. Замыкающий пункт должен быть назначен в зависимости от вида выполнения нивелирного хода: замкнутый или разомкнутый. При замкнутом нивелирном ходе замыкающей точкой вычисления превышения выступает тот же пункт, с которого был начат данный нивелирный ход. При выполнении разомкнутого нивелирного хода первой и конечной точками съемки выступают разные опорные пункты ГГС.
- Все выполняемые измерения должны вноситься в журналы нивелировок исключительно тушью (ручками на чернильной основе)

Ниже на рисунке 2 представлен образец заполнения журнала нивелирования.

**ОБРАЗЕЦ ЗАПИСИ НИВЕЛИРОВАНИЯ IV КЛАССА
С РЕЙКАМИ, ИМЕЮЩИМИ САНТИМЕТРОВЫЕ ДЕЛЕНИЯ
НА ЧЕРНОЙ И КРАСНОЙ СТОРОНАХ**

Дата: 10.07.99

Ход: от грунт, реп. 606 до стен. марки 23

Начало: 7ч 10 мин, конец 7ч 45 мин

Погода: ясно, слабый ветер

Номера штатива и реек	Дальномерные рас- стояния до задней и передней реек	Отсчеты по рейке		Превышение, мм	Среднее превышение, мм
		задняя	передняя		
1	375 (7)	1185 (1)	1058 (3)		
Грунт, реп. 606 2-1		1560 (2)	1430 (4)	+130 (11)	+130 (13)
	372 (8)	6247 (6)	6217 5()	+30 (12)	
		4687 (9)	4784 (10)	+100 (14)	
2	460	805	1008		
1-2		1265	1472	-207	-207
	464	6052	6159	-107	
		4787	4687	-100	
3	324	596	777		
2-1		920	1103	-183	-183
	326	5607	5890	-283	
		4687	4787	+100	
4	275	719	1019		
1-2		994	1293	-299	-300
	274	5781	5982	-201	
		4787	4689	-98	
5	352	910	1043		
2-1		1262	1395	-133	133
	352	5949	6182	-233	
		4687	4787	+100	
6	402	860	729		
1-2		1262	1128	+134	+135
	399	6049	5813	+236	
		4787	4685	-102	
Контрольные вычисления	4375 (21)	42948 (15)	44064 (16)	-1116 (17)	-558 (18)
		-44064 (16)		-558 (20)	
		-1116 (19)			

Рисунок 2.1 Образец заполнения журнала нивелирования

2.1.2 Выполнение тахеометрической съемки участка береговой линии

Тахеометрическая съемка является одним из основных методов получения топографической информации о береговой линии, особенно актуальным для гидрологических задач, где требуется высокая детальность и оперативность. Данный вид съемки позволяет фиксировать, как и плановые смещения так и высотные.

Изыскания данным методом должны проводиться согласно, тем регламентирующим документам, по которым основывается техническое задание. Для гидрологических задач, при выполнении тахеометрической съемки, изыскатель должен ссылаться и выполнять поставленные задачи согласно СП 47.13330.2012 "Инженерные изыскания для строительства. Основные положения" [5].

Для выполнения данным способом требуется наличие данных инструментов:

1. Тахеометр. (Теодолит)
2. Рейка-отражатель. (Вешка-рейка)
3. Рулетка.
4. Отвес.

Первостепенно перед выполнением данных изыскательных работ выполняется подготовительный этап. В него входят:

1. Рекогносцировка района исследования: в данном этапе проводится визуальное и картографическое исследование района. Проводиться наблюдение за погодой по открытым источникам, для определения наиболее благоприятного времени выполнения работ.
2. Выполнение поверки приборов и калибровки при необходимости: во время поверки прибора должна быть проведена проверка состояния линий сетки нитей, проверка положения прибора, проверка компенсатора наклона.
3. Во время подготовительного этапа также необходимо обозначить опорные пункты, которые будут использоваться для создания базовой стороны.

После проведения рекогносцировочного этапа изыскатели могут приступить к выполнению основной части выполнения работы. Первостепенно прибор устанавливается на одну из опорных точек. С помощью отвеса и уровней выполняется точное позиционирование прибора ровно над репером в горизонтальном положении. При использовании современного оборудования, вместо отвеса может использоваться лазерный указатель точки отсчета.

После установки прибора выполняется заполнение журнала тахеометрической съемки вводной информацией. Журнал может быть

представлен в виде как физического бумажного носителя, так и электронного, заполняемость которого выполняется автоматически при выполнении съемки. Данная функция присутствует на современных приборах. В журнал вносятся такая информация как:

1. Состояние погоды.
2. Время начала работы.
3. Список бригады и бригадир.
4. Прибор, его название и серийный номер.

По окончании всех вышеперечисленных действий, бригада приступает к съемке. Вешка или рейка-отражатель устанавливается на второй опорный пункт, для создания базовой прямой, относительно данной прямой будут в дальнейшем вестись все измерения. Сняв измерения с опорного пункта, человек с вешкой или рейкой-отражателем начинает устанавливаться постепенно на всех точках, которые необходимо отразить на тахеометрической съемке. В этот перечень, необходимых объектов входят такие точки как:

1. Границы участков лесов, полей или иных площадных объектов.
2. Пешие пути перемещения.
3. Объекты, отображение которых требуется техническим заданием.
4. Одиночно стоящие объекты.
5. Здания, капитальные строения
6. Временные строения

И другие объекты, которые помогут в полной мере создать план местности и отразить все значимые участки.

Во время выполнения съемки бригадой выполняются такие измерения как:

1. Отсчет по нитяному дальномеру.
2. Отсчет по горизонтальному кругу.
3. Отсчет по вертикальному кругу.

Все выполненные измерения вносятся в журнал тахеометрической съемки. Пример заполнения журнала представлен на рисунке 3.

Журнал тахеометрической съёмки											
Описание реечных точек	№ на- блю- даемой точки	Высота наведе- ния u	Отсчёты			Место нуля МО	Угол наклона v	Горизон- тальное проложе- ние d , м	h'	Превы- шение h , м	Отметка H , м
			по нижнему дальноме- ру D' , м	по гори- зонталь- ному кругу	по верти- кальному кругу						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Станция ПЗ 21 $i=1,43$ $H=$ Съёмка реечных точек при круге лево											
	ПЗ 22			0°01'	КЛ=0°03'						
					КП=179°59'						
Лощина	1	1,43	88	12°02'	358°16'	0°01'	-1°45'	87,9	-2,69	-2,69	
Урез реки	2	2,00	111	78°11'	358°24'	0°01'	-1°37'	110,9	-3,13	-3,13	
Урез реки	3	1,43	155	136°24'		0°01'					
Урез реки	4	2,50	132	144°55'		0°01'					
Край леса	5	1,43	141	195°27'		0°01'					
Станция I $i=1,49$ $H=$											
	ПЗ 21			0°00'	КЛ=358°30'						
					КП=181°30'						
Край леса	6	1,49	94	125°25'							
Край леса	7	1,49	131	181°21'							
Тропа	8	1,49	128	231°15'							
Склон	9	1,49	124	337°36'							
Станция II $i=1,45$ $H=$											
	Ст. I			0°00'	КЛ=1°45'						
					КП=178°15'						
Тропа	10	1,45	87	104°16'	359°28'	0°00'	-0°32'	87			
Склон	11	1,45	132	253°09'	359°34'	0°00'	-0°26'	132			
Лощина	12	1,45	127	277°48'	359°06'	0°00'	-0°54'	127			
Лощина	13	1,45	53	279°40'	359°28'	0°00'	-0°32'	53			

Рисунок 2.2 Пример заполнения журнала тахеометрической съёмки.

2.1.3. Примеры выполненных работ с использованием геодезических методов

Для наглядного представления двух выше представленных методик произведено объединение данных. Плановое смещение будет фиксировать благодаря выполненным ранее тахеометрическим съёмка. Высотное смещение, в свою очередь, будет фиксировать благодаря выполненным нивелирным ходам.

В качестве примера выполненной работы по наблюдению за деформацией берегов геодезическим методом с использованием нивелира, как основного прибора, рассмотрено нивелирование основного морфостроения на р. Оредеж по основному гидростволу гидрологического поста №4 в д. Даймище на территории учебной базы практики РГГМУ. В данном примере рассмотрено полное изучение деформации берегов.

Водомерный пост расположен на правом берегу реки Оредеж. Самый первый створ по течению реки. Долина U-образная, форма долины- S-образная. Правый склон долины пологий, а левый крутой. Оползни отсутствуют. На участке имеется высокая пойма, надпойменная терраса расположена на правом берегу. Пойменный рельеф аккумулятивный, есть надпойменная старица.

В русле реки имеются острова, рукав с правой стороны по течению, форма русла слабоизвилистая. Русло прижато к левому берегу. Средняя глубина 1,5 м, визуальна скорость течения примерно 0,3 м/с. Русло полностью зарастает, течение спокойное, есть места с поваленными деревьями. Грунт на дне илистый.

Антропогенным воздействием является Чикинская плотина, расположенная в 3 км от базы практик. ЛЭП отсутствуют, дорога проходит в 200 м на левом берегу реки. Привязка производилась к 12 реперу. Рекреационные зоны по известной информации на 2024 г. отсутствуют. В 2025 году информации о возникновении рекреационных зон не появилось.

Наблюдения проводились с повторением прохождения точек как в нивелирном ходу, так и в тахеометрической съемке, что позволяет сравнивать полученные результаты.

Ниже представлены результаты нивелирования морфоствора на 17.06.2024 г. и 19.06.2023.

Таблица 2.1 Выборка из расчетной таблицы нивелирования основного морфоствора на ГП №4 р. Оредеж – д. Даймище на 15.06.2024.

№ точки	Расстояние	Отметка, Мбс	Примечание
7	107.5	91.498	
8	121.5	91.461	Пойма
9	126.3	90.941	
10	129.8	90.534	

№ точки	Расстояние	Отметка, Мбс	Примечание
11	133.5	90.245	
12	139.3	90.245	
13	145.5	91.451	
14	146.7	91.451	Столб
15	147.6	91.438	Урез
16	148.7	91.218	Промерный профиль р. Оредеж створ №1
17	149.7	91.008	
18	150.7	90.778	
19	151.7	90.648	
20	152.7	90.488	
21	153.7	90.348	Промерный профиль р. Оредеж створ №1
22	154.7	89.938	
23	155.7	89.948	
24	156.7	89.918	
25	157.7	89.808	
26	158.7	89.758	
27	159.7	89.748	
28	160.7	89.778	
29	161.7	89.818	
30	162.7	89.968	
31	163.7	89.908	
32	164.7	89.818	
33	165.7	89.948	
34	166.7	90.228	
35	167.7	90.908	
36	168.7	91.226	
37	168.8	91.438	Урез



Рисунок 2.3. Профиль морфоствора по основному гидроствору ГП №4 р.
Оредеж – д. Даймище на 19.06.2023.

Таблица 2.2. Выборка из расчетной таблицы нивелирования основного морфоствор на ГП №4 р. Оредеж – д. Даймище на 17.06.2024.

№ точки	Расстояние	Отметка, Мбс	Примечание
8	121.5	91.461	Пойма
9	126.3	90.941	
10	129.8	90.534	
11	133.5	90.245	
12	139.3	90.245	
13	145.5	91.439	
14	146.7	91.512	Столб
15	147.7	91.456	Урез
16	148.7	91.166	Промерный профиль р. Оредеж створ №1
17	149.7	91.036	
18	150.7	91.166	
19	151.7	90.676	
20	152.7	90.556	
21	153.7	90.056	
22	154.7	89.936	
23	155.7	89.916	
24	156.7	89.906	
25	157.7	89.856	
26	158.7	89.856	
27	159.7	89.876	
28	160.7	89.846	
29	161.7	89.786	
30	162.7	90.006	
31	163.7	89.946	
32	164.7	89.996	
33	165.7	90.116	
34	166.7	90.356	
35	167.7	90.996	
36	168.7	91.226	
37	168.8	91.456	Урез



Рисунок 2.4 Профиль морфоствора по основному гидроствору ГП №4 р. Оредеж – д. Даймище на 17.06.2024

При сравнении результатов двух нивелирных ходов, проложенных по морфоствору ГП №1, можно сделать вывод, что высотное смещение одинаковых точек принимает значение 0.06 м (6 см).

Для рассмотрения варианта выполнения данной работы путем исполнения тахеометрической съемки участка реки для проведения наблюдений за деформацией берегов, ниже представлен пример, где показана съемка участка местности на р. Оредеж на гидропосте №4 расположенного в д. Даймище на 21.06.2023 г. и на 19.06.2024 г.



Рисунок 2.5 План участка р. Оредеж – ГП №4 д. Даймище на 21.06.2023

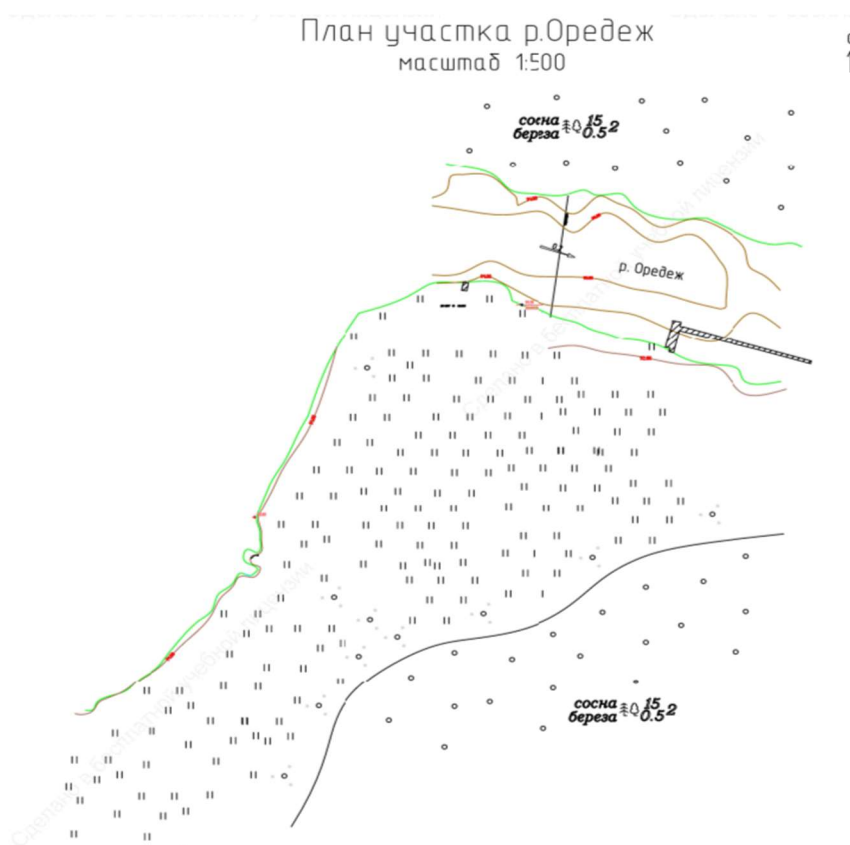


Рисунок 2.6 План участка р. Оредеж – ГП №4 д. Даймище на 19.06.2024 г.

Для оценки смещения береговой линии результаты тахеометр динамическая граница водного объекта, по которой пересекаются водная поверхность и поверхность суши. Зачастую береговую линию относят к месту соприкосновения водной поверхности при среднем многолетнем уровне воды. Съёмки накладываются друг на друга с закреплением координат.

Таким образом при наложении планов я получил значение площади подверженной деформации. Значение площади составило $1,3 \text{ м}^2$

Длина береговой линии исследуемой части была получена путем нахождения средней длины по каждому плану и составила 21,13

Используя формулу №3, представленную в главе 1.2, было получено значение средней деформации береговой линии, оно составило 0,06 м (6 см)

2.2. Спутниковые методы наблюдения

2.2.1 Описание методики спутниковых наблюдений

Спутниковый мониторинг стал незаменимым инструментом для наблюдения за плановыми деформациями берегов. Он позволяет охватывать огромные территории с высокой периодичностью, что особенно ценно для труднодоступных районов, где традиционные геодезические измерения затруднены или экономически невыгодны.

Важно учитывать, что наблюдение данным способом являются экономически затратными, в случае необходимости получения данных с точностью до 5 см. В следствие чего, данный способ применяется в качестве способа проведения между срочного мониторинга ситуации.

Существует большое количество способов получения спутниковой информации. Различие каждого метода заключается в точности измерения и периодичности. Данные параметры зависят от используемого спутника.

Обработка спутниковых данных зависит от типа спутниковой информации, получаемой для выполнения расчетов. Информация может быть представлена в нескольких вариантах:

1. Спутниковый оптический снимок.
2. Радиолокационная съемка.

Спутниковые оптические снимки представляют собой космический снимок земли. Разрешение данных снимков может варьироваться от 5 до 100 м. Такой большой диапазон из-за удаления спутника, качества оборудования, установленного на него. В таких снимках зачастую применяется технология использования ближнего инфракрасного диапазона (NIR). Лучи такого диапазона сильно поглощаются водой, а участки суши обладают хорошей отражаемостью, что в конечном итоге позволяет создать достаточно видимую границу.

Радиолокационная съемка представляет собой метод интерферометрии синтезированного апертурного радара. Спутник посылает большое количество сигналов на поверхность земли, которые в дальнейшем отражаясь от поверхности возвращаются на спутник. После получения обратного сигнала проводится вычисление разниц фаз сигналов, что позволяет рассчитать положение объекта. При следующих пролетах над данной местностью проводится сравнение данных по каждой точке. Результатом данных спутниковых съемок служат карты смещения земной поверхности.

На рисунке 8 представлен спутниковый оптический снимок территории р. Амур с нанесенными обозначениями гидропостов с показателями уровня воды на них. Снимок обрабатывался Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

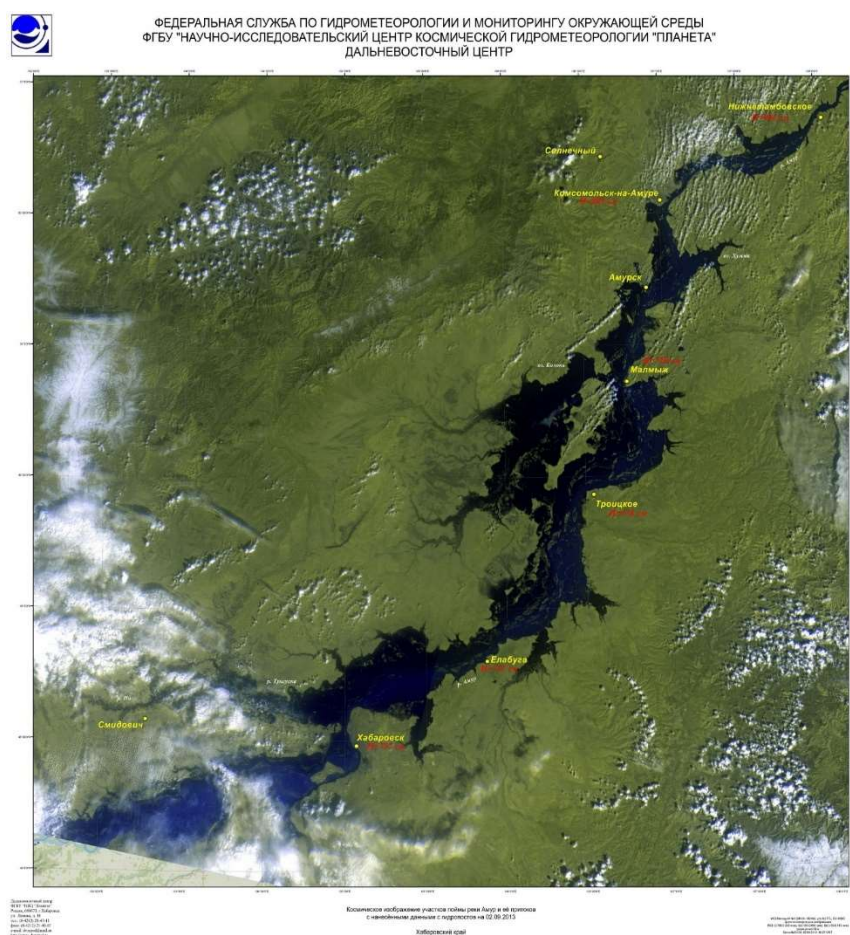


Рисунок 2.7 Спутниковый оптический снимок состояния поймы р. Амур и ее притоков с нанесением гидропостов.

Важно учитывать, что для выполнения любых работ связанных со спутниковыми снимками необходимо иметь подтвержденные координаты так называемых «контрольных» точек. Это точки, согласно которым, спутниковый снимок будет совмещаться с реальной цифровой моделью земли. Несмотря на то, что современные снимки уже имеют собственную привязку к существующим системам координат.

2.2.2 Обработка спутниковых данных

Обработка спутниковой информации зависит от типа используемой информации. При использовании оптических снимков поверхности Земли применяются ГИС системы, наиболее распространенными в данной сфере являются программы «ArcGIS», «QGIS». В данных программах существуют уже встроенные модули.

Первым этапом в проведение данных изысканий служит подготовка спутниковых данных к работе. В данный этап входят такие процессы как:

1. «Геопривязка» информации со спутниковых снимков и самих спутниковых снимков к реальным координатам.

При выгрузке данных в ГИС-системы необходимо выполнить совмещение «контрольных» точек. Данная привязка позволяет удостовериться в точности уже содержащихся координат в спутниковом снимке. В качестве «контрольных» точек могут использоваться крупные объекты, координаты которых заранее известны. Так же если качество снимков позволяет, то пользователь вправе выполнять «геопривязку» по опорным пунктам государственной геодезической сети. [6]

2. Заполнение пропущенных областей.

Для оптимизации работы спутники выполняют съемку участков согласно определенной дискретности, что при обработке может вызвать некие трудности. Для таких ситуаций в ГИС-программах предусмотрены

специальные пакеты инструментов (в программе «ArcMap» примером служит «Landsat ToolBox»). Данные инструменты позволяют скрыть данные пропуски в рабочем материале.[6]

3. Обрезка лишней информации.

Обрезка лишней информации позволяет ускорить выполнение работы путем снижения затрачиваемых мощностей компьютера на обработку не нужных объектов на карте.[6]

Вторым этапом в обработке спутниковых снимков выполняет выделение береговых линий на снимках. Данный этап может выполняться как в автоматическом, так и ручном исполнении. При автоматическом выделении используются программные функции ГИС- платформ. В программах существует несколько вариантов выполнения данных операций:

1. Выделение по индексу цвета

Изображение, которое представлено в растровом формате, состоит из пикселей, где каждому пикселю назначены свои значения определенного цвета. Благодаря этому свойству программа способна отделять поверхность воды от поверхности суши. Данный метод доступен к выполнению лишь с определенными индексами цветовой палитры, такими как NDVI, MNDVI.

2. Метод группировки пикселей по кластерам.

Алгоритмы, встроенные в программное обеспечение, группируют пиксели так же по цветовому признаку используя индексы обозначения цвета. Каждый кластер в дальнейшем распределяется в группы: «вода» / «суша». Данный метод применим, если вода имеет высокое значение мутности или неоднородна в цвете из-за различных типов подстилающей поверхности.

3. Метод классификации.

Данный метод основан на обработке информации с помощью искусственного интеллекта. Пользователь обозначает образцовое место на снимке, а программа подбирает все участки аналогичные этому.

Каждая из данных методик формирует растровое изображение с разведением на два объекта. В дальнейшем для получения цифровой информации пользователю необходимо выполнить перевод изображения в полигональные объекты. Данный перевод позволяет в дальнейшем производить любые операции с полученными объектами.

2.2.3 Пример выполненной работы по наблюдению за деформацией берегов с использованием спутниковых методов.

В качестве примера выполненной работы по наблюдению за плановой деформацией в данной главе рассмотрено наблюдение за береговой линией реки Шуя на участке впадения реки в озеро Логмозеро. Цель выполнения работы на данном участке реки заключается в определении макро-деформаций. Определение микро-деформаций не представляется возможным в следствие малого разрешения космических снимков. Получение снимков более высокого разрешения не представляется возможным по причине экономической невыгодности.

Для выполнения данных наблюдений использовались спутниковые оптические снимки, выполненные спутником Sentinel-2. Снимки получены из открытого источника EOSDA. Снимки представляли собой файлы формата .jpeg без содержания метаданных с разрешением 5-10 м/ пиксель. Изображения полностью покрывали исследуемую территории, необходимость в заполнении пропущенных областей отсутствовала. [7]

Снимки ситуации, использовавшиеся в наблюдениях, выполнены 19.05.2025 г. и 21.04.2026 г.

Платформой для выполнения наблюдений служила ГИС-система «ArcGIS».

Геопривязка изображений производилась ручным способом.

Определение береговых линий выполнялось методом выделения по индексу цвета пикселя.

Готовые карты с отображаемыми берегами реки представлены в Приложении № 1 и №2.

При анализе выполненных наблюдений можно сделать вывод, что река Шуя на участке впадения в озеро Логмозеро в современных условиях, не подвержена стремительному изменению планового положения береговых линий.

Выполненные наблюдения выступают в качестве планового мониторинга ситуации. Количественная оценка смещений не представляется возможным в следствие низкого разрешения космических снимков.

3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЕЙ БЕРЕГОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПЛА.

3.1 Технические характеристики и возможности БПЛА.

Беспилотный летательный аппарат (БПЛА), часто называемый дроном, — это летательный аппарат, который управляется дистанционно или выполняет полет по заранее заданной программе без пилота на борту.

Современные БПЛА — это не просто игрушки, а высокотехнологичные инструменты, способные решать широкий спектр задач в гражданской, военной и научной сферах. Их главное преимущество — возможность выполнять работу там, где это опасно, сложно или экономически невыгодно для инженерного состава. На рисунке 9 представлен общий вид беспилотного летательного аппарата.



Рисунок 3.1 Общий вид беспилотного летательного аппарата.

Возможности дрона определяются его конструкцией (самолетного или вертолетного типа) и оснащением (камеры, сенсоры, навигация). Основные характеристики, которые важны для практического применения:

1. Автономность и управление: Аппараты могут управляться оператором с пульта или действовать полностью автономно, следуя по GPS-маршруту. Современные модели способны адаптироваться к местности, на которой выполняют свои задачи, тем самым избегать помех, которые могут не попасть в поле зрения оператора.
2. Высота и дальность: Диапазон огромен. Микро-дроны летают на высоте до 1 км, в то время как тяжелые аппараты способны подниматься на 20 км. Дальность полета варьируется от нескольких километров до сотен километров.
3. Грузоподъемность: это может быть как легкая компактная камера, так и полезная нагрузка в сотни килограммов. Например, российский грузовой дрон С-76 способен перевозить до 300 кг груза на расстояние до 1000 км.

Современные дроны приобретают популярность во многих структурах и областях деятельности человека. Они выполняют различные функции: перевозка, наблюдения, измерения, отслеживание.

В отечественной гидрологии применение БПЛА на данный момент находится на начальном этапе и развитие данного направления является важной частью всей науки. Прогресс в данном направлении может позволить сократить экономические расходы и ресурсные затраты, ускорить процесс выполнения практически любых изыскательных мероприятий.

В данной выпускной-квалификационной работе будет рассмотрен метод наблюдения за плановыми деформациями берегов с использованием съемки с БПЛА.

3.2 Методика наблюдения за деформациями берегов с использованием БПЛА

3.2.1 Съёмка области исследования с БПЛА.

Первоначально изыскателям необходимо провести подготовительные работы для выполнения изысканий. Этот этап является фундаментом для получения качественных и точных результатов, соответствующих поставленным задачам. Он включает в себя сбор требований, анализ исходных данных и проектирование полетного задания.

Сначала производится изучение имеющихся материалов и формирование требований к конечному продукту. На основе типа и масштаба создаваемой карты или плана, а также границ объекта съемки, определяются технические требования к материалам аэрофотосъемки. Ключевыми параметрами здесь являются разрешение на местности, координаты контура участка, продольное и поперечное перекрытие снимков, а также требования к точности определения координат центров фотографирования. На этом же этапе принимается решение о необходимости создания наземной опорной сети (планово-высотного обоснования). Если привязка ортофотоплана будет выполняться по опорным точкам, требования к точности определения координат центров фотографирования могут быть снижены.

Далее производится формирование полетного задания. Эта операция выполняется в специализированном программном обеспечении – планировщике полета, входящем в состав программного комплекса БПЛА. Оператор выбирает конфигурацию используемого комплекса (тип БПЛА, модель фотокамеры), задает на цифровой карте контур участка съемки и примерное положение стартовой площадки, после чего устанавливает требуемые параметры:

- Разрешение на местности: например, для создания топографических карт масштаба 1:2000 требуется разрешение 15 см/пикс.

- **Перекрытие снимков:** для обеспечения надежного фотограмметрического сшивания стандартными требованиями является продольное перекрытие не менее 75% и поперечное – не менее 60%. В случае монотонной местности (например, сельскохозяйственные поля) перекрытие рекомендуется увеличивать до 80% и более для надежного распознавания общих точек.

На основе введенных данных программа автоматически рассчитывает план полета (маршруты, высоту, скорость) и проверяет его техническую выполнимость с учетом характеристик БПЛА и погодных ограничений.

Программами для использования выступают такие программы как:

1. **Geoscan Planner:** Российское ПО от группы компаний «Геоскан». Предназначено для проектирования и контроля выполнения полетного задания для площадной и линейной аэрофотосъемки [8]
2. **InnoControl:** позволяет планировать маршруты, проходить предполетные проверки и управлять полезной нагрузкой, официально внесено в реестр отечественного ПО.

После проведения подготовительного этапа изыскатели приступают к проведению полевого этапа– данный этап охватывает работы, проводимые непосредственно на местности – от развертывания комплекса до посадки воздушного судна.

По прибытии на стартовую площадку оператор уточняет ее фактическое положение. В планировщик полета вводятся точка взлета и точка возвращения, а также, при наличии данных, параметры ветра (скорость и направление) на рабочей высоте. Программа выполняет автоматическое уточнение полетного задания и повторную проверку его выполнимости.

Старт БПЛА осуществляется с пускового устройства (например, с катапульты или «с руки»), после чего полет и собственно фотосъемка выполняются в полностью автоматическом режиме по заданной программе. Участие оператора в управлении аппаратом на этом этапе минимизировано.

Если используется комбинированный способ привязки, до начала или во время полета выполняется работа с наземной опорной сетью. Она включает координирование опорных точек с помощью высокоточных GNSS-приемников и их маркировку на местности. Для маркировки могут использоваться контрастные опознавательные знаки (ОПЗ), такими могут выступать заранее подготовленные «башмаки» с контрастной окраской.

Процесс съемки завершается автоматической посадкой БПЛА в заданной точке.

3.2.2 Обработка аэрофотосъемки местности.

При съемке местности важно учитывать каким способом БПЛА выполняет съемку территории. Возможна ситуация, при которой летательное судно выполняет покадровую съемку фотографий с определенной дискретностью во времени по мере продвижения по маршруту, либо съемка выполняется с использованием LIDAR-сканера. При первой ситуации исходными данными для обработки будут файлы формата: .jpeg, .tif, .png – это растровые изображения местности. Во втором варианте, при использовании LIDAR-сканера исходными данными будут выступать файлы типа «облако точек».

Не мало важную роль в фиксации точек выполняет возможность ЛА определять высотные отметки каждой точки. В случае если съемка выполняется лишь фото фиксирующими устройствами, то закрепление высотных отметок не представляется возможным в следствии технических особенностей камер и полетов.

Обработка исходных данных, представленных растровыми изображениями, выполняется в несколько этапов:

1. Создание единого изображения.
2. Обработка изображения.

Выполнение первого этапа представляет собой создание файла, который в себе объединяет все фотографии, созданные в момент выполнения аэрофотосъемки. Объединение данных фотографий выполняется в специализированных программах, примером такого программного обеспечения выступает AgiSoft MetaShape.

Agisoft Metashape— это программное обеспечение для фотограмметрической обработки, которое преобразует набор цифровых фотографий в трехмерные пространственные данные: облака точек, цифровые модели местности, ортофотопланы и трехмерные сетки. В основе работы программы лежит технология *Structure from Motion* (SfM) — построение трехмерной структуры по последовательности двумерных изображений. [9]

Данная технология самостоятельно определяет все ключевые точки на изображениях, основываясь на текстуре элемента, положению, размеров, углов, что позволяет ей на базе этих опорных точек выполнить единую привязку всех изображений с минимальным отклонением (до 0.1 мм).

С помощью данного ПО можно формировать как просто растровое изображение, так и изображение формата .tif, где каждый пиксель обладает также информацией о закрепленной ей координате. В гидрологических работах могут использоваться оба варианта.

После подготовки единого изображения местности обработчик приступает к выделению берегов. Их выделение происходит с использованием программно-аппаратных комплексов ГИС. На базе данных программ существует несколько способов выполнения данных задач, одним из таких является способ «Выделения по спектральным индексам». Он основан на свойстве фотографии нести в каждом пикселе определенное значение содержания каждого цвета в нем. Вода обладает уникальным свойством: она сильно поглощает инфракрасное излучение. Используя это, существует способность отделить реку от суши и растительности.

Обработка данных представленных в виде облака точек, полученных при съемке с использованием LIDAR-датчика, представляет собой массив данных точек с координатами X, Y, Z и значениями интенсивности отраженного сигнала. Для работы с таким типом данных подходят ГИС-системы, такие как ArcMap.

В случае, если съемка выполнена с использованием LIDAR технологии, то важно учитывать, что большинство датчиков работает в инфракрасном диапазоне, который в свою очередь почти полностью поглощается водой. Из-за этого свойства вода на съемке будет выглядеть единым полотном точек с одинаковыми координатами по высоте.

Первостепенно при обработке необходимо, аналогично как при работе с растровыми изображениями, создать единую цифровую модель рельефа, в которой выполнено исправление всех возникших шумов. Шумом в таких съемках выступают точки, положение которых сильно отличается от всех соседних. Каждой точке всего облака придаются значения поверхности, такие как «земля», «вода», «объект».

Пример первостепенной обработки пошагово:

1. Привязка и сшивка трасс. На данном шаге выполняется геопривязка каждой точки относительно указанной системы координат и сшивка всех точек с едиными координатами в единые объекты.
2. Фильтрация шумов. Удаление выбросов отдельных точек рельефа, не соответствующих реальному рельефу.
3. Нормализация. Приведение всех значений интенсивности отражения в корректный и действительный формат. Коррекция основывается на условиях освещенности.
4. Классификация точек. Задание классов точек с помощью алгоритмов ПО. Например, на классы «земля», «вода».

После первичной обработки обработанные данные преобразуются в пространственные форматы для анализа такие как:

1. ЦМР – цифровая модель рельефа, которая создается на основе заданной ранее классификации. Не учитывает растительность на земле.
2. ЦММ – цифровая модель местности, которая включает все точки облака. Учитывает растительности на земле.

После создания ЦМР с помощью инструментов ГИС происходит выделение береговой линии.

3.3. Пример выполненной работы по наблюдения за деформацией берегов согласно предлагаемой методики

В данном примере рассмотрены две ситуации, где съемки выполнялись лишь с использованием фото фиксирующего устройства, что влияет на возможность фиксировать высотное положение каждой исследуемой точки, исходя из этого определялось лишь плановое смещение.

Геопривязка изображений, полученного при выполнении сшивки фотоснимков, выполнялась по точкам, координаты которых были заранее зафиксированы.

Точками сшивки служили объекты, которые имели четкие зримые формы и очертания. Основной точкой сшивки, в первой рассмотренной ситуации, выступало бетонное кольцо с металлической крышкой, внутри которого установлен самописец, дополнительными точками сшивки служили мостки.

Во второй ситуации точками сшивки являлись мостки.

Геопривязка выполнялась по условиям, предусмотренным в ГИС-системе. Шаблоном сшивки была выбрана схема «Полином первого порядка», согласно которой необходимо минимум 3 опорные точки. [6]

Смещение определялось аналогичным методом с тахеометрической съемкой – вычисление суммарного вектора смещения. Результат представлен

в виде средней длинный вектора смещения по всей длине. Направление вектора определялось перпендикулярно к рассматриваемому участку.

Ниже на рисунках представлены карты ситуации с отчерченными береговыми линиями. В приложениях №3 и №4 представлены оформленные согласно стандартам схемы.

Ситуация №1.

Первой рассмотренной ситуацией выступает берег р. Ордеж вблизи ГП №4.

Береговые линии проведены на данной карте согласно данным по съемкам за 12.10.2014 и данным за 27.04.2015. Уровень воды на момент съемки согласно данным водомерного поста расположенного в д. Чикино составляет: 12.10.2014 – 164.11 мБС., 27.04.2015 – 180.11 мБС.

Подложкой на примере выступает съемка за 27.04.2015.

На этапе обработки полевых данных были задействованы аналитические возможности геоинформационной системы «ArcGIS». В среде данной ГИС, с использованием встроенного инструментария геометрических вычислений, проведен количественный анализ динамики смещения береговой линии за репрезентативный временной интервал. Интервал наблюдений составил 6.5 месяцев.

На рисунке 10 представлена вырезка карты с указаниями положения береговой линии. Желтым цветом выделено положение береговой линии на момент 12.10.2014, красным цветом выделено положению линии 27.04.2015.



Рисунок 33.2 Совмещенная карта положений
береговой линии р. Оредеж – ГП №4.

В результате выполненных вычислений установлено, что смещение береговой линии не является равномерным по всему ее протяжению. По причине рассмотрения береговой линии как единого объекта, расчет производился по формуле №3, представленной в главе 1.2.

Площадь, подверженная деформации составила 48,92 м². Длина береговой линии составила 155 м.

Выполняя расчет согласно формуле, получается значение среднего смещения береговой линии равное 0.31 м.

Максимальное смещение береговой линии по направлению течения составляет 0.7 м.

Анализируя ситуацию, можно сделать вывод, что на участке реки, обращённом к основному руслу реки в месте впадения старицы, происходит размыв берегов. На прямых участках реки деформации стремятся к минимуму. Необходимо учитывать, что наблюдения проводились при разном уровне воды.

Ситуация №2.

Второй рассмотренной ситуацией выступают наблюдения на р. Оредеж вблизи основного водомерного поста (ГП №1). Для составления карты положений береговой линии использовались съемки за 12.10.2014 и 27.04.2015. Уровень воды на момент съемки согласно данным водомерного поста расположенного в д. Чикино составляет: 12.10.2014 – 164.11 мБС., 27.04.2015 – 180.11 мБС.

По полученным данным была построена карта, представленная на рисунке 11. Желтым цветом выделено положение берега на 12.10.2014 г., красным цветом на 27.04.2015г. Подложкой выступает съемка за 27.04.2015.

Данный участок рассматривается в связи с наличием поворота на русле, что может вызывать размывание береговой линии, на которой установлены пешеходные мостки для доступа ко всем гидрологическим постам.



Рисунок 3.3 Совмещенная карта положений береговой линии р. Оредеж
– ГП№1.

В результате проведения вычислений были получены данные о плановом смещении береговой линии. Смещение аналогично ситуации вблизи ГП №4 проходит не равномерно. Плановое смещение определялось идентично ситуации №1.

Площадь, подверженная деформации составила 27.82 м. Длина береговой линии, рассматриваемой в данной ситуации, составила 213 м.

Подставляя полученные значения в исходное выражение, получается, что среднее смещение береговой линии 0.13 м. Максимальное смещение составило 0.21 м.

4. АНАЛИЗ РАССМОТРЕННЫХ МЕТОДИК НАБЛЮДЕНИЯ

Для объективной оценки эффективности предлагаемой методики наблюдения за деформацией берегов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) необходимо провести сравнительный анализ с классическими (геодезическими) и спутниковыми методами, описанными в главах 2 и 3. Критериями сравнения выступают: точность получаемых данных, оперативность, трудоемкость, экономическая эффективность, возможность работы в труднодоступных условиях и степень автоматизации обработки.

4.1. Геодезические методы

4.1.1 Положительные стороны применения геодезических методов наблюдения

1. Эталонная точность: обеспечивают наивысшую точность измерений (нивелирование IV класса дает погрешность не более $20 \text{ мм} \times \sqrt{L}$, тахеометрия — единицы миллиметров на плане), что подтверждено аккредитацией Росреестра и государственными стандартами.

2. Надежность: Результаты измерений имеют юридическую силу при строительстве и земельных спорах, так как выполняются с использованием поверенных приборов и по утвержденным инструкциям.

3. Независимость от погоды: Измерения можно выполнять под облачностью, в туман, при легком дожде (в отличие от БПЛА и оптической спутниковой съемки).

4.1.2 Отрицательные стороны применения геодезических методов наблюдения

1. Высокая трудоемкость: требуют присутствия бригады (2–3 человека) непосредственно на объекте. Прокладка нивелирного хода вдоль берега на 1–2 км может занимать полный световой день.

2. Низкая детальность: Количество измеряемых точек ограничено (пикеты, реперы), что не позволяет построить сплошную модель рельефа высокой детализации без значительного увеличения времени работ (пример в главе 2.1.3: съемка профиля, а не всей поймы).

3. Субъективность выбора точек: при повторных циклах сложно гарантировать идентичность положения рейки или вешки на естественной поверхности (из-за эрозии, зарастания), что вносит дополнительную погрешность.

4. Опасность для персонала: Работа на крутых, размываемых берегах, на акватории (промерные работы) сопряжена с риском для жизни.

4.2. Спутниковые методы (оптические снимки, радиолокационная съемка)

4.2.1 Положительные стороны использования спутниковых методов наблюдения.

1. Огромный охват территории: Один снимок (например, Landsat) покрывает сотни и тысячи квадратных километров. Идеально подходит для мониторинга магистральных рек (р. Амур, пример в главе 2.2.2) и береговой линии морей.

2. Архивность данных: существуют ретроспективные архивы снимков за 20–40 лет (Landsat, Sentinel), что позволяет анализировать многолетнюю динамику без полевых работ.

3. Регулярность: Спутники повторяют съемку одного района каждые 3–16 дней, что позволяет отслеживать сезонные и катастрофические изменения (паводки, обрушения).

4.2.2 Отрицательные стороны использования спутниковых методов наблюдения

1. Низкое разрешение: для бесплатных данных — 10–30 м/пиксель (Sentinel, Landsat), для коммерческих — до 0,5 м, но высокая стоимость. Смещение берега в 5 – 10 см не различимо на снимках с низким разрешением.

2. Зависимость от погоды и времени суток: Оптические снимки невозможны при облачности, а для высоких широт ограничены светлым временем суток. Радиолокационная съемка (SAR) лишена этого недостатка, но сложна в интерпретации и требует дорогого ПО.

4.3. Предлагаемая методика наблюдения за деформациями с использованием БПЛА

4.3.1 Положительные стороны использования предлагаемой методики.

1. Оптимальное сочетание точности и площади: Разрешение снимков с БПЛА достигает 1–5 см/пиксель (см. главу 3.2.1), что позволяет надежно фиксировать смещения от 2 см (как в примере из главы 3.3), одновременно покрывая участок протяженностью до нескольких километров за один вылет.

2. Высокая детальность и сплошное покрытие: формируется ортофотоплан и ЦМР/ЦММ по всей площади участка, а не по отдельным профилям или пикетам. Это исключает субъективизм выбора точек.

3. Оперативность и низкая трудоемкость: Подготовка полетного задания занимает 15–30 минут, сам вылет — 20–40 минут для участка 1–2 км берега. Полевая работа выполняется одним оператором.

4. Безопасность: Оператор находится на безопасном удалении от бровки берега и водной поверхности.

5. Гибкость: Возможность выполнять съемку в любое дневное время при отсутствии сильного ветра и дождя; использование LIDAR-режима позволяет получать данные даже в сумерках.

4.3.2 Отрицательные стороны использования предлагаемой методики.

1. Зависимость от метеоусловий для оптической съемки: Сильный ветер (более 10–12 м/с), ливень, густой туман делают полет невозможным или бракуют качество снимков.

2. Юридические ограничения: необходимо разрешение на использование воздушного пространства (при полетах выше 150 м или вблизи аэродромов), регистрация БПЛА в Росавиации. Для геодезических методов таких ограничений нет.

3. Вычислительная нагрузка: Обработка сотен снимков с высоким разрешением (особенно с LIDAR) требует мощного компьютера (например, для Agisoft Metashape — не менее 16 ГБ ОЗУ и современной видеокарты) и специального ПО, что увеличивает порог входа.

4. Методическая новизна: на данный момент отсутствует законодательно закреплённая методика использования БПЛА для

гидрологических наблюдений на территории РФ (нормы СП, ГОСТ). Результаты могут быть приняты как вспомогательные или исследовательские.

4.4 Выводы по сравнению методик.

В целях наглядного представления результатов сравнительного анализа и выявления преимуществ и недостатков каждой методики, основные технико-экономические и эксплуатационные характеристики были сведены в Таблицу 3. При этом в качестве ключевых критериев сравнения выбраны параметры, имеющие первостепенное значение для гидрометрической практики: точность планово-высотной привязки, детальность получаемых данных, скорость (оперативность) выполнения полевых работ, зависимость от погодных условий, уровень кадровых и вычислительных ресурсов, юридическая легитимность результатов, а также степень безопасности полевого персонала.

Таблица 4.1 Сводная сравнительная таблица по нескольким параметрам

Критерий	Методы		
	Геодезические методы	Спутниковые методы	Предлагаемая методика
Точность по горизонтали	до 0.1 см	от 0,5 м. (коммерч.) от 5 м. (беспл.)	1–5см
Точность по высоте	До 0,1 см	1–5м	2–10см
Детальность	Дискретные точки	Пиксель 0,5–30м	Сплошное покрытие, пиксель 1–5см
Охват за единицу времени	0,5–2км/день	Тысячи км ² за 1 снимок	1–3 км ² за 30–40мин
Трудоемкость полевых работ	Высокая	Низкая	Низкая
Зависимость от погоды	Низкая	Высокая	Средняя
Необходимость ПО и мощностей	Низкая	Высокая	Высокая
Юридическая легитимность	Высокая	Средняя	Низкая (Методика разрабатывается)
Риски для персонала	Высокие	Низкие	Низкие
Выявление минимальных смещения	Да	Нет	Да

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Геодезические методы остаются эталонными по точности для точечных наблюдений (реперы, профили) и обладают неоспоримым юридическим приоритетом. Однако они крайне трудоемки, низкодетальны и опасны для протяженных берегов с активной эрозией.

2. Спутниковые методы незаменимы для регионального и глобального мониторинга, ретроспективного анализа, но их разрешение (даже коммерческих снимков) недостаточно для точной фиксации возможных изменений

3. Предлагаемая методика на основе БПЛА занимает промежуточное, но наиболее сбалансированное положение. Она обеспечивает:

- допустимую точность изысканий;
- детальность и сплошное покрытие, недоступное традиционным методам;
- оперативность и безопасность полевых работ;
- возможность визуализации деформации в виде совмещенных ортофотопланов и ЦМР (как в примере главы 3.3).

Главным недостатком на текущий момент является отсутствие законодательно утвержденной методики для гидрологической отрасли РФ, что, однако, открывает перспективу для ее дальнейшей разработки и внедрения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы была достигнута поставленная цель — представлена готовая методика выполнения изыскательских работ по наблюдению за деформацией берегов с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также проведен сравнительный анализ с существующими методами.

В первой главе работы была обоснована необходимость проведения наблюдений за береговой линией. Было выяснено, что без таких наблюдений невозможно безопасное строительство вблизи водоемов, страдает судоходство из-за образования перекатов и кос, а также могут возникать проблемы с прохождением государственных границ по водным объектам. Также были сформулированы общие принципы наблюдений, главный из которых — обязательная привязка к стабильным опорным знакам и многократность измерений. Только повторяя съемки через определенные промежутки времени, можно увидеть, как именно смещается берег.

Во второй главе были подробно рассмотрены существующие методы наблюдения. Геодезические способы (нивелирование и тахеометрическая съемка) были признаны самыми точными и юридически законными, поскольку их результаты имеют силу согласно ГОСТам и другим нормативным документам. Однако у них есть серьезные минусы: работа занимает много времени, требует присутствия бригады из нескольких человек на опасном участке (возле обрыва или воды).

Спутниковые методы хороши для обзора больших территорий и позволяют соотносить полученные данные с наиболее прошлым, используя архивы снимков, база которых может достигать 1970-х годов. Но для небольших рек и смещений в несколько сантиметров (как в рассмотренных примерах на реке Ордеж) разрешение даже коммерческих спутниковых снимков часто оказывается недостаточным.

В третьей главе была подробно описана предлагаемая методика с использованием БПЛА. Начиная от подготовки полетного задания в специальных программах (таких как Geoscan Planner), заканчивая обработкой полученных снимков в Agisoft Metashape и выделением береговой линии в ГИС-системах. На конкретном примере (съемки за октябрь 2014 года и май 2017 года) было показано, что методика позволяет фиксировать смещения от 2 до 19 сантиметров, причем с высоким разрешением и сплошным покрытием местности.

В четвертой главе были объективно выделены плюсы и минусы всех трех методов. Это позволило наглядно сравнить их по таким важным критериям, как точность, трудоемкость, безопасность, зависимость от погоды и юридический статус.

В ходе работы была подтверждена выдвинутая гипотеза: использование БПЛА действительно позволяет сократить временные и ресурсные затраты, а также повысить детальность получаемой информации. Полевые работы выполняются одним оператором за 30-40 минут вместо полного дня работы бригады геодезистов. Точность методики (1-5 см по горизонтали) является допустимой для определения интенсивности размыва береговой линии.

Также снижаются риски для персонала, так как оператор находится на безопасном расстоянии от размываемого берега.

Основным недостатком предложенной методики на сегодняшний день является отсутствие законодательно закрепленных норм (ГОСТ, СП) для ее применения в официальной гидрологической практике. Результаты съемки с БПЛА могут пока восприниматься как вспомогательные или исследовательские. Поэтому одним из направлений дальнейшей работы может стать разработка нормативной базы для внедрения данной методики в повседневную работу гидрологических служб.

Тем не менее, учитывая стремительное развитие технологий и активный переход изыскательских организаций на БПЛА, можно с уверенностью

сказать, что предлагаемая методика имеет большие перспективы. Рекомендуется применять комбинированный подход: использовать геодезические методы для закладки стабильных опорных реперов, а для регулярных наблюдений за изменениями береговой линии применять съемку с беспилотных летательных аппаратов. Спутниковые методы при этом можно оставить для обзорного мониторинга крупных рек и береговой линии морей в промежуточные сроки между основными изысканиями.

Все задачи, поставленные во введении, были выполнены, цель работы достигнута. Полученные результаты могут быть использованы как учебное пособие для студентов гидрометеорологических специальностей, а также как основа для внедрения БПЛА-технологий в практику гидрологических изысканий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников, Н. Б. Динамика русловых потоков : учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Гидрология» направления подготовки «Гидрометеорология» / Н. Б. Барышников ; под редакцией И. Г. Максимовой, Л. В. Ковель. – Санкт-Петербург : Издательство РГГМУ, 2007. – 304 с. – ISBN 978-5-86813-175-2.
2. Водный кодекс Российской Федерации : федер. закон от 03 июня 2006 г. № 74-ФЗ : (ред. от 25.12.2023). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Барышников, Н. Б. Русловые процессы : учебник / Н. Б. Барышников. – Санкт-Петербург : Российский государственный гидрометеорологический университет, 2006. – 439 с. – ISBN 5-86813-157-5.
4. Инструкция по нивелированию I, II, III и IV классов : ГКИНП (ГНТА)-03-010-02 / Федеральная служба геодезии и картографии России, Центральный научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии. – Москва : ЦНИИГАиК, 2003. – 135 с.
5. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения : актуализированная редакция СНиП 11-02-96 : утвержден и введен в действие Приказом Госстроя от 10.12.2012 № 83/ГС. – Москва : Госстрой, 2012. – 89 с.
6. ArcGIS Desktop Help 10.x [Электронный ресурс] // Esri. – Режим доступа: <https://desktop.arcgis.com/> (дата обращения: 20.05.2026).
7. EOSDA Land Viewer : спутниковые снимки Sentinel-2 [Электронный ресурс] // EOS Data Analytics. – Режим доступа: <https://eos.com/landviewer/> (дата обращения: 17.03.2026).

8. Geoscan Planner : руководство оператора / ГК «Геоскан». – Москва : Геоскан, 2024. – 85 с.
9. Agisoft Metashape User Manual : Professional Edition, Version 2.0 / Agisoft LLC. – St. Petersburg : Agisoft, 2023. – 220 p.
10. Бекух, З. А. Использование беспилотных летательных аппаратов в гидрологии / З. А. Бекух, Ю. А. Горбачёв, В. С. Горячев, А. Е. Шумихин // Природообустройство и рациональное природопользование – 2024 : материалы Международной научно-практической конференции. – Москва : МГУ, 2024. – С. 14-21. – Режим доступа: <https://istina.msu.ru/download/667790359/1tfwBe:GFQKV34Jhiwj9P53SGKfDjzHaRU/> (дата обращения: 27.05.2026).

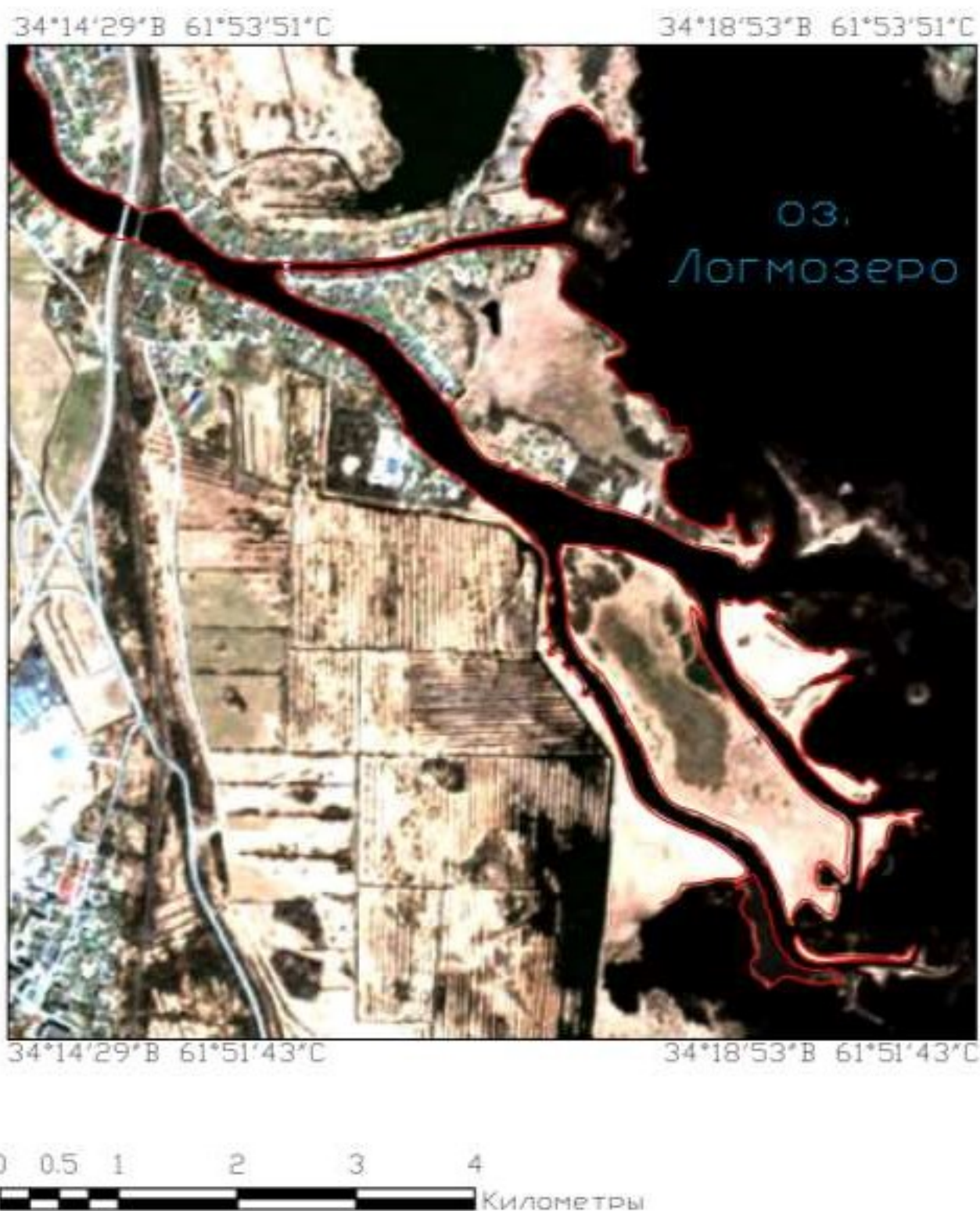
Приложение 1. Карта береговой линии.

Карта береговой линии р. Шuya в месте
впадения в оз. Логмозеро на 19.05.2025 г.



Приложение 2. Карта береговой Линии

Карта береговой линии р. Шуя в месте
впадения в оз. Логмозеро на 21.04.2026 г.



Приложение 3. Карта береговой линии.

Совмещенная карта положений береговой
линии на участке р. Оредеж – ГП №4.



Приложение 4. Карта береговой линии.

Совмещенная карта положения береговой
линии на участке р. Оредеж – ГП №1.

