

Санкт-Петербургский государственный университет

*Бичевина Карина Вячеславовна*

**Выпускная квалификационная работа**

*Наводнения на неизученных малых реках Ленинградской области (на примере р. Приветная)*

Уровень образования: *магистратура*  
Направление *05.04.04 «Гидрометеорология»*  
Основная образовательная программа *ВМ.5745 «Опасные гидрологические явления: от мониторинга до принятия решений (ГОЯ)»*

Научный руководитель:  
Старший преподаватель кафедры  
гидрологии суши, к. г. н., Банцев  
Дмитрий Вадимович  
Научный консультант:  
Заведующий кафедрой  
гидрологии суши, к. г. н.,  
Пряхина Галина Валентиновна  
Рецензент: главный специалист  
группы сопровождения  
инженерной  
гидрометеорологических и  
экологических изысканий  
управления контроля качества  
проектно-изыскательных работ,  
ООО «Автодор-Инжиниринг»,  
Смирнова Мария Владимировна

Санкт-Петербург  
2023

## Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	<b>3</b>
<b>1. ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	<b>5</b>
<b>2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ</b> .....	<b>14</b>
2.1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА .....	14
2.2. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ .....	25
<b>3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	<b>28</b>
3.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ .....	28
3.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЕЙ ВЫСШИХ ВОД ЗАДАННОЙ ОБЕСПЕЧЕННОСТИ.....	31
3.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ .....	31
3.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО СРОЧНОГО РАСХОДА ВОДЫ ДОЖДЕВОГО ПАВОДКА .....	34
<b>4. ПРОВЕДЕНИЕ ПОЛЕВЫХ РАБОТ</b> .....	<b>36</b>
4.1. ОРГАНИЗАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ .....	37
4.2. МЕТОДИКА ПРОФИЛИРОВАНИЯ РЕКИ .....	38
4.3. МЕТОДИКА РАСЧЁТА РАСХОДОВ ВОДЫ .....	39
4.4. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОЙ ТЕРРИТОРИИ .....	40
4.5. МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМОЙ РЕКИ.....	41
<b>5. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ</b> .....	<b>46</b>
5.1. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК .....	46
5.2. ПОСТРОЕНИЕ ГРАНИЦ ЗОНЫ ЗАТОПЛЕНИЯ .....	50
<b>7. АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАВОДНЕНИЙ НА МАЛЫХ РЕКАХ КАРЕЛЬСКОГО ПЕРЕШЕЙКА</b> .....	<b>55</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	<b>63</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>65</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ГРАФИКИ ПРОФИЛЕЙ РЕЛЬЕФА И ЖИВОГО СЕЧЕНИЯ РЕКИ ПРИВЕТНОЙ.</b> .....	<b>69</b>



## Введение

Доля малых рек составляет около 99% от общего числа рек гидрографической сети России. Кроме того, малые реки представляют большое хозяйственное значение и наиболее подвержены изменениям водного режима вследствие антропогенного влияния. (Жигулина, 2010) Земельный фонд бассейнов малых рек составляет более семидесяти процентов общей площади. Также около тридцати процентов городского населения и подавляющая часть сельского проживают в районах бассейнов малых рек. Дальнейшее повышение интенсивности освоения водосборов, вместе с повышением стоимости строящихся объектов и увеличением плотности населения способствуют возрастанию тяжести последствий от учащающихся затоплений территорий. (Аборнев, 2013)

Одной из малых рек является река Приветная, она протекает в западной половине Карельского перешейка по Выборгскому району Ленинградской области. В пойме реки располагаются садово-дачные участки посёлка Приветнинское, подверженные регулярному подтоплению в весенний период (Ресурсы поверхностных..., 1965). Проблема подтопления является актуальной в данном районе: подтопление приводит к экономическому ущербу, несёт за собой риски для населения и затрудняет передвижение по улицам садоводства. К тому же изучение реки Приветной затрудняется отсутствием на ней гидрологических постов. Одно из крупных наводнений на р. Приветной произошло в 2014 г. (В Выборгском..., 2014). Во время наводнения десятки жилых домов были затоплены и отрезаны от транспортного сообщения. Комиссия департамента Росприроднадзора по Северо-Западу и специалисты МЧС совершали мероприятия, направленные на решение данной проблемы: проводились проверки посёлка к безаварийному пропуску талых вод и крупных осадков; были проведены прокладка отводного русла и обследование русла реки. Тем не менее проблема регулярного подтопления не была решена.

В связи с этим, целью данной работы является определение границ зон затопления на примере р. Приветной и выявление особенностей наводнений на малых реках Ленинградской области. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- изучение имеющихся научных работ по теме затопления территорий водосборов малых рек, в том числе малых рек исследуемого региона;
- сбор и анализ исходной информации, представляющей собой собранные данные о физико-географических характеристиках речного бассейна, исторические гидрологические данные и цифровые данные рельефа территории бассейна;
- освоение методик расчёта гидрологических данных для неизученных рек;
- выполнение полевых работ на исследуемом участке и получение морфометрических и гидрографических параметров водосбора реки Приветной;
- построение границ зоны затопления посёлка Приветнинское;
- выявление основных факторов, влияющих на формирование наводнений на малых реках Карельского перешейка

Работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и одного приложения.

## 1. Обзор существующих исследований

Все регионы Российской Федерации в той или иной мере подвержены негативному воздействию наводнений. В свою очередь, Северо-Западная часть России, в частности Ленинградская область, характеризуется высокой повторяемостью наводнений и постоянно несёт от них значительный ущерб.

В материалах территориального планирования транспорта (Комитет градостроительной..., 2020) приводятся данные о зафиксированных затоплениях следующих муниципальных районов Ленинградской области:

- Приозерского (город Приозерск, река Вуокса),
- Выборгского (города Каменногорск, Приморск, Выборг),
- Всеволожского (деревня Новосаратовка),
- Кингисеппского (город Кингисепп и устьевая часть реки Луга, где разлив достигает 5 км в ширину),
- Тосненского (город Тосно, станции Тосно и Любань),
- Лужского (город Луга, станция Толмачёво),
- Волховского (деревня Часовенское, село Паша),
- Киришского (деревня Белая),
- Тихвинского (город Тихвин, деревня Горелуха).

На территории Ленинградской области периодически подвергаются подтоплению жилые дома и участки более десятка тысяч человек. Известны проблемы периодического затопления около сотни населённых пунктов, расположенных вдоль тридцати рек Ленинградской области. В границах зон затопления находится несколько тысяч жилых зданий и 13 объектов, представляющих потенциальную опасность или имеющих социальное значение. Более семидесяти процентов ущерба от наводнений на реках приходится на реки Тосна, Оредеж, Тихвинка, Оять, Паша и Луга. Наиболее разрушительные последствия наводнений наблюдаются в г. Тосно и г. Тихвин,

где в зону затопления суммарно попадает более четырёхсот зданий и более трёх тысяч человек. (Шандроха, и др., 2018)

Анализ имеющихся работ показал, что известно более 75 населённых пунктов, подверженных периодическому затоплению. (Бузмаков и др., 2016; Схема комплексного..., 2010; Невско-Ладожское, 2013). Карта-схема расположения известных населённых пунктов, подверженных затоплениям, приведена на рисунке 1. Как можно заметить, на данный момент исследовательские работы по теме наводнений в Ленинградской области не затрагивают территорию, расположенную к северу от г. Санкт-Петербурга. Данная работа позволит изучить факторы формирования наводнений в северных районах Ленинградской области, произвести сравнение и анализ для неизученной ранее территории.

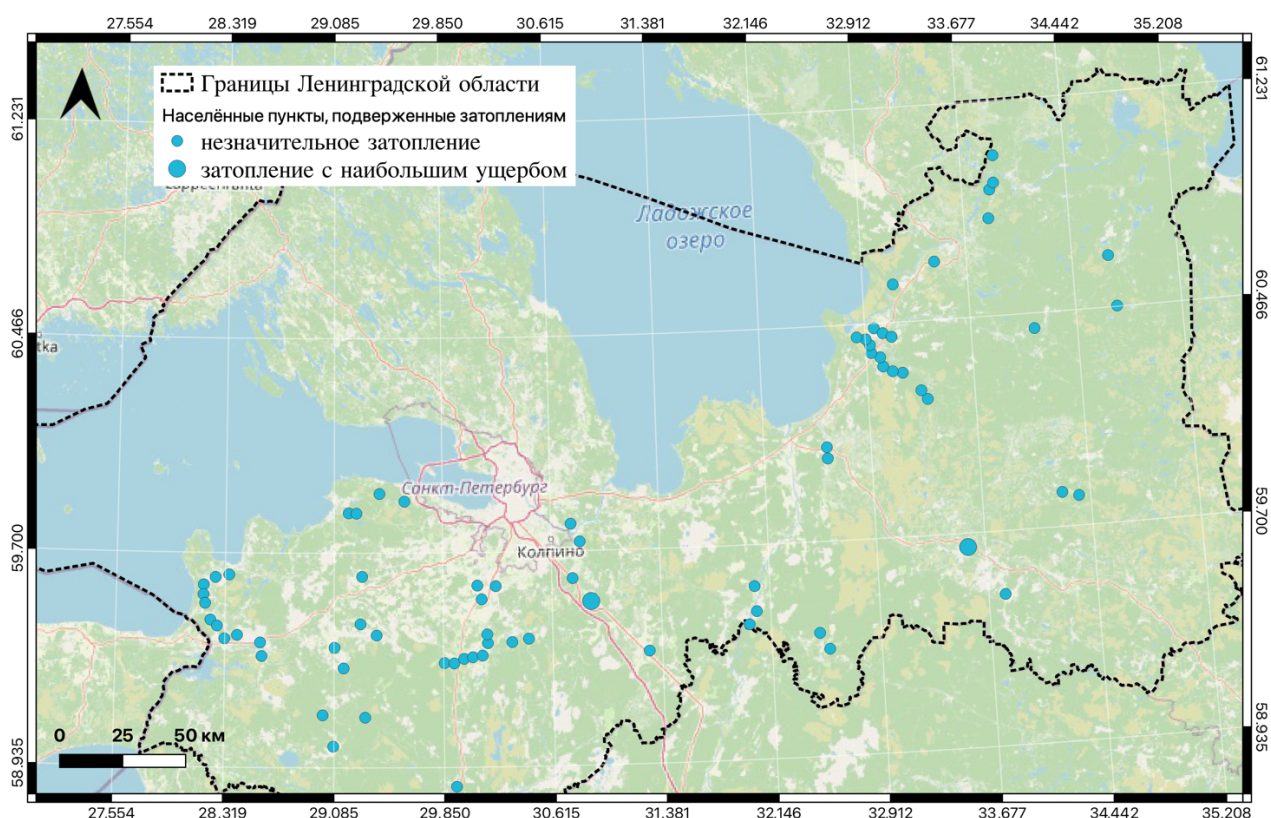


Рис. 1 – Карта-схема населённых пунктов, подверженных наводнениям по данным других исследований.

На данный момент организации Ленинградской области, занимающиеся гидрологическими и гидрографическими изысканиями,

получают множество государственных заказов на исследование границ зон затопления. По результатам выполняемых работ формируются рекомендации для предотвращения негативного воздействия затоплений. (Шандроха, и др., 2018)

Согласно книге Невско–Ладожского бассейнового управления (Схема комплексного..., 2010), основные виды наводнений в Ленинградской области с точки зрения их опасности для населения включают в себя:

- нагонные наводнения в устье Невы;
- наводнения, происходящие во время половодья (в т. ч. заторные);
- затопления устьевых участков и прибрежных территорий;
- наводнения зажорного типа на р. Нева.

Весеннее половодье в Ленинградской области обычно начинается в период с конца марта по начало апреля, а его окончание приходится на конец мая или начало июня, к востоку области может заканчиваться в середине июня. Средняя продолжительность половодья составляет от 60 до 70 дней. Максимальный уровень половодья наблюдается в середине или конце апреля. Вода поднимается в среднем на 2–4 метра, а в годы высокого половодья уровень может достигать семи метров. Крупнейшие половодья, отметившиеся на большей части территории области, были отмечены в 1955 и 1966 годах. Повторяемостью раз в три года обладают подтопления городов Тосно, Любань и Тихвин. Длительные подтопления отмечаются в пос. Свирица, находящемся на группе островов между рек Паша и Свирь. Основным фактором данных подтоплений является уровень воды в Ладожском озере и на реке Ладоге. В 2005 году подтопление огородов в пос. Свирица продлилось около двух месяцев, начавшись в мае и закончившись в июле. (ФГБУ Северо-Западное..., 2008).

Наводнения при половодьях являются наиболее распространённым видом наводнений. Данный вид наводнений, включая заторные, является характерным для рек с пойменными участками. Для оценки уровней и площадей наводнений Росгидромет применяет критерии отметок уровня воды

в створе постов для таких событий, как начало затопления, выход вод на уровень поймы и полное затопление поймы. Затем, применяя карты и материалы аэрофотосъёмки производится переход к площадным критериям. (ФГБУ Северо-Западное..., 2008)

Кроме наводнений, вызванных весенним половодьем, на данной территории наблюдаются наводнения и подтопления из-за дождевых паводков, максимальные уровни которых порой превышают максимальные уровни в период весеннего половодья. К прочим причинам наводнений также относятся зажоры, мощность которых в отдельные годы достигает таких масштабов, при которых сбросные расходы воды на Нарвской ГЭС снижаются до нуля. Также территория бассейна реки Невы уязвима к наводнениям вследствие затопления устьевых участков рек и прибрежных территорий озёр. Причиной возникновения таких затоплений лежит в периодическом переполнении озёрной чаши раз в несколько лет и сгонно-нагонных явлениях. (ФГБУ Северо-Западное..., 2008)

Статья Гуревича Е. В. и Маркова М. Л. о наводнениях в г. Тосно освещает основные факторы образования наводнений на реке Тосна. Авторы отмечают, что основным фактором формирования наводнений является антропогенное влияние. Река Тосна имеет сравнительно небольшие максимальные расходы воды в период весеннего половодья, а также устойчивую тенденцию к их снижению, однако это не приводит к беспроблемному прохождению половодья без наводнений. Отмечается, что основной причиной наводнений являются низкая пропускная способность русла и ледовые заторы, возникающие вследствие снижения пропускной способности. Так, в статье рассказывается об антропогенном влиянии, заключающемся в постоянном замусоривании русла реки на протяжении столетий, остатках свайных полей от разрушенных мостов и о других факторах снижения пропускной способности русла. Всё это в сумме приводит к заиливанию, аккумуляции наносов и формированию осередкового руслового процесса. Подобные факторы также актуальны и для других рек со сходными

морфометрическими характеристиками, так как низкий уклон русла (0,05 ‰ в случае исследуемого участка р. Тосны) обуславливает собой высокую чувствительность колебаний наивысших уровней воды даже к небольшим изменениям пропускной способности русла. (Гуревич, и др., 2018)

Градостроительная нормативная документация устанавливает требования, согласно которым подлежащие застройке и застроенные территории должны располагаться вне границ зон затоплений, имеющих повторяемость один раз в сто лет, либо быть защищены от затопления. При этом сами границы зон затопления должны присутствовать на генеральных планах поселений. На практике многие населённые пункты по сей день не защищены от затоплений, несмотря на существование данных требований к составлению проектной документации населённых пунктов на протяжении более пятидесяти лет. Правила, по которым должно происходить определение границ зон затопления, регламентируются постановлением Правительства Российской Федерации, однако само постановление содержит лишь обобщённые рекомендации, не регламентируя использование конкретных моделей и подходов. В связи с этим, из-за отсутствия чётких формулировок и алгоритмов действий, происходит много ошибок на всех этапах разработки и согласования проектов застройки. (ГГИ, 2019)

Существуют официальные методические материалы, рекомендованные к использованию правительственными органами Российской Федерации, которые описывают общие положения касательно определения границ зон затопления на реках. Однако, данные методические материалы не описывают конкретных методик и не дают актуальных данных, необходимых для проведения расчётов. Принятие решений о способах проведения многих исследований и расчётов ложится на отдельные группы специалистов, что в условиях недостатка информации часто приводит к снижению надёжности таких изысканий.

Тем не менее помимо официальных методических указаний был найден ряд научных работ, раскрывающих способы и методики, применяемые для

определения границ зон затопления авторами данных статей. Так, статья Бузмакова С. В. и др. (Бузмаков, и др., 2016) описывает методику определения границ зон затопления на примере рек Ленинградской области. В статье рассматривается процесс сбора исходной информации, определение границ и их верификация. Работа Терского П. Н. и др. (Терский, и др., 2017) раскрывает аспекты частичной автоматизации процесса расчёта и определения границ зон затопления. В данной статье описывается опыт определения зон затопления территорий бассейнов рек города Москвы с использованием самостоятельно разработанных авторами программных средств на базе ГИС. Авторами созданы два алгоритма для определения границ уреза воды в автоматическом режиме, что значительно упрощает работу в условиях отсутствия официальных рекомендуемых инструментов для проведения подобных работ. Отдельное внимание уделяется проблеме интерполяции значений уровней превышения между расчётными створами и построению зоны затопления на основе цифровой модели рельефа.

Однако, сам процесс определения границ зон затоплений не является единственной проблемой, так как для того, чтобы его произвести, сначала необходимо собрать большой массив информации об исследуемой реке и территории. Одним из видов необходимой информации являются ряды многолетних гидрологических наблюдений, необходимые для определения уровней половодья и паводков при заданных процентах обеспеченности. Опыт показывает, что на большинстве малых рек данные гидрологических наблюдений либо отсутствуют полностью, либо представлены лишь небольшими периодами наблюдений в связи с отсутствием сети постов гидрологических наблюдений. Ситуация обстоит лучше на средних и крупных реках. При том, что в России насчитывается больше двух миллионов рек, действующих постов гидрологических наблюдений только около трёх тысяч. (ГГИ, 2009) В случае отсутствия достаточно длинных рядов гидрологических наблюдений применяется метод поиска рек-аналогов и расчёта коэффициента дружности половодья. Применение данного метода при проведении



изысканий на малых реках было рассмотрено в работах Косицкого А. Г. (Косицкий, 2019) и Немчинова Е. О. (Немчинов, 2018) Статья освещает данную проблему и описывает конкретные подходы по определению зон затопления, использованные авторами при исследовании рр. Луги и Тосны. В работе описывается решение проблемы возникновения больших погрешностей при расчётах рек со сложным продольным профилем путём восстановления данных о профиле по натурным наблюдениям, проведение рекогносцировочных мероприятий и полевых исследований в целях обогащения исходной информации и верификации полученных расчётных уровней воды. Результатом работы являются данные о зданиях, находящихся в зонах затопления территорий бассейнов исследуемых рек при 1% обеспеченности. Также авторы отмечают необходимость разработки единых методических рекомендаций, устанавливающих конкретные методики определения границ зон затопления территорий речных бассейнов. (Косицкий, 2019)

Одной из главных проблем остаётся недостаток современных многолетних данных гидрологических наблюдений, необходимых для проведения расчётов максимального стока при паводках и половодьях, чтобы определить уровень воды при заданной обеспеченности. Для решения проблемы отсутствия данных применяется редуцирующая формула.

Расчёты с её использованием рассматриваются в вышеуказанных работах. Так, в статье Косицкого А. Г. подробно разбираются проблемы применимости редуцирующей формулы в условиях отсутствия актуальных данных, таких как коэффициенты заболоченности и залесённости и слоя стока рек. Озвучивается проблема того, что несмотря на то, что в теории коэффициенты дружности должны быть сходными для водотоков, имеющих географическую близость, на практике не удаётся обнаружить никаких пространственных закономерностей для значений данного коэффициента. Для малых рек бассейна р. Оки, минимальное и максимальное значения коэффициента различаются почти в пять раз, что делает невозможным

надёжный расчёт максимальных расходов воды для неизученных малых рек. В работе, посвящённой рекам юга Сибири, напротив, удалось найти закономерности для исследуемых водных бассейнов между их высотами и их коэффициентами дружности, однако отмечается такая особенность, как снижение надёжности расчётов на тех реках, на которых наблюдается затяжное весенне-летнее половодье, так как нет надёжных критериев для численного определения дат начала и окончания половодья.

Многие авторы, в том числе и авторы вышеупомянутых статей, сходятся во мнении, что на данный момент существует ряд проблем, возникающих при проведении подобных изысканий на предмет определения территорий, подвергнутых риску затоплений. Авторы описывают следующие проблемы:

- как было сказано выше, методические указания не являются исчерпывающими и достаточными для проведения изысканий;
- нет готовых программных инструментов, находящихся в свободном доступе, для автоматизации работы необходимо использовать либо сложные программные комплексы, требующие много различной информации, либо разрабатывать свои программные решения с нуля;
- нет актуальных и исторических данных гидрологических наблюдений в достаточном количестве. Необходимо расширение сети постов гидрологических наблюдений и обновление картографических данных.

Проведя обзор существующих работ, можно подвести итог: в Ленинградской области, как и во многих других регионах, актуальна проблема затоплений, происходящих на реках. Отдельными специалистами регулярно проводятся различные исследования по данной проблеме, однако отсутствует системность, зачастую приходится прибегать к разработке собственных программных средств и методик, исходя из имеющихся данных по конкретным объектам исследований. Что касается малых рек, имеющейся информации крайне мало, поэтому их глубокое изучение является актуальным. Река Приветная является одним из таких объектов, где ещё нет

проведённых исследований, однако периодически происходят затопления, причиняющие материальный ущерб.

## **2. Информационная основа исследования**

### **2.1. Физико-географическая характеристика**

Ленинградская область — субъект Российской Федерации, расположенный на северо-западе страны. Население области приблизительно составляет 1,9 миллиона человек. Территория области составляет 85 908,8 км<sup>2</sup> и омывается водами Финского залива, Балтийского моря и Ладоги. Ленинградская область имеет прибрежный характер и граничит с пятью субъектами Российской Федерации (Санкт-Петербургом, Республикой Карелия, Вологодской областью, Новгородской областью и Псковской областью) и двумя государствами (Финляндской Республикой и Эстонской Республикой). Ленинградская область имеет протяжённость 440 км с запада на восток и ширину от 100 до 325 км с севера на юг.

**Геологическое строение.** Ленинградская область построена магматическими и метаморфическими массивами горных пород, составляющих кристаллический фундамент Русской платформы и Балтийский щит, ледниковыми отложениями, а также горными породами платформенного чехла. Фундамент представлен гранитными породами и гнейсами протерозоя. Осадочные породы располагаются на кристаллическом фундаменте в направлении юго-востока с уклоном от 0,5 до 4 градусов. Породы фундамента представлены глинами, алевролитами, песчаниками, мергелями, аргиллитами, песками, бокситами, «горючими сланцами» и известняками раннепалеозойского периода. Четвертичные ледниковые отложения представляют собой песчано-глинистые породы, содержащие валуны и гальку. (ВСЕГЕИ, 1997)

**Климатические особенности.** Область находится в умеренном климатическом поясе с умеренно тёплым летом и мягкой зимой. Радиационный баланс приблизительно равен 1440 МДж/м<sup>2</sup>. Положительный радиационный баланс сохраняется около 7 – 8 месяцев в год. Повышенная облачность на протяжении всего года приводит к большому числу дней без солнца — около 110 – 125 дней в год. В июне наблюдаются белые ночи. В

целом по территории число часов солнечного сияния в год варьируется от 1600 до 1900. Летом чётко прослеживается факт того, что территория области находится в зоне с пониженным атмосферным давлением. Зимой наиболее заметно неравномерное распределение давления на территории: с северо-запада на юго-восток давление увеличивается. Так, атмосферное давление на станции Выборг может быть равно 1012 ГПа, что на 2 ГПа ниже, чем в то же время на станции в Тихвине. На протяжении всего года преобладают ветры с юга и запада, в то время как наибольшее похолодание бывает вызвано, как правило, северными и северо-восточными ветрами.

Климат региона обусловлен наличием водных пространств и влиянием Балтийского моря, что приводит к формированию переходного климата (от континентального к морскому). С запада и Атлантического океана поступает влажный воздух умеренных широт, который в зимнее время более тёплый и помогает компенсировать недостаток солнечного тепла. В летнее время массы воздушных потоков приносят дожди и прохладу. Континентальный воздух доносится с востока, редко с юга и юго-востока, а холодный арктический воздух поступает со стороны Карского моря. Морской воздух приносят северо-западные ветры с Баренцева моря. Среднегодовая температура  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , зимой  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  и до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а летом  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Относительная влажность воздуха составляет от 60% летом до 85% зимой. Осадки составляют от 550 до 650 мм в год. В особо засушливые годы может быть 500 мм осадков, а в наиболее влажные — до 1000 мм. Значительная часть из этой суммы приходится на снег, который падает в зимний период. Снежный покров лежит от 130 до 160 дней. Западные районы особенно подвержены влиянию Атлантического и Балтийского морей, что обеспечивает более мягкий климат. В Восточных районах климат более континентальный. А количество осадков от 550 до 600 мм на побережье Финского залива, и 800 – 850 мм на возвышенностях Карельского перешейка. (Материалы по обоснованию..., 2020)

**Гидрографическая сеть.** Ленинградская область относится к Северо-Западному озёрному району, её озёрность составляет 14,4%. На территории области располагается 6,8 тысячи озёр и искусственно созданных водоёмов, а также шесть водохранилищ. 10% территории приходится на болота и заболоченности, а область входит в Северо-Западный торфоболотный район. Среди прочих болот на территории Ленинградской области, здесь располагается болото Соколий мох, которое занимает площадь в 6 736 гектар и является одним из крупнейших болот в Европе. В области широко распространены пойменные озера, болотные массивы и зарастающие болота, а также лагунные озера на побережье Финского залива. На востоке области можно отметить присутствие карстовых озёр, которые периодически исчезают по причине разнообразных факторов, таких как засуха, изменение течения подземных потоков и др. Во многих случаях озера и реки образуют озёрно-речные системы, соединённые друг с другом узкими протоками. В области реки активно используются в качестве транспортных линий и источников электроэнергии: развито судоходство и гидравлические электростанции.

Большинство водных объектов Ленинградской области входят в водосбор Балтийского моря. Некоторые территории на юго-востоке области относятся к бассейну Верхней Волги. Общая протяжённость речной сети составляет приблизительно 50 тысяч километров. Всего насчитывается 25 тысяч рек, а густота речной сети составляет 0,6 км/км<sup>2</sup>. Наибольшая по протяжённости река — Луга. Её протяжённость составляет 355 км. Река Нева стоит на первом месте по площади водосборного бассейна, которая составляет 281 тыс. км<sup>2</sup>, а её протяжённость — 74 км. Среднегодовой расход Невы составляет 2600 м<sup>3</sup>/с. Остальные реки области тоже многоводны, среди них также значительной водностью в 790 м<sup>3</sup>/с. В области питание рек смешанное, преимущественно снеговое и дождевое. В данном регионе реки имеют признаки восточноевропейского типа водного режима. Типичный годовой сток рек с данным типом водного режима представлен на рисунке 2.

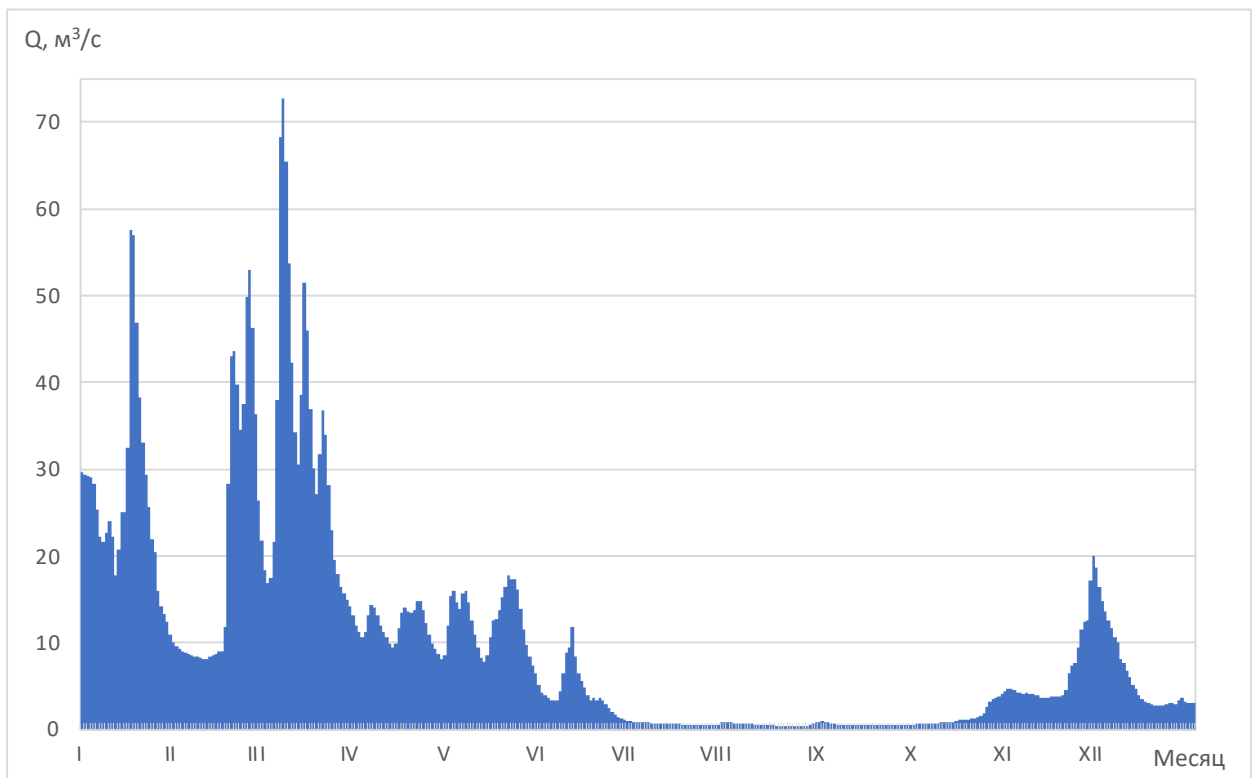


Рис 2. Гидрограф реки с восточноевропейским типом водного режима

Особенностью является весеннее половодье, которое характеризуется быстрым подъёмом уровня воды. Затем наступает межень, продолжающаяся до осени, когда происходят дожди, которые служат предупреждением о начале зимней межени. Реки замерзают в конце ноября-декабре и вскрываются в апреле-мае, при этом происходит ледоход. (Схема комплексного..., 2010; Состояние окружающей, 2019). Переход температуры воды через  $+0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  весной свидетельствует о начале устойчивого повышения её температуры и исчезновения ледяных образований, а осенью – о снижении температуры и появлении льда. На различных реках Нева, Свирь, Волхов и других, более мелких водотоках, входящих в этот регион, сроки перехода температуры через  $+0,2$ ,  $+4$  и  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  могут отличаться. Прогревание воды озёр весной происходит медленнее, чем воды рек, а последующее охлаждение происходит также медленно. (Ресурсы поверхностных..., 1965)

Температурный режим рек во время весны проявляется в апреле, когда начинается прогрев воды, достигая пика в июле ( $+18 - +19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Максимально высокая температура характерна для водоёмов Юго-Западных, Западных муниципальных районов. На реках Авлога, Вуокса, Нева, Свирь температура

воды отличается на незначительную величину (-1,0 – -1,5 °С). Наименьшая температура воды зафиксирована на реках с карстовым питанием в летний период (+16 – +17 °С). В августе начинается медленный процесс охлаждения воды, что в зависимости от года может достигать до 5 – 8 °С в сентябре, при этом в ноябре температура падает до +0,2 °С. Длительность периода с температурой воды более +17 °С варьируются от 45 до 55 дней, в отдельные годы колеблясь от 15 – 30 до 60 – 70 дней. (Ресурсы поверхностных..., 1965; Схема комплексного..., 2010)

На формирование ледового режима рек, протекающих на территории Ленинградской области, оказывает влияние переходная зона между евроазиатским континентальным и западноевропейским морским климатами. Из-за геоморфологических особенностей бассейна реки Луга, протекающей по большей части территории области и из-за большой водности озёрных рек, процесс ледообразования развивается с конца октября по конец ноября. На большинстве рек наблюдается ледоход в осенний период, длящийся обычно от пяти до десяти дней. В годы с затяжным началом зимних холодов длительность осеннего ледохода может достигать сорока дней. Реки Ленинградской области замерзают, в основном, ко второй-третьей декаде декабря, однако малые реки и притоки замерзают на 5 – 10 дней раньше. Для большинства рек области для появления льда необходима сумма отрицательных температур в 8 – 9 °С, на крупных же реках от 14 (рр. Луга и Плюсса) до 31 °С (р. Свирь). В среднем ледостав длится от 88 до 194 дней, при этом максимальная толщина льда достигается в марте, а среднемноголетняя толщина составляет от 25 до 60 см. Вскрытие рек происходит с конца апреля по начало мая и длится в среднем 20 дней, однако при затяжных прерывистых потеплениях вскрытие рек может затянуться до 38 дней, а в случае тёплой весны вскрытие рек по всей территории происходит дружно и завершается за 8 – 11 дней, что может сопровождаться отсутствием ледохода на малых и средних реках. (Ресурсы поверхностных..., 1965; Схема комплексного..., 2010; Состояние окружающей..., 2019)



**Растительность.** Территория области располагается в зоне тайги с распространением на средние и южные подзоны, а также незначительное количество зон смешанных лесов. Особенно развиты лесные массивы на востоке области, рядом с берегами Свири, Паши, Ояти. В породном составе чаще всего встречаются сосна (37%), ель (29%) и берёза (26%). В основном еловые леса сохранились на севере области и заповедниках. Самые обильные лесные массивы с соснами находятся в Карельском перешейке. На участках с сырой почвой в составе лесов можно наблюдать ольху черную. В более плодородных местах можно отметить присутствие широколиственных пород, среди которых клён остролистный, липа мелколистная, дуб черешчатый, вязы шершавый и гладкий, ясень обыкновенный, а в подлеске - лещина обыкновенная. На западе и юге области можно наблюдать небольшие лесные массивы широколиственных пород. Разнообразие представленной в регионе растительности обеспечено во многом людьми, однако многовековое влияние людей также повлекло уничтожение коренных лесов. Широко распространены вторичные мелколиственные осинники и березняки и хвойно-мелколиственные леса. В зависимости от степени дренированности, среди березняков на территории области преобладает берёза пушистая в менее дренированных зонах и берёза бородавчатая в более дренированных. Осина в основном встречается в смешанных лесах наряду с берёзой. Часто встречаются участки леса из серой ольхи с обильным травянистым покровом. На Ижорском плато сохранилась растительность, представленная неморальнотравными еловыми лесами и примесями широколиственных лесов с широким разнообразием травянистого покрова. Климат и орографические условия обуславливают распространённость болот и заболоченных лесов, представленных хвойными и мелколиственными породами. Кроме того, большая часть территории используется в сельскохозяйственных целях и для вырубки леса. (Состояние окружающей..., 2019; Даринский, 2012)

**Почвы.** Область располагается на границе южной и средней подзон центральной таёжно-лесной биоклиматической области умеренно-холодного

климатического пояса. На территории области выделяют Прибалтийскую и Карельскую почвенные провинции. Большая часть территории приходится на Прибалтийскую провинцию южной подзоны тайги. В данной провинции выделяются такие почвенно-географические округа, как ордовикское плато, где отмечаются выходы известняков на поверхность, к которым прилегают дерново-подзолистые карболитозёмы и остаточные карбонатные почвы; Приильменский округ, представленный озёрно-ледниковыми равнинами; а также Валдайская возвышенность, где преобладают дерново-подзолистые почвы. В Карельской же провинции располагается Выборгско-Сортавальский округ, характеризующийся выходами на поверхность кристаллических пород, на поверхности которых формируются подбуры, дерново-подбуры, бурозёмы и литозёмы. Центральная моренная возвышенность и равнина характеризуются ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями лёгкого гранулометрического состава с преобладающими подбурами и подзолами. Характерными формами ледникового рельефа являются так называемые «бараньи лбы», представляющие собой скалы, сложенные из горных пород, выступающих на поверхность и отполированные движением ледников. Больше половины территории района занято лесами, преимущественно хвойными.

Болотные и заболоченные почвы формируются по всей территории в местах выхода тяжёлых по гранулометрическому составу пород. В районе имеется множество месторождений гранитов, торфа, песков. Также район уникален наличием месторождений своеобразных сапропелевых грязей (так называемых гиттий), сформировавшихся 5-7 тысяч лет назад и залегающих вдоль Финского залива.

**Ландшафты.** Подавляющая часть территории региона относится к Северо-Западной физико-географической области русской равнины, за исключением ландшафтов, располагающихся Выборгского и Северо-Западного Приладожья. Эти районы приурочены к выходам кристаллических пород Балтийского кристаллического щита. На территории Ленинградской

области существует 36 ландшафтных районов с уникальными комплексами природных условий. Ландшафты представлены южно- и среднетаёжными подтипами Балтийско-Ладожской провинции восточноевропейского бореального типа. Преобладают следующие виды ландшафтов: сельговые грядово-ложбинные, расположенные на кристаллических породах; холмисто-моренные, располагающиеся на карбоновом известняковом плато; платообразные с карстовыми процессами на ордовикских известняках; камовые; моренные заболоченные; озёрно-ледниковые, в том числе заболоченные и дренированные, расположенные на минеральных отложениях, различных по минералогическому и гранулометрическому составу.

**Характеристика объекта исследования.** Река Приветная протекает в западной половине Карельского перешейка по Выборгскому району Ленинградской области. Общая протяжённость реки Приветной составляет 22 км при площади водосбора около 70 км<sup>2</sup>. Река берёт своё начало из болота, расположенного к северо-востоку от ж/д станции Яппиля и впадает в Финский залив в полутора километрах к северо-востоку от мыса Песчаный. В пойме реки располагаются садово-дачные участки посёлка Приветнинское (1965).

Посёлок Приветнинское (ранее Ино, фин. Ino) расположен к югу от реки Приветной, в Полянском сельском поселении Выборгского района Ленинградской области. Постоянное население посёлка составляет 847 человек по данным переписи населения в 2017 году. В посёлке располагаются дачные участки и садовые некоммерческие товарищества. На юго-востоке посёлка пролегает Приморское шоссе. Расположение р. Приветной показано на рис. 3.

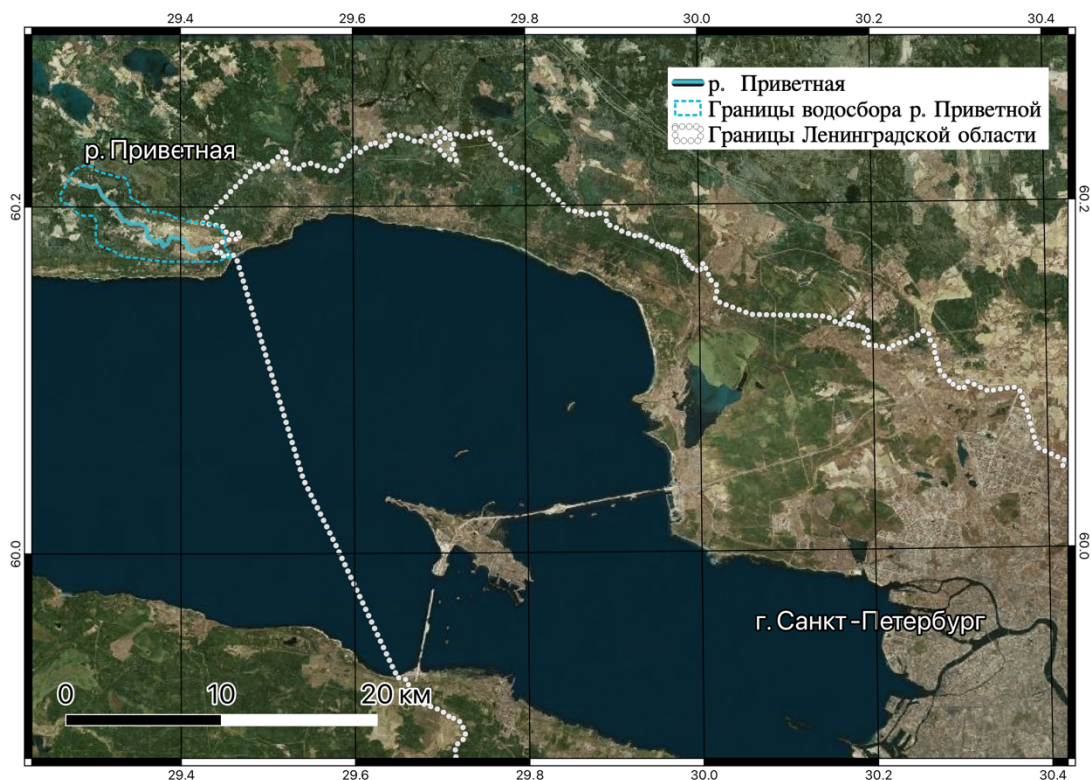


Рис. 3 – Местоположение р. Приветной

Бассейн реки Приветной относится к приморскому северобережному ландшафтному району, а тип рельефа территории бассейна — озёрно-ледниковый, террасированный. Рельеф в месте прилегания к долине реки в нижнем течении пересечённый.

Водосбор реки относится к приморскому климатическому району. Среднемаксимальная температура воздуха на территории бассейна реки составляет  $+22,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  в июле и  $-1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  в январе, а среднеминимальная температура —  $+15,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $-20,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно. Средняя суточная температура выше пяти градусов по Цельсию наблюдается в течение 170 дней в году, а выше десяти градусов — до 120 дней. Самым солнечным месяцем на территории области является июнь, наблюдаются белые ночи с конца мая по вторую половину июля.

Устойчивый снежный покров устанавливается обычно к 11 декабря, при этом его высота редко достигает 40 сантиметров, а число дней со снежным покровом составляет около 140 дней.

По данным водного госреестра России, река Приветная относится к Балтийскому бассейновому округу и к речному бассейну реки Нева (включая

бассейны рек Онежского и Ладожского озера). (Разработка проекта СКИОВО, 2013)

Максимальный сток реки Приветной приходится на апрель, а минимальный сток наблюдается в июле. В посёлке Смолячково по реке Приветной проходит граница между г. Санкт-Петербургом и Ленинградской областью. Река разделяется на два рукава в месте её протекания через пансионат «Восток-6», а затем рукава снова сходятся на подходе к устью реки. (Справочник водных ресурсов)

Бассейн реки Приветной располагается в южнотаёжной лесной полосе, а также входит в прибалтийско-ленинградский геоботанический округ. Прибалтийско-Ленинградский округ, представляет собой террасированную равнину, расположенную между Балтийско-Ладожским уступом и берегом Финского залива. Для первой, самой низкой террасы характерны сухотравные, вересковые и брусничные сосняки. Естественная растительность сохранилась только в первой террасе, тогда как во второй и третьей она полностью уничтожена людьми и заменена парками. Однако в западной части округа сохранились сфагновые и долгомошные еловые леса, а также дубравные элементы, такие как орешник, дуб, липа и вяз.

Большая часть водосбора р. Приветной покрыта зеленомошными сосняками и лишайниковыми, растительность вдоль реки в основном представлена соснами с листовенным подлеском, в остальном территория занята лугами, огородами и пашнями. (Дмитренко, 2016)

Преобладающим типом почв в районе являются подзолистые почвы, обладающие высокой кислотностью. Почвообразующие породы — пески и супеси. Данные почвы непригодны для использования в сельскохозяйственных целях без искусственного улучшения. На территории бассейна поверхность представляет собой комбинацию естественных и антропогенно-изменённых почв с непочвенными образованиями. Естественные почвы представлены иллювиально-гумусовыми и

иллювиально-железистыми подзолами, а антропогенно-преобразованные почвы — альфегумусовыми агрозёмами.

Ландшафты южнотаёжной полосы на протяжении длительного периода времени подвергаются значительным антропогенным изменениям и отличаются сравнительно высокой урбанизированностью и сельскохозяйственной освоенностью. Значительная часть территории обезлесена, а оставшаяся часть лесов представляет собой мелколиственные насаждения, покрывающие до 40% площади ландшафтов, а также неполновозрастные хвойные леса. Несмотря на сложившуюся ситуацию, на территории продолжается вырубка лесов. В разных провинциях области бассейна на хозяйственные угодья отводится от 10 до 35% площади. Как правило, более половины площади хозяйственных угодий используется в качестве пашни. Сельское хозяйство оказывает значительный вклад в загрязнение водоёмов и почв района. Кроме того, распространена сельскохозяйственная эрозия.

## 2.2. Исходные данные

В качестве исходных данных были использованы:

- 1) Ряды максимальных среднесуточных расходов и максимальных годовых расходов весеннего половодья по 35 постам гидрологических наблюдений за периоды, указанные в таблице 1;
- 2) спутниковые снимки со спутников Landsat и Sentinel за 2001, 2015, 2021 гг.;
- 3) топографические карты местности масштаба 1:2000 и 1:25 000;
- 4) информация, полученная при опросе местных жителей на месте исследования и из средств массовой информации;

Расположение постов наблюдений, данные по которым были использованы, представлено на рисунке 4. Информация была получена в государственном гидрометеорологическом институте и на интернет-ресурсе АИС ГМВО. Выбор производился среди действующих гидрологических постов на основании наличия непрерывных данных гидрологических наблюдений за продолжительный период (от 30 лет).





Рис. 4 – Карта-схема постов гидрологических наблюдений, использованных в исследовании.

Таблица 1. Перечень гидрологических постов, использованных при расчётах.

Река – гидропост	Длина реки, км	Расстояние от устья, км	F, км <sup>2</sup>	Годы наблюдений
р. Петровка – пос. Дружноселье	28	21	78,6	1950 – 2020
р. Авлога – д. Матокса	7012	34	89,1	1954 – 2020
р. Оять – д. Мининская	266	206	693	1946 – 2020
р. Оять – д. Тимофеевская	266	157	1910	1962 – 2013
р. Оять – д. Акулова Гора	266	53	4830	1935 – 2020
р. Паша – Ниже д. Дуброво	242	137	3910	1935 – 2020
р. Паша – с. Часовенское	242	51	5710	1935 – 2020
р. Капша – д. Ерёмна Гора	115	19	1560	1954 – 2020
р. Пчёмжа – д. Белая	157	44	1690	1941 – 2020
р. Тигода – ст. Любань	143	86	589	1945 – 2020
р. Воложба – д. Пареево	81	54	644	1952 – 2020
р. Воложба – д. Воложба	81	8,20	1330	1936 – 2014
р. Пярдомля – д. Кондратово	22	12	129	1964 – 2020
р. Тихвинка – д. Горелуха	144	16	2070	1881–2020



р. Дымка – д. Домачево	34	11	112	1950 – 2020
р. Валя – д. Подборье	37	1	250	1958 – 2020
р. Шомушка – д. Бор	84	28,2	123	1983 – 2020
р. Дымовка – пос. Зайцево	62	26	238	1961 – 2020
р. Вьюн – пос. Запорожское	44	2,7	542	1955 – 2020
р. Яндеба – ст. Яндеба	38	16	280	1950 – 2018
р. Тосна – ст. Тосно	121	36	1300	1943 – 2020
р. Ижора - д. Аннолово	76	29	784	1977 – 2020
р. Перовка – пос. Гончарово	47	7,4	257	1949 – 2020
р. Гороховка – пос. Токарево	30	5,9	700	1941 – 2020
р. Луга – г. Луга	353	222	2330	1935 – 2020
р. Луга – ст. Толмачёво	353	182	6350	1916 – 2020
р. Оредеж – пгт. Вырица	192	124	920	1936 – 2020
р. Орлинка – уроч. Орлинка	12	2,3	206	1954 – 2020
р. Ящера – д. Долговка	78	18	581	1952 – 2020
р. Вруда – д. Извоз	60	17	544	1955 – 2020
р. Луга – г. Кингисепп	353	60	12800	1944 – 2020
р. Систа – д. Среднее Райково	64	14	573	1946 – 2020
р. Мга – д. Горы	93	9,80	709	1933 – 2018
р. Коваши – д. Лендовщина	38	16	505	1950 – 2015
р. Хревица – с. Ивановское	30	3	316	1927 – 2018

В результате была создана информационная база данных исследования.

### **3. Методика исследований**

#### **3.1. Определение границ зон затопления**

При проведении работ и расчётов, связанных с определением границ зон затопления, используются географические информационные системы (ГИС). Программные ГИС предоставляют возможности, которые можно условно разделить на три категории (этапа):

- Ввод исходных данных, включающих в себя архивные картографические материалы, географические карты, атласы, материалы аэрофотосъёмки, космические снимки, растровые и векторные топографические карты, а также данные о рельефе местности и профиле исследуемого водотока, основанные на данных водомерных постов и данных, полученных с цифрового оборудования, использованного в процессе полевых исследовательских работ. ГИС позволяют совместно использовать вышеуказанные виды данных и использовать их для дальнейших расчётов;
- обработка оцифрованных данных с использованием программных алгоритмов. В частности, ГИС позволяет дополнять данные о рельефе за счёт интерполяции имеющихся известных точек рельефа, полученных в процессе оцифровки топографических карт, с использованием цифровых моделей рельефа (ЦМР), полученных из архивов спутниковых снимков или точек рельефа, загруженных с ГНСС-приёмника. Также возможно построение собственных ЦМР и расчёт границ зон затопления при расчётных уровнях воды с помощью встроенных функций ГИС (калькулятор растров) или используя встроенные в ГИС языки программирования для задания собственного алгоритма;
- представление полученных результатов визуально (в виде карт-схем разливов воды) или в виде таблиц.

Перечень операций, которые необходимо выполнить:

- Создание цифровой модели рельефа исследуемой территории;
- построение цифровой модели продольного профиля реки в виде кусочно-линейной аппроксимации фактического профиля водотока;
- определение границ зоны затопления при заданных расчётных уровнях превышения воды и подсчёт числа участков и зданий, находящихся в зоне затопления;
- подготовка карт-схем, показывающих границы зон затопления при 1% и 5% обеспеченности с нанесёнными на них обозначениями затопленных участков;

Выполнение вышеуказанных действий нужно для получения цифровых моделей, необходимых для моделирования затопления. За счёт имеющихся моделей и рассчитанных уровней превышения можно построить карту зоны затопления. Так как уровни уреза воды размечены вдоль осевой линии водотока, а затопление необходимо определять по всей площади исследуемой территории, необходимо перенести уровни уреза воды на всю площадь так, чтобы в каждой точке площади было известно значение уровня уреза воды в ближайшей точке водотока. Для этого применяется алгоритм создания полигонов Вороного, который создаёт одноканальный растровый слой, представленный многоугольниками. Значение растра в таком слое отражает уровень уреза воды в точке, на основе которой создан данный многоугольник. Пример такого растра на фоне продольного профиля реки представлен на рисунке 5.

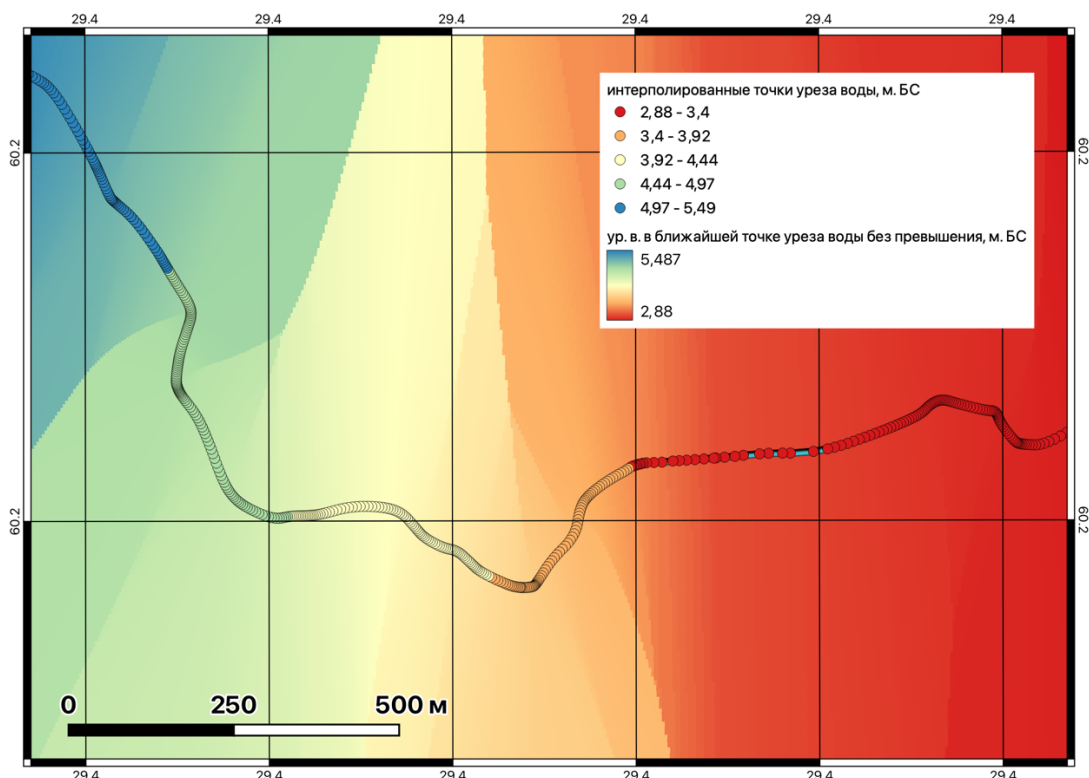


Рис. 5. Пример работы алгоритма полигонов Вороного.

Имея расчётный уровень превышения, растровый слой с уровнями уреза воды, а также ЦМР, применяется один из основных инструментов ГИС, называемый калькулятором растров. Калькулятор растров позволяет произвести вычисления по заданной формуле для каждой точки выделенной области, используя в формуле значения, получаемые из растровых слоёв. Определение зоны затопления производится по следующей формуле:

$$H < h_0 + h_{\text{п}} \quad (1)$$

где  $H$  — уровень рельефа в заданной точке на ЦМР;  
 $h_0$  — высота уреза воды в ближайшей точке водотока, заданный растром с полигонами Вороного;  
 $h_{\text{п}}$  — заданный уровень превышения.

Так как формула определяет неравенство, то результатом вычисления значения формулы является логическое значение, которое в калькуляторе растров приводится к числовому по следующей логике: если неравенство истинно, то результат вычисления равен единице, иначе результат равен нулю.

Таким образом, результатом вычисления по данной формуле становится новый одноканальный растровый слой, в котором значение 1 установлено в тех точках рельефа, которые находятся ниже уровня воды с учётом уклона водотока. Стоит отметить, что данный растр не учитывает возможность существования таких особенностей рельефа, как ложбины, ямы и прочие низины, не соединённые с поймой водотока. В обзоре существующих исследований были упомянуты статьи, рассматривающие реализацию более продвинутых алгоритмов построения зоны затопления с учётом данных особенностей рельефа (Терский, и др., 2017), однако в простых случаях бывает достаточно расчёта зоны затопления с использованием простого калькулятора растров, так как либо рельеф не имеет вышеназванных особенностей, либо таких областей достаточно мало, чтобы вручную удалить ошибочные части рассчитанной зоны затопления.

Для определения границ зон затопления при наводнениях, вызванных половодьем или паводком, необходимо иметь рассчитанные значения уровня высших вод заданной обеспеченности.

### **3.2. Определение уровней высших вод заданной обеспеченности**

Расчёт уровней высших вод заданной обеспеченности производится в соответствии с СП 33.101 от 2003 года. Для выполнения данных расчётов используется программа Profiles2014. Для проведения расчётов с помощью данной программы необходимы следующие входные данные: форма поперечного профиля исследуемого участка реки, коэффициент уклона русла, коэффициент шероховатости русла, расход воды.

Данные о поперечном профиле и уклоне реки получаются на этапе проведения полевых гидрологических работ. Максимальный расход заданной обеспеченности производится по различным формулам для весеннего половодья и для дождевых паводков. Коэффициент шероховатости русла определяется по таблице в вышеуказанном своде правил.

### **3.3. Определение максимальных расходов весеннего половодья**

В связи с дефицитом данных гидрологических наблюдений, который зачастую возникает при исследовании малых рек, появляется необходимость производить изыскания и при отсутствующих данных. Для решения данной проблемы существует метод гидрологической аналогии. Данный метод представляет собой способ приблизительной оценки необходимых гидрологических характеристик водного объекта путём сравнения гидрологических характеристик других похожих водных объектов. (Чеботарев, 1970)

Основным понятием, которым оперируют при использовании метода гидрологической аналогии является река-аналог. Река-аналог представляет собой реку, имеющую условия формирования стока схожие с условиями формирования стока изучаемой реки и имеющую гидрологические данные, достаточные для проведения соответствующих расчётов. (ГГИ, 2009)

Для проведения расчётов на исследуемой реке, гидрологических данных о которой недостаточно для расчётов, используется метод рек-аналогов, описанный в СП 33.101 от 2003 года. (Госстрой России, 2004)

Расчёт максимальных расходов весеннего половодья обеспеченности производится по редуцированной формуле (ГГИ, 2009):

$$Q_{P\%} = \frac{K_0 h_p \mu A}{(A + A_1)^n} \delta \delta_1 \delta_2 \quad (2)$$

где  $h_p$  – слой стока весеннего половодья обеспеченностью  $P$  %;

$A$  — площадь водосбора, км<sup>2</sup>;

$K_0$  — коэффициент, характеризующий дружность весеннего половодья

$\mu$  — коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров слоя стока и максимального расхода воды;

$n$  — районный показатель редукиции;

$A_1$  — коэффициент, характеризующий снижение редукиции в зоне малых площадей водосборов;

$\delta, \delta_1, \delta_2$  — коэффициенты, учитывающие снижение модуля максимального стока соответственно под влиянием озёрности, залесённости и заболоченности.

Коэффициент  $K_0$ , характеризующий дружность весеннего половодья, определяется обратным путём из формулы (3) с использованием данных рек-аналогов (Вуглинский, и др., 2012; 2004) по формуле:

$$K_0 = \frac{Q_{p\%}(A + A_1)^n}{h_{p\%}\mu A \delta \delta_1 \delta_2} \quad (3)$$

Для получения слоёв половодья расчётной обеспеченности реки Приветная были рассчитаны статистические характеристики рядов слоя половодья рек-аналогов ( $h_0$  — среднее значение,  $C_v$  — коэффициент вариации,  $C_s$  — коэффициент асимметрии).

Расчётный слой весеннего половодья определяется по формуле:

$$h_p = k_p \cdot h_{cp} \quad (4)$$

где  $k_p\%$  — модульный коэффициент, определяемый в зависимости от обеспеченности  $P\%$  (ВП%) расхода, коэффициента вариации стока весеннего половодья  $C_v$  и отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации  $C_s/C_v$ , по таблице ординат трехпараметрического гамма-распределения;  
 $h_{cp}$  — значение среднего многолетнего слоя стока половодья, которое определяют по рекам-аналогам или интерполяцией по картам изолиний этого параметра для исследуемого района.

Коэффициент  $\delta$ , учитывающий снижение максимального стока рек, зарегулированных озёрами следует принимать равным единице при  $A_{оз} < 2\%$  и 0,8 при  $A_{оз} > 2\%$ , независимо от степени озёрности, если озёра, находящиеся в бассейне реки, располагаются не на главном русле и вне основных притоков.

$$\delta = \frac{1}{(1 + C \cdot A_{оз})} \quad (5)$$

где  $C$  — коэффициент, принимаемый в зависимости от среднего многолетнего слоя стока весеннего половодья  $h_0$ ;  
 $A_{оз}$  — средневзвешенный коэффициент озёрности, %.

Коэффициент, учитывающий влияние залесённости, определяется по формуле:

$$\delta_1 = \frac{\alpha}{(A_{л} + 1)^{n'}} \quad (6)$$

где  $\alpha$  и  $n'$  — коэффициенты, принимаемые по приложению к СП 33.101-2003, зависящие от расположения леса на водосборе, степени залесённости, преобладающих почво-грунтов под лесом и природной зоны. В данном случае при  $A_{л} > 30\%$  параметр  $\alpha = 1$ , а коэффициент редукции  $n' = 0,22$ , так как в лесной зоне отсутствует информация о преобладающих почво-грунтах.

Коэффициент, учитывающий снижение максимального расхода воды заболоченных водосборов, определяют по формуле:

$$\delta_2 = 1 - \beta \cdot \lg (0,1 \cdot A_6 + 1) \quad (7)$$

где  $A_6$  — относительная площадь болот, заболоченных лесов и лугов в бассейне реки, %;  $\beta$  — коэффициент, определяемый в зависимости от типа болот и механического состава почво-грунтов вокруг болот и заболоченных земель (со слоем торфа не менее 30 см). В первом приближении коэффициент  $\beta$  можно определить по приложению к СП 33.101-2003.

Коэффициент  $\delta_2$ , учитывающий влияние болот при заболоченности водосбора менее 3% принимается равным единице.

#### **3.4. Определение максимального срочного расхода воды дождевого паводка**

Для определения  $Q_{p\%}$  при наличии одной или нескольких рек-аналогов формула имеет вид:



$$Q_{P\%} = q_{P\%,a} \cdot \varphi_M \left( \frac{\delta\delta_2}{\delta_a\delta_{2a}} \right) \cdot A \quad (8)$$

где  $Q_{P\%,a}$  — модуль максимального срочного расхода воды реки-аналога расчётной вероятности превышения  $P\%$ ,  $\text{м}^3/\text{с} \cdot \text{км}^2$ , рассчитывается по формуле

$$q_{P\%,a} = \frac{Q_{P\%,a}}{A_a} \quad (9)$$

где  $Q_{P\%,a}$  — максимальный расход воды дождевого паводка реки-аналога вероятностью превышения  $P\%$ ,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  
 $A_a$  — площадь водосбора реки-аналога,  $\text{км}^2$ ;  
 $\varphi_M$  — коэффициент, учитывающий редукцию максимального модуля стока дождевого паводка ( $q_{1\%}$ ) с увеличением площади водосбора ( $A$ ,  $\text{км}^2$ ) или продолжительности руслового времени добегаания ( $\tau_r$ , мин); рассчитывают в зависимости от значения коэффициента  $\eta_\Phi$ , представляющего соотношение коэффициентов формы водосбора исследуемой реки и реки-аналога:

$$\eta_\Phi = \frac{LA^{0,56}}{L_a A_a^{0,56}} \quad (10)$$

где  $L$  и  $L_a$  — гидрографическая длина водотока для исследуемой реки и реки-аналога соответственно, км;

При  $\eta_\Phi < 1,5$  расчётное значение коэффициента  $\varphi_M$  определяют по формуле:

$$\varphi_M = \left( \frac{A_a}{A} \right)^{n_1} \quad (11)$$

где  $n$  — коэффициент, отражающий редукцию модуля максимального стока с увеличением площади водосбора; определяется по зависимости  $\lg(q_{1\%}) = f[\lg(A)]$ , которая строится по данным изученных рек исследуемого района.

#### **4. Проведение полевых работ**

Первым этапом работы является проведение полевых исследований и морфометрических работ на затопляемой территории. Проведение морфометрических работ необходимо для получения поперечных профилей русла реки, данные которых нужны для расчёта уровней превышения при паводках и половодьях. Также полевые работы проводятся для уточнения данных и получения наиболее полного представления об объекте исследования. Полевые работы включают в себя осмотр местности; опрос местного населения; выявление факторов, оказывающих влияние на пропускную способность русла реки; получение цифровых данных о рельефе на поперечных профилях реки за счёт проведения промеров высот с помощью ГНСС-приёмника.

Выбор участков для исследования с использованием технических средств основывался на имеющихся и полученных от местного населения данных о значимых участках, подвергающихся периодическому подтоплению или затоплению, а также имеющих потенциальное влияние на характер затопления и гидрологический режим. Подробная сводка о каждом участке на основе осмотра и опроса жителей приведена в главе 4.4 данной работы.

На данном этапе документировались важные детали исследуемой территории и использовалось специализированное оборудование для получения точных данных о рельефе. Промеры поперечных профилей реки проводились на пяти участках, помеченных на рисунке 6. Также на третьей точке исследования производились промеры глубины русла и скорости течения. На рисунке 7 приведены фотографии укреплений берега реки (слева) и поля возле реки (справа).

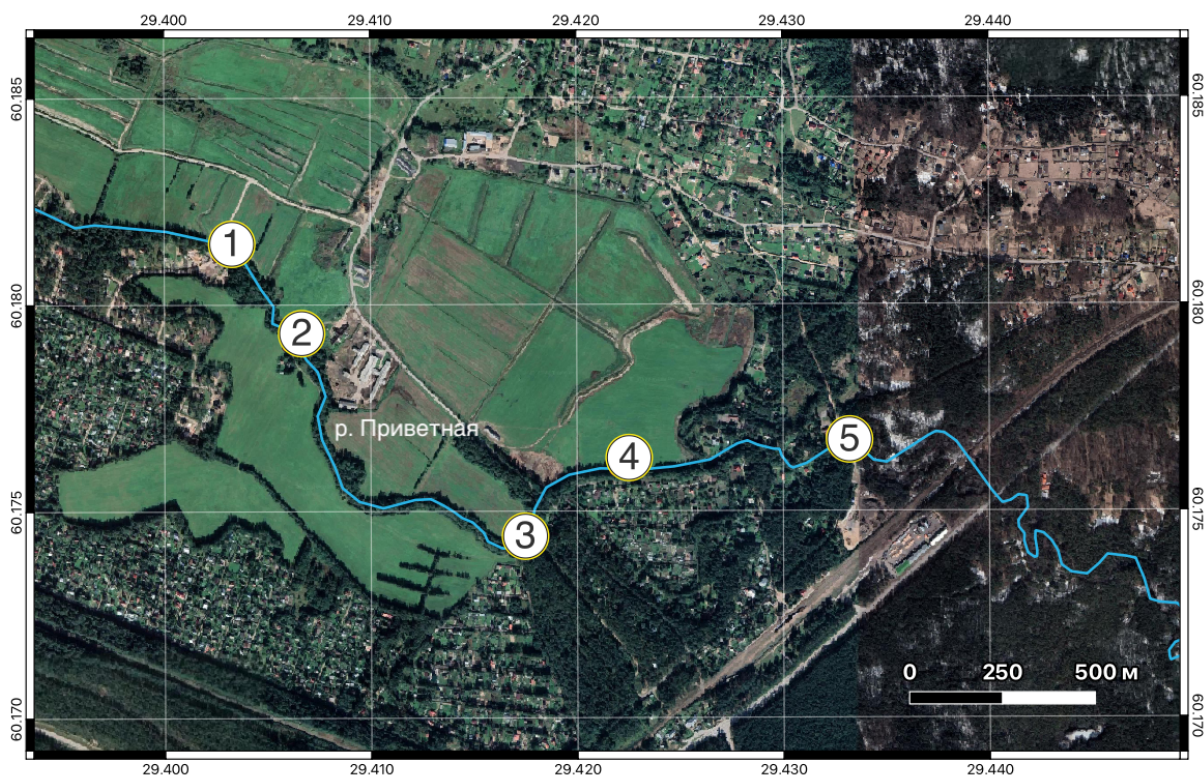


Рис. 6 – Расположение точек промеров поперечных профилей реки.

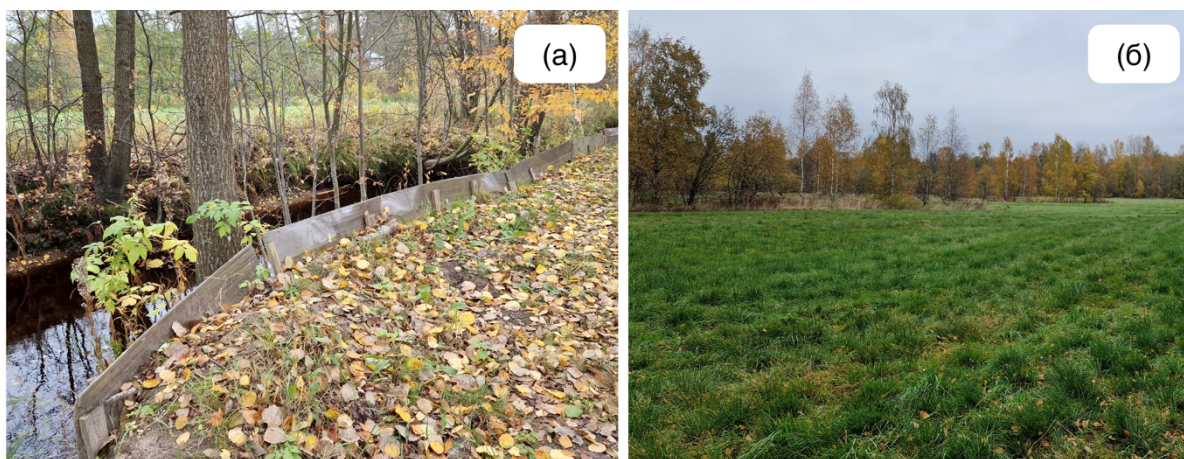


Рис. 7 – Самодельные защитные сооружения (а) и характерный для исследуемой части бассейна равнинный участок (б).

#### 4.1. Организация гидрологических работ

Комплекс гидрологических работ, проводившихся с использованием специального оборудования, включал в себя поперечное профилирование реки путём получения цифровых данных рельефа в исследуемых точках с помощью ГНСС-приёмника методом ГНСС РТК с опорой на базовую станцию Геоспайдер, а также измерения скоростей течения с помощью гидрологической вертушки для последующего расчёта расхода реки.



Общий объём выполненных работ представлен на рис. 8.

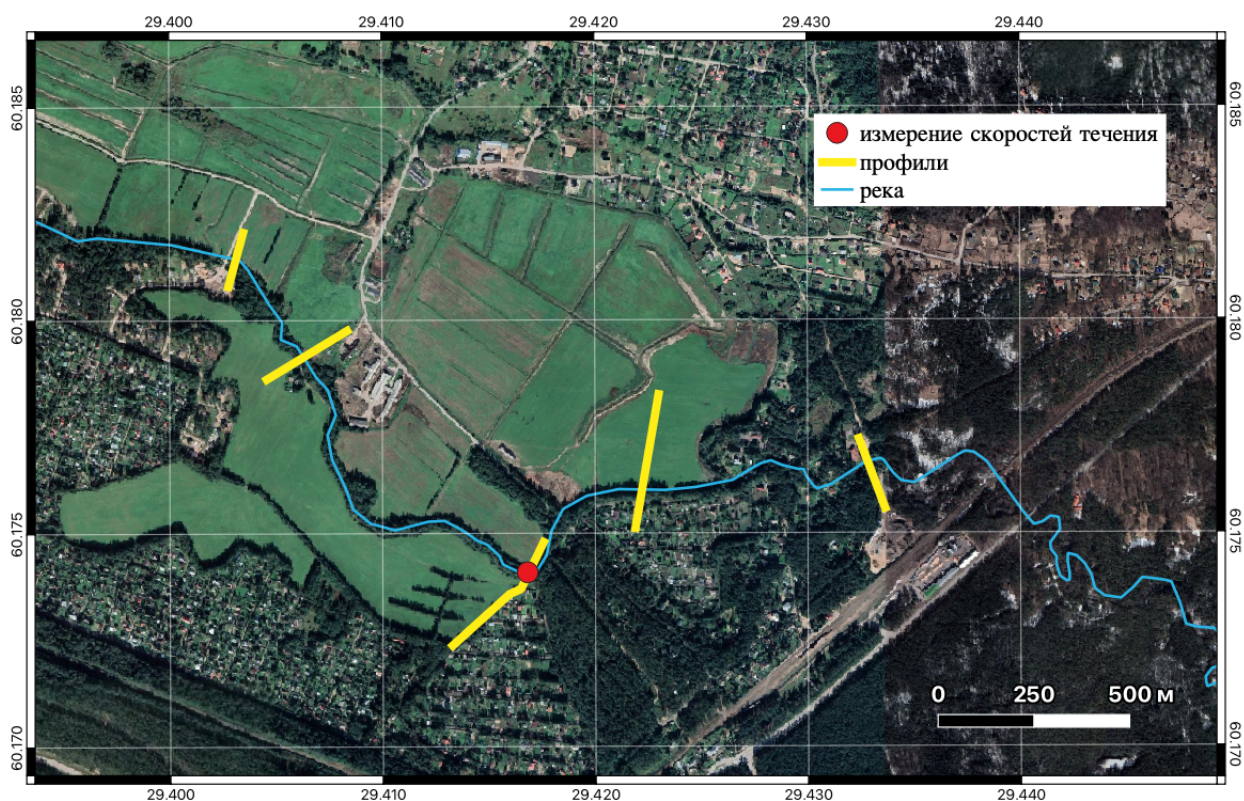


Рис. 8 – Карта-схема расположения проведённых морфометрических исследований.

#### 4.2. Методика профилирования реки

Первоначальный выбор участков реки для профилирования проводится исходя из имеющейся и полученной от местного населения информации об участках подтопления.

Вне зависимости от класса прибора для приёма спутниковых географических координат, ни один спутниковый прибор не способен обеспечить высокую точность позиционирования в одиночном режиме в силу множества факторов, таких как помехи и погрешность измерения. Для обеспечения высокой точности позиционирования используются методы, основанные на определении разности координат двух объектов, один из которых имеет заведомо точные координаты. При этом каждый из объектов должен принимать сигналы от нескольких ГНСС-спутников. Приёмник, расположенный в известной точке, считается опорным и называется базой, а подвижный приёмник, передвигающийся по исследуемым точкам, называется

ровером. За счёт взаимного определения местоположения появляется возможность в реальном времени вносить поправки в координаты, получаемые путём обработки сигналов спутника, за счёт чего достигается сантиметровая точность позиционирования. Данный метод носит название РТК, от английского словосочетания *real-time kinematic*, что означает «кинематика в реальном времени». (Геодезия и строительство, 2019)

В ходе сбора полевых данных для профилирования реки использовался ГНСС-приёмник Trimble R8, закреплённый на вехе с портативным беспроводным контроллером в качестве ровера для доступа к базовым станциям Геоспайдер (ООО "НПП "Геоматик"), которые использовались для получения поправок к спутниковым координатам по методу РТК для достижения максимально возможной точности. В реальных условиях на исследуемой территории оценочная точность получаемых высот составила приблизительно 15 сантиметров.

В процессе работы приёмник подключается к переносному контроллеру, который позволяет в реальном времени наблюдать текущие координаты, а также сохранять их в памяти контроллера для дальнейшей обработки с помощью программного обеспечения на компьютере. Таким образом, проходя по линии профиля, сохраняется приблизительно от десяти до двадцати точек с интервалом приблизительно 10 метров, в зависимости от сложности формы рельефа в конкретном месте. Данные о поперечных профилях реки позволяют произвести необходимые расчёты превышения воды при заданных процентах обеспеченности, визуализировать профили рек для проведения анализа, а также получить более точную цифровую модель рельефа, создаваемую на основе топографических карт.

#### **4.3. Методика расчёта расходов воды**

Для проведения замеров глубины на реке был выбран участок, не имеющий резких перепадов высот, порогов. Затем, по результатам измерения глубин, на месте строился черновой график живого сечения, чтобы задать

скоростные вертикали в точках русла. В связи с небольшой глубиной русла, на каждой вертикали назначался лишь один горизонт измерения, равный 0,6 от глубины в заданной точке.

Для измерения скоростей течения была использована вертушка ИСП–1М, лопастной винт диаметром 70 мм и преобразователь сигналов вертушки ПСВ–1. Для расчёта расхода воды в первую очередь определяется площадь поперечного сечения реки, для чего на каждой вертикали также производится промер глубины водного объекта с помощью водомерной рейки. (Трушевский, и др., 2018) Имеющаяся информация позволяет рассчитать площадь сечения аналитически, представив сечение в виде суммы частных площадей его участков, представленных трапециями и прямоугольными треугольниками, как изображено на рис. 9.

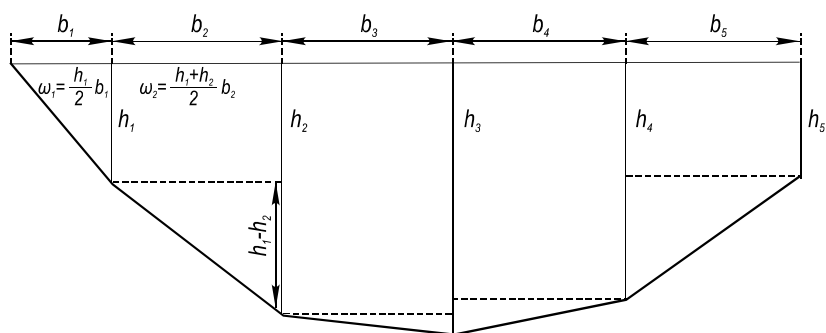


Рис. 9 – Схема вычисления площади водного сечения.

На данном этапе, данные о скоростях течения, полученные в рамках полевых исследований, и вычисленная площадь сечения позволяют провести дальнейшие аналитические расчёты для получения информации о расходах воды.

#### 4.4. Краткая характеристика исследуемой территории

Осмотр местности и опрос местного населения позволил выявить следующие ключевые точки для проведения вышеупомянутых гидрологических работ:

1. Участок был выбран для исследования, т. к. здесь располагается наиболее высокая точка, в которой было зафиксировано подтопление. Этот участок расположен на въезде в СНТ «Новое Приветное». Обычно вода

доходит до моста, максимальная же зафиксированная площадь затопления охватывает территорию сразу за шлагбаумом на въезд. Река на этом участке имеет крутые берега.

2. Опрос жителей на данном участке не проводился, однако участок определённо значим для СНТ, так как здесь расположены коровники, а следовательно, подтопление опасно для скота, который в них содержится. Также в результате осмотра был обнаружен старый брод через реку, вместо которого был построен пешеходный мост.

3. На данном участке расположено затапливаемое поле, расположенное недалеко от жилых участков. Во время осмотра обнаружены бровки, сделанные местными жителями, а также бетонные плиты, расположенные вдоль берега, чтобы ограничить выход воды. На левом берегу расположены жилые участки, а на правом — кладбище. На этом участке полученный профиль имеет Г-образный изгиб из-за расположения вплотную к жилым участкам, вдоль которых и делалось профилирование. Также на этом участке произведены замеры скоростей течения и промеры глубины для расчёта расхода.

4. Наиболее близкий к жилой территории участок. На участке также сделаны отсыпки вдоль реки и другие сооружения, сделанные из различных материалов. По словам местных жителей, принятые ими меры по отгораживанию берега помогают в защите от затоплений, но лишь частично, так как вода приходит в том числе и по земле с верха по течению реки, а не только из её русла.

5. Участок, расположенный в районе ж/д станции «Приветненское». Здесь также расположен старый брод через реку.

#### **4.5. Морфометрические характеристики исследуемой реки**

Проведённый анализ имеющихся сведений и исследований о гидрологической изученности района показал, что территория слабо изучена. Есть некоторые исследования малых рек Ленинградской области, однако они

относятся к другим районам, расположенным по другую сторону Финского залива (Бузмаков, и др., 2016). Это является основанием для углублённого изучения реки Приветной в её текущем состоянии для обеспечения безопасности района, подверженного затоплениям. В рамках полевых работ проводилось профилирование реки и измерение скоростей течения.

С помощью ГНСС-приёмника были получены данные о рельефе исследуемых областей с погрешностью не более 20 сантиметров. Повышение точности создаваемой цифровой модели рельефа необходимо, так как при использовании только топографических карт нет возможности адекватно оценивать затопление и проводить хоть сколько-то точный анализ из-за того, что погрешность данных о рельефе на этих картах превышает разницу наблюдаемых минимального и максимального уровней воды в реке.

Дальнейшая обработка полученных данных производилась в программе QGIS. Также в программе Microsoft Excel были построены графики профилей рельефа и живого сечения реки. Пример графика, построенного для профиля рельефа приведён на рисунке 10. Все построенные графические профили рельефа и живого сечения приведены в приложении 1.

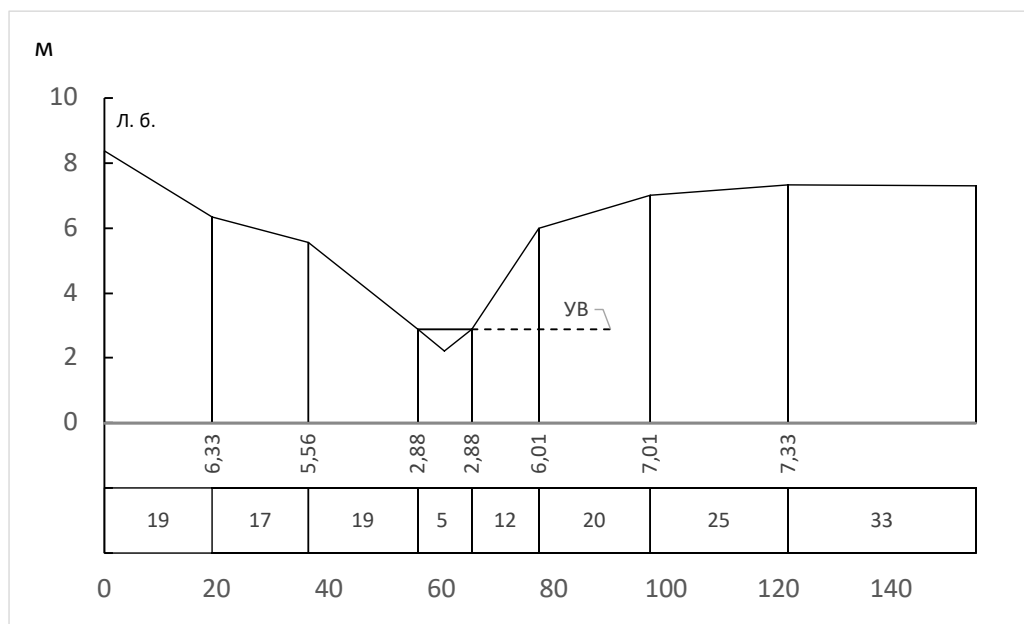


Рис. 10 – Профиль рельефа пятого участка исследования.

Промеры глубины реки и скоростей течения в исследуемой точке осуществлялись следующим образом: через реку была натянута верёвка с



нанесёнными на неё метками с интервалом в один метр; через каждый метр было произведено измерение глубины реки; на основе данных измерений был построен профиль поперечного сечения реки для дальнейшего расчёта площади живого сечения. Результаты произведённых измерений и полученная площадь сечения приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты промеров глубины и расчёт живого сечения реки.

Расстояние вертикали от левого берега, м	Глубина, м	Площадь сечения между промерными точками, м <sup>2</sup>
0	0,35	0,29
0,5	0,80	0,42
1	0,88	0,44
1,5	0,88	0,45
2	0,91	0,43
2,5	0,82	0,40
3	0,76	0,33
3,5	0,56	0,19
4	0,18	0,05
4,5	0	0
<i>w</i> =		2,98 м <sup>2</sup>

Впоследствии на основе этих данных был также построен профиль живого сечения реки, приведённый на рисунке 11.

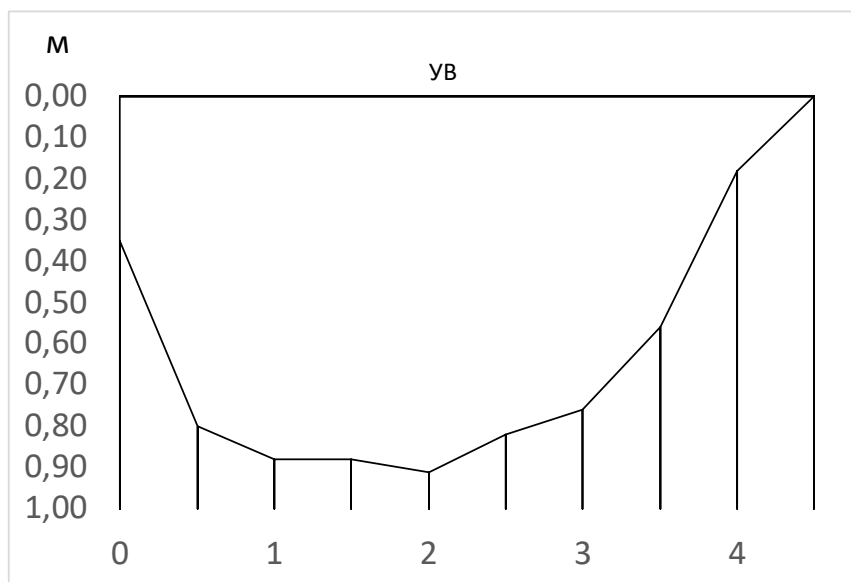


Рис. 11 – Профиль живого сечения реки на третьем участке исследования.

Далее, исходя из соображений оптимальности измерений, были выбраны три вертикали, где производился замер скорости вертушкой. Вертикали выбирались так, чтобы была возможность корректно замерить скорость течения с помощью вертушки и провести несколько измерений на равном или приблизительно равном расстоянии, в том числе измерение на вертикали с максимальной глубиной реки. Были выбраны три промерные точки (вертикали): на расстоянии одного, двух и трёх метров от постоянного начала, совпадающего с левым берегом. Все измерения скорости течения производились на горизонтали 0,6Н. В процессе замеров выяснилось, что в точке на расстоянии в 1 метр от берега находится в так называемом «мёртвом пространстве», в котором отсутствует течение, фиксируемое вертушкой. Показания преобразователя сигналов вертушки для промерных точек на расстоянии 2 и 3 метра от берега, а также расчётный средний расход реки в месте проведения измерений, приведены в таблице 3.

Таблица 3. Показания преобразователя сигналов вертушки.

Расстояние вертикали от левого берега, м	Время, с	Кол-во оборотов	Об/с	м/с

2	60,9	151	2,5	0,32
3	60,2	116	1,92	0,25

На основании данных показаний был произведён расчёт величины расхода воды на исследуемом участке реки. Расчётный расход составил 0,850 м<sup>3</sup>/с.

## **5. Полученные результаты**

### **5.1. Результаты расчёта гидрологических характеристик**

Согласно требованиям свода правил 33.101-2003 («Определение основных расчётных гидрологических характеристик») был произведён поиск рек-аналогов. Для этого были рассмотрены действующие на момент исследования гидрологические водомерные посты в Карельском перешейке. На большинстве малых рек отсутствуют посты гидрологических наблюдений и длинные ряды исторических данных. В связи с этим, не представляется возможным найти реку с достаточным количеством данных гидрологических наблюдений, к тому же имеющую характерные для р. Приветной особенности гидрологического режима в строгом соответствии требованиям свода правил по поиску рек-аналогов. Были использованы наиболее подходящие реки из тех, для которых имеются достаточно длинные ряды гидрологических наблюдений, но характеристики гидрологического режима которых не полностью соответствуют требованиям СП. Выбор рек производился с опорой на такие показатели, как сходство площади и структуры водосбора, сходство уклона водной поверхности с соответствующими характеристиками р. Приветной. Для расчёта статистических показателей, используемых при расчёте обеспеченных расходов воды рек-аналогов применялась программа StokStat, разработанная Юрием Левыкиным специально для проведения гидрологических расчётов в соответствии с СП 33-101-2003. (2020)

Карта-схема водосбора приведена на рисунке 12.

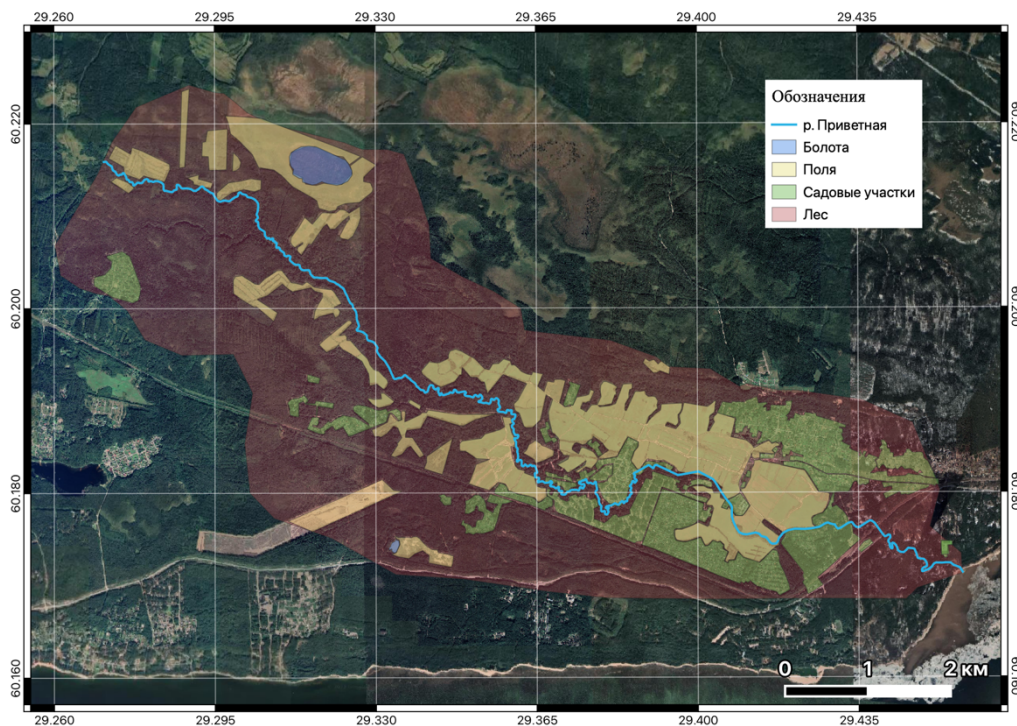


Рис. 12 – Карта-схема водосбора р. Приветной

Основные гидрологические характеристики рек-аналогов и реки Приветной представлены в таблице 4. Расположение выбранных рек-аналогов относительно исследуемой реки показано на рисунке 13.

Таблица 4. Основные гидрологические характеристики рек.

Название реки	A, км <sup>2</sup>	L, км	IP, ‰	IB, ‰	f <sub>оз</sub> , ‰	f <sub>л</sub> , ‰	f <sub>б</sub> , ‰
Приветная	70	22	1,14	3,18	0	87	1
Петровка	78	7	1,16	28,8	2	74	1
Авлога	89,1	20	2,24	12,4	2	70	2

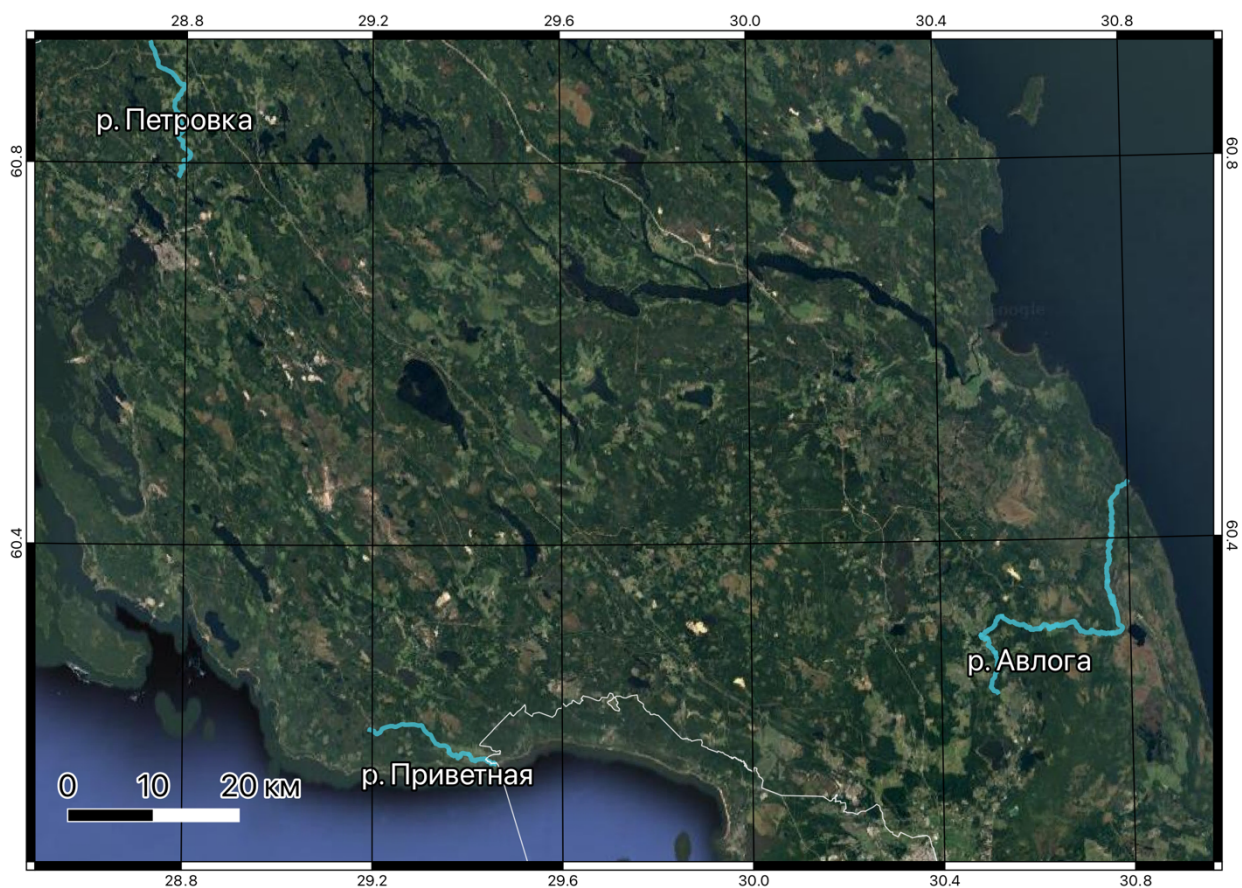


Рис. 13 – Расположение рек-аналогов и реки Приветной.

Учитывая, что расчётная река и реки-аналоги расположены в пределах относительно небольшой территории, статистические характеристики определены путём усреднения таковых по рекам-аналогам. Результаты расчёта представлены в таблице 5.

Таблица 5. Основные статистические характеристики рядов слоя весеннего половодья рек-аналогов.

Река - пост	$C_v$	$C_s$	$C_s/C_v$	$k_{1\%}$	$k_{5\%}$	$h_0$ , мм	$h_{1\%}$ , мм	$h_{5\%}$ , мм
Петровка - пос. Дружноселье	0,41	0,673	1,6	2,116	1,72	140	296	241
Авлога - д. Матокса	0,44	0,858	2	2,16	1,74	140	302	243
Среднее =							299	242

Расчётное значение коэффициента  $K_0$  было определено как среднее по двум рекам-аналогам. Для каждого аналога значение  $K_0$  определялось обратным путём по формуле (3). Результаты расчёта представлены в таблице 6.

Таблица 6. Расчёт коэффициента  $K_0$

Река - пост	$A, \text{ км}^2$	$h_{1\%}, \text{ мм}$	$Q_{1\%}, \text{ м}^3/\text{с}$	$\delta$	$\delta_1$	$\delta_2$	$K_{1\%}$
Петровка - пос. Дружноселье	78	292	13,21	0,83	0,387	1	0,0039
Авлога - д. Матокса	89,1	302	20,76	0,83	0,391	1	0,0053
Среднее $K_0 =$							0,0046

Таблица 7. Расчёт максимальных расходов воды весеннего половодья заданной вероятности  $p$ . Приветной

$P, \%$	$A, \text{ км}^2$	$h_p, \text{ мм}$	$\delta$	$\delta_1$	$\delta_2$	$K_0$	$A$	$\mu$	$n$	$Q_{\text{max},p}, \text{ м}^3/\text{с}$
1	70	299	0,8	0,390	1	0,0046	1	1	0,17	14,42
5	70	242	0,8	0,390	1	0,0047	1	0,96	0,17	11,61

Таблица 8. Расчёт максимальных расходов воды дождевого паводка заданной вероятности  $p$ . Приветной

$P, \%$	$A, \text{ км}^2$	$\delta$	$\delta_2$	$q_{P\%,a}$	$n$	$Q_{\text{max},p}, \text{ м}^3/\text{с}$
1	70	0,8	1	0,17	0,22	12,88
5	70	0,8	1	0,14	0,22	9,36

Был произведён расчёт максимальных расходов весеннего половодья р. Приветной для 1% и 5% обеспеченности. Максимальный расход составил 14,42 м<sup>3</sup>/с для 1% обеспеченности и 11,61 м<sup>3</sup>/с для 5%.

Также был произведён расчёт максимальных расходов для дождевых паводков. Для 1% обеспеченности расход составил 12,88 м<sup>3</sup>/с, для 5% обеспеченности расход составил 9,36 м<sup>3</sup>/с.

Показатели, по которым производились расчёты, указаны в таблицах 6, 7 и 8.

В ходе работы были рассчитаны максимальные расходы весеннего половодья и дождевого паводка при 1% и 5% обеспеченности для р. Приветной. В результате проведения морфометрических работ получены цифровые данные о поперечных профилях реки в исследуемых участках, а также построена цифровая модель рельефа исследуемой территории. На основе полученных данных были рассчитаны максимальные уровни воды при затоплениях 1% и 5% обеспеченности весеннего половодья и дождевого паводка. Полученные значения приведены в таблице 9.

Таблица 9. Результаты расчёта максимальных расходов воды и уровня высших вод заданной вероятности для р. Приветной

P, %	Весеннего половодья		Дождевых паводков	
	$Q_{max}$ , м <sup>3</sup> /с	$H_{max}$ , м БС	$Q_{max}$ , м <sup>3</sup> /с	$H_{max}$ , м БС
1	14,42	5,34	12,88	5,3
5	11,61	5,26	9,36	5,17

## 5.2. Построение границ зоны затопления

В качестве основы для построения цифровой модели зоны затопления исследуемого участка были взяты архивные топографические карты, которые были оцифрованы в программе QGIS, а затем дополнены более точными данными в местах исследования поперечных профилей реки за счёт данных, полученных в ходе полевых работ. Полученная цифровая модель рельефа, была использована для расчёта модели превышения уровней в точках урез



воды, в результате чего была построена графическая схема зоны затопления территории.

Данная цифровая модель рельефа была уточнена в местах исследования профилей реки данными, полученными в ходе проведения полевых исследований. Были построены карты-схемы границ зон затопления при 1% и 5% обеспеченности весеннего половодья и дождевого паводка, на них были нанесены отметки затопленных жилых и коммерческих зданий.

С использованием созданной цифровой модели рельефа и полученных значений уровней высших вод были определены границы зоны затопления пос. Приветнинское при заданных процентах обеспеченности весеннего половодья и дождевого паводка, подсчитаны затопливаемые жилые и хозяйственные постройки. Карты-схемы полученных расчётных зон затоплений при весеннем половодье с заданной обеспеченностью в 1% и 5% изображены на рисунках 14 и 15 соответственно, при дождевом паводке с заданной обеспеченностью 1% и 5% — на рисунках 16 и 17 соответственно.

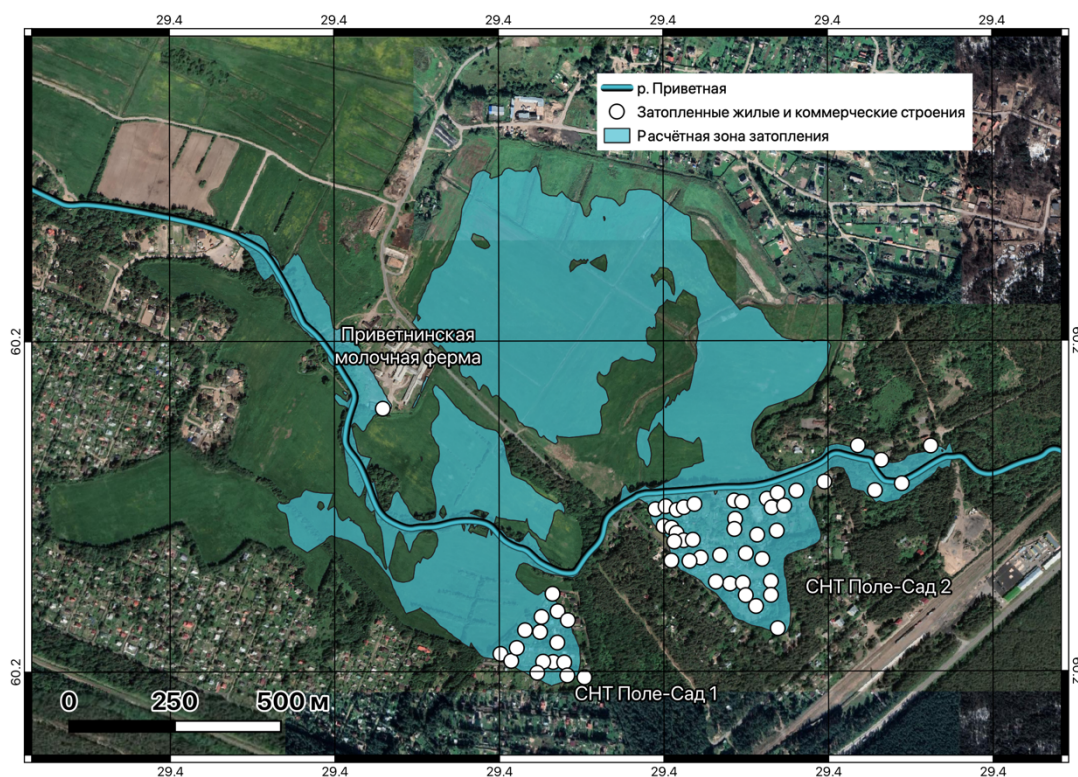


Рис. 14 – расчётная зона затопления весеннего половодья при 1% обеспеченности



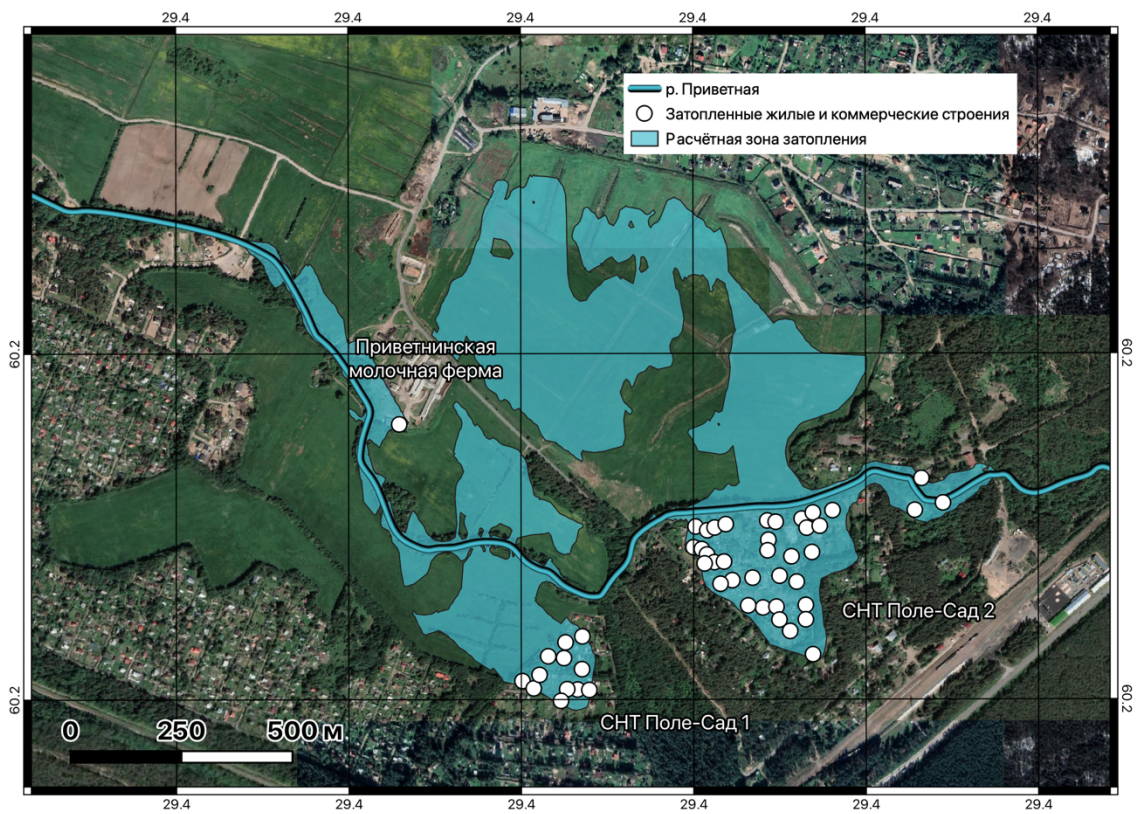


Рис. 15 – Расчётная зона затопления весеннего половодья при 5%  
обеспеченности

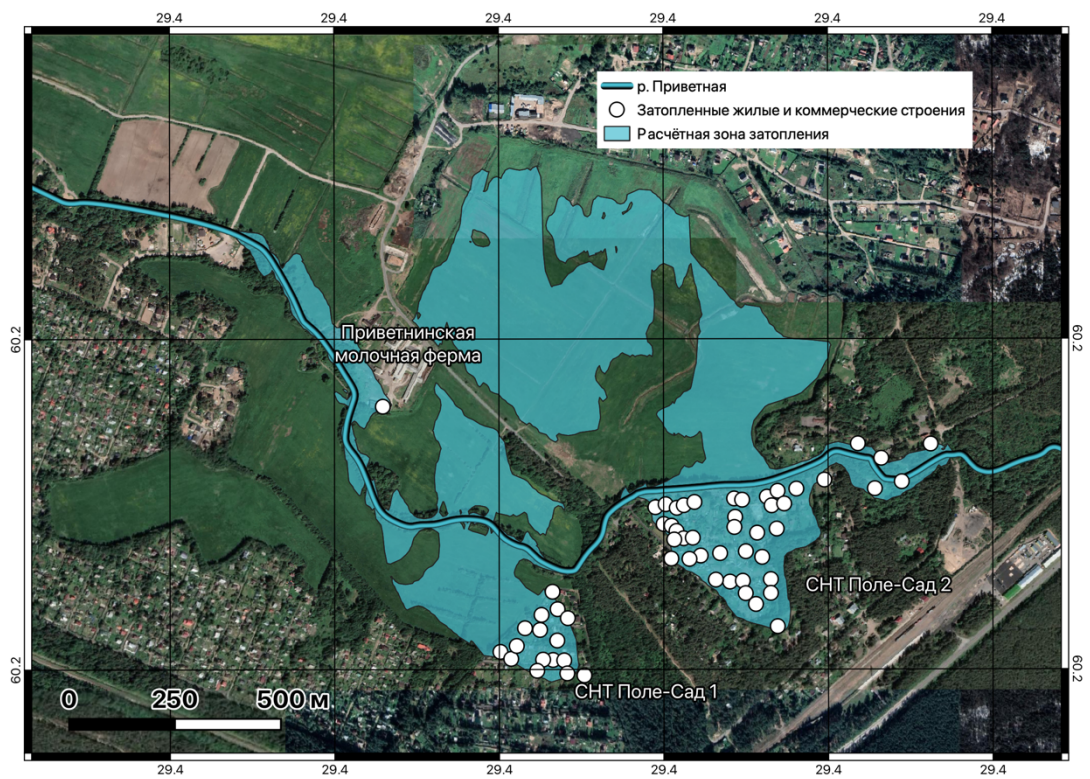


Рис. 16 – расчётная зона затопления дождевого паводка при 1%  
обеспеченности



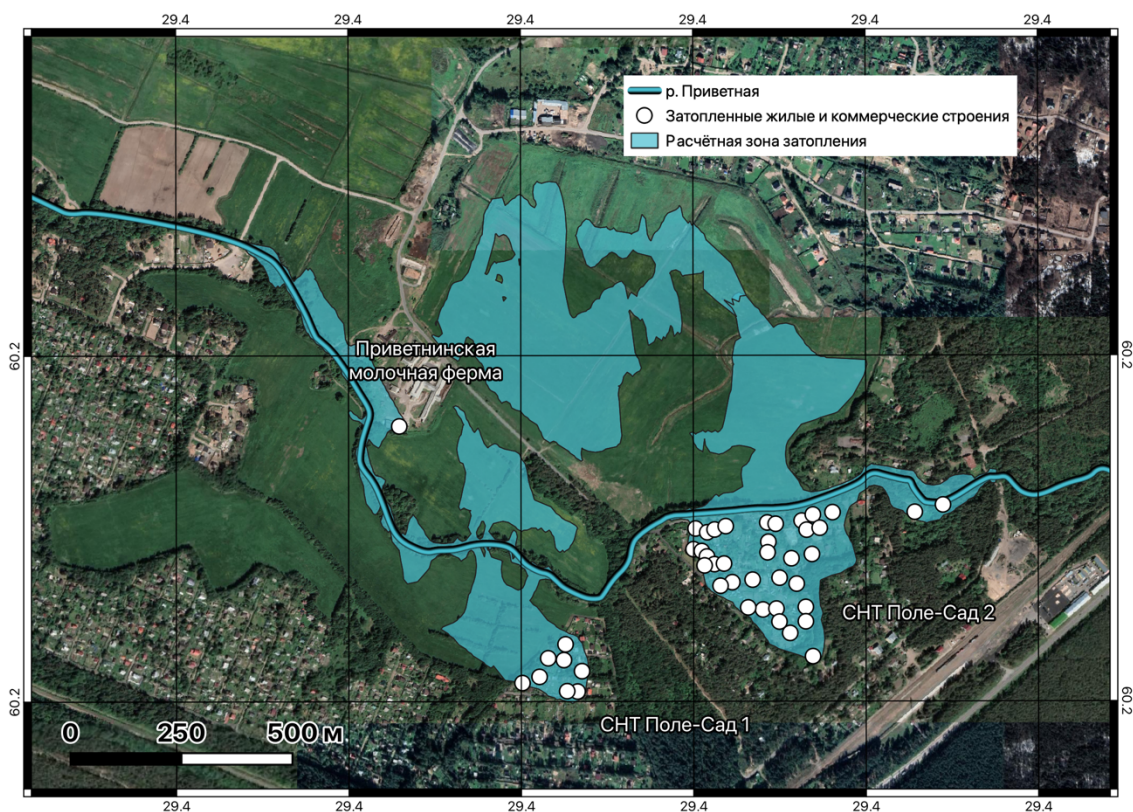


Рис. 17 – Расчётная зона затопления дождевого паводка при 5% обеспеченности

Расчётная зона затопления охватывает область площадью 0,72 км<sup>2</sup>. В зоне затопления находится более 60 частных жилых строений с садовыми участками, а также территория и строения приветнинской молочной фермы.

Фактический уровень высших вод, полученный из опросов местных жителей в ходе рекогносцировочных мероприятий, совпал с расчётным уровнем воды при 5% обеспеченности для данной точки, что позволяет судить о надёжности расчёта на данном участке.

В целях создания дополнительного методического обеспечения также был произведён расчёт значений коэффициента дружности половодья для бассейнов других малых рек Ленинградской области. После получения искомым значений с разбивкой по бассейнам была создана карта-схема, показывающая пространственное распределение значений данного коэффициента. Для этого в программе QGIS были выделены границы речных бассейнов, найдены их геометрические центры и произведена интерполяция значений коэффициента  $K_0$  методом обратно-взвешенных расстояний исходя

из известных значений в центральных точках бассейнов. На основе полученных данных о распределении значений коэффициента были созданы изолинии. Полученная карта-схема, созданная по результатам расчётов, приведена на рисунке 18.

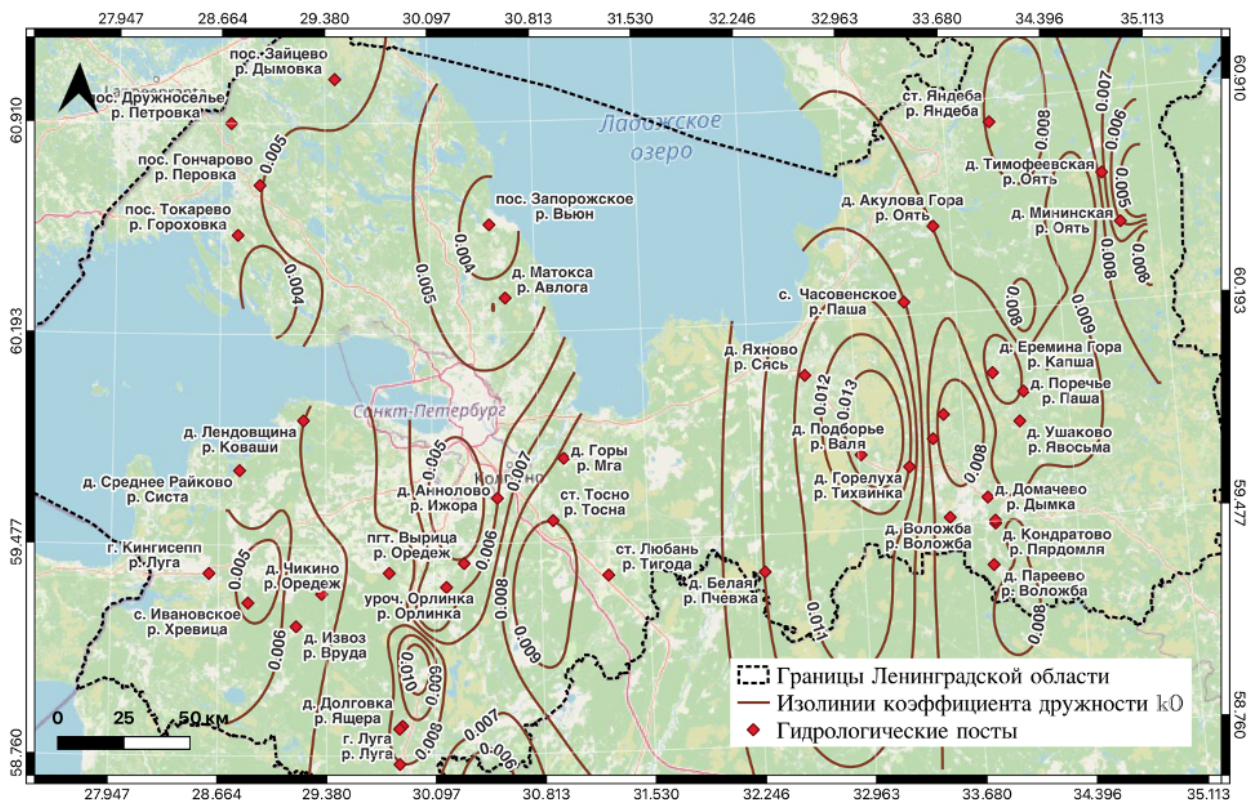


Рис. 18 – Карта-схема изолиний коэффициента  $K_0$ , характеризующего дружность половодья.

## **6. Анализ факторов формирования наводнений на малых реках Карельского перешейка**

В процессе анализа полученных результатов было выдвинуто несколько гипотез о возможных факторах формирования наводнений.

Была выдвинута гипотеза о возможности предотвращения будущих затоплений территории пос. Приветнинское за счёт искусственного углубления русла р. Приветной. Для того чтобы подтвердить или опровергнуть данную гипотезу, были проведены дополнительные расчёты. Для проведения расчётов была использована модель поперечного профиля реки, где все точки рельефа, находящиеся в пределах русла реки, были опущены на 1 метр. Результаты расчёта уровня высших вод для 1% обеспеченности показал, что дноуглубление на 1 метр окажет лишь незначительное влияние на уровень высших вод при затоплении. Так, при 1% обеспеченности в период весеннего половодья расчётный уровень высших вод составляет 5,34 м БС при фактической форме русла, а при углублении русла расчётный уровень составит 5,30 м БС — всего на три сантиметра меньше. Данный расчёт показал, что при имеющейся форме поймы реки дноуглубление русла не оказывает значительного влияния на пропускную способность в сравнении с расходами воды при затоплении.

Также была выдвинута гипотеза, что структурные изменения водосбора оказывают значительное влияние на водный режим малых рек. Для этого была произведена оценка структуры водосборов реки Приветной и её рек-аналогов: Авлоги и Петровки.

Основываясь на спутниковых снимках, полученных из открытых источников, таких как «Sentinel» и сайт геологической службы США (снимки, полученные со спутника Landsat 7), была оценена структура водосборов исследуемых рек. Для этого спутниковые снимки были загружены в программу QGIS, где каждый элемент структуры водосбора вручную выделялся в виде, а затем была рассчитана общая площадь полигонов по их типам, что позволило оценить площади структурных элементов и их



соотношения. Для анализа использовались снимки за разные временные периоды, а именно за 2001, 2015 и 2022 гг. Структурная схема водосбора реки Приветной по состоянию на 2021 г. приведена на рис. 19. На рис. 20 изображена динамика изменений структуры водосбора р. Приветной с 2001 по 2021 гг.

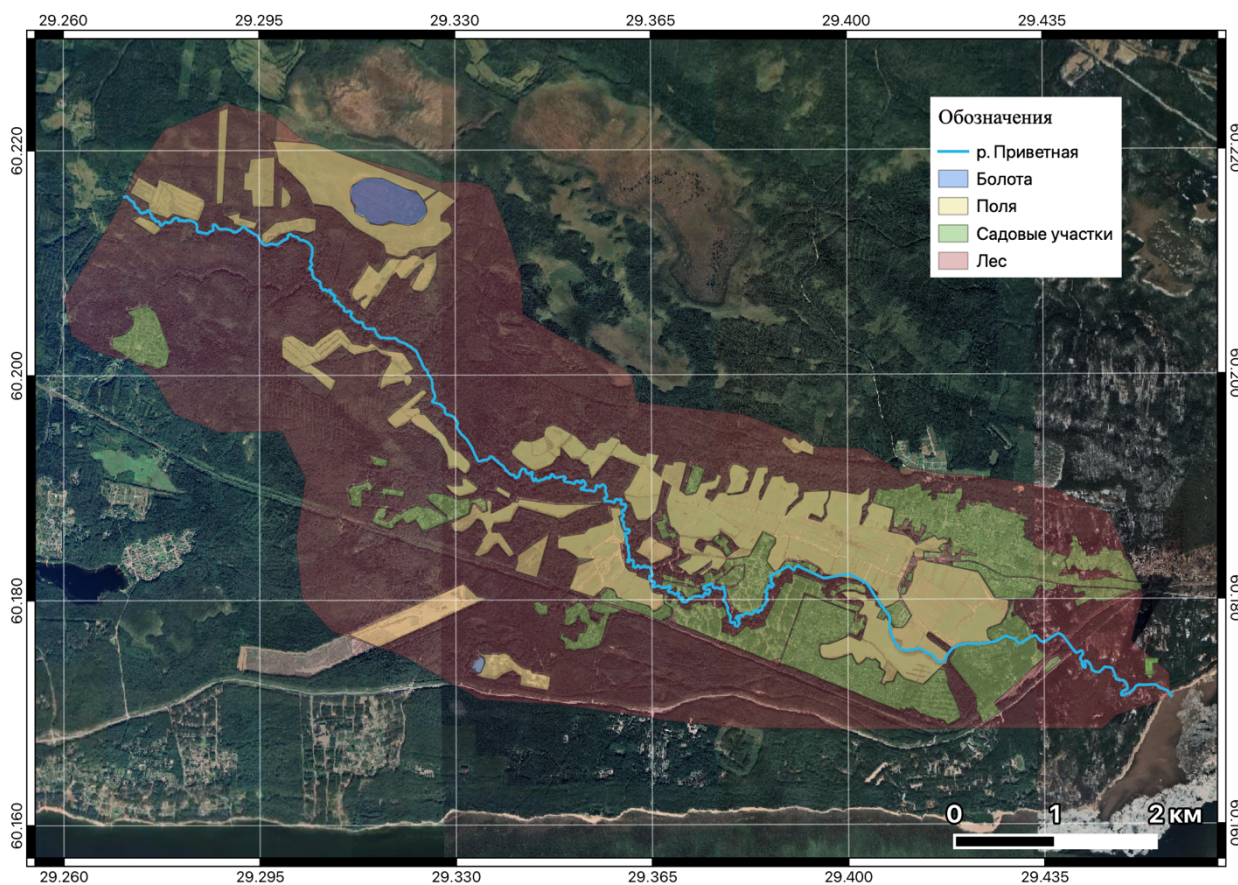


Рис. 19 – Карта-схема водосбора р. Приветной в 2021 году.

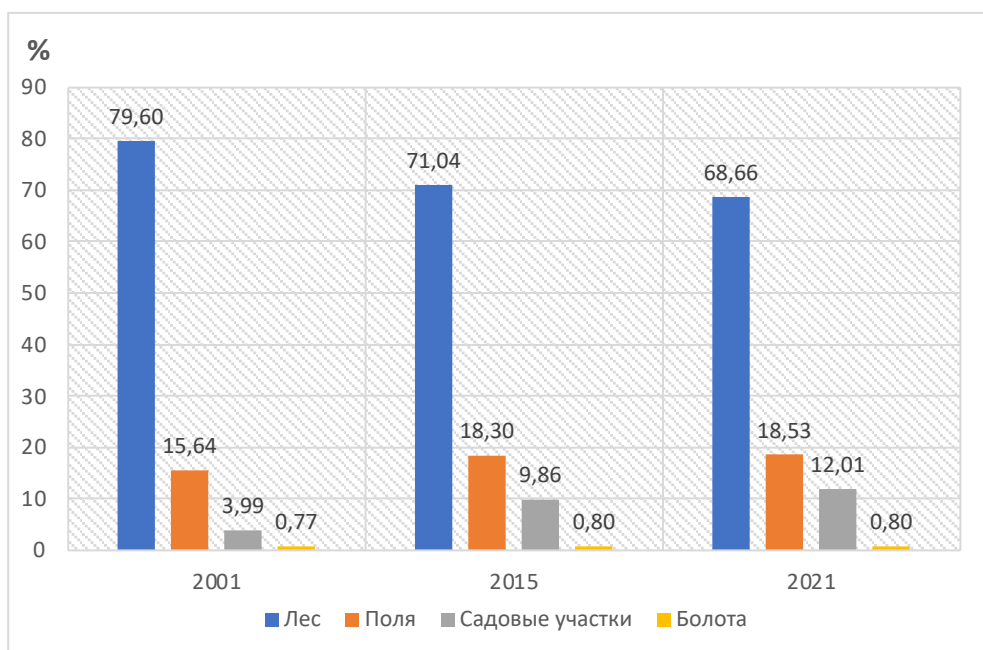


Рис. 20 – Динамика изменения структуры водосбора р. Приветной.

На графике динамики изменений структуры водосбора р. Приветной можно отметить снижение площади лесных территорий в пользу строящихся садовых участков. Ситуация отличается для других рек: на р. Авлоге можно отметить, что процент залесённости не изменяется, а доля садовых участков увеличивается за счёт территорий, ранее занимаемых полями. График динамики структурных изменений р. Авлоги приведён на рис. 21.

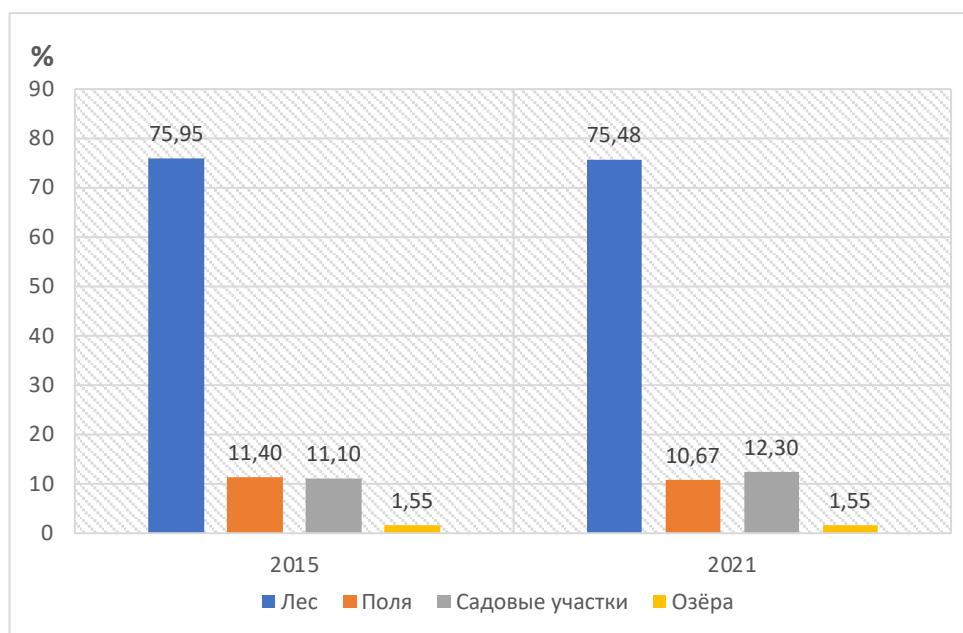


Рис. 21 – Динамика изменения структуры водосбора р. Авлоги.

На реке Петровке наблюдается значительное снижение площади лесных территорий в пользу засаженных полей. Однако, вырубаются в основном кустарники, а анализ кривой среднемноголетних расходов показал меньшее снижение стока в сравнении с р. Авлогой. Предположительно, этому способствует удержание воды растениями, выращиваемыми на полях. График динамики структурных изменений р. Петровки приведён на рис. 22.

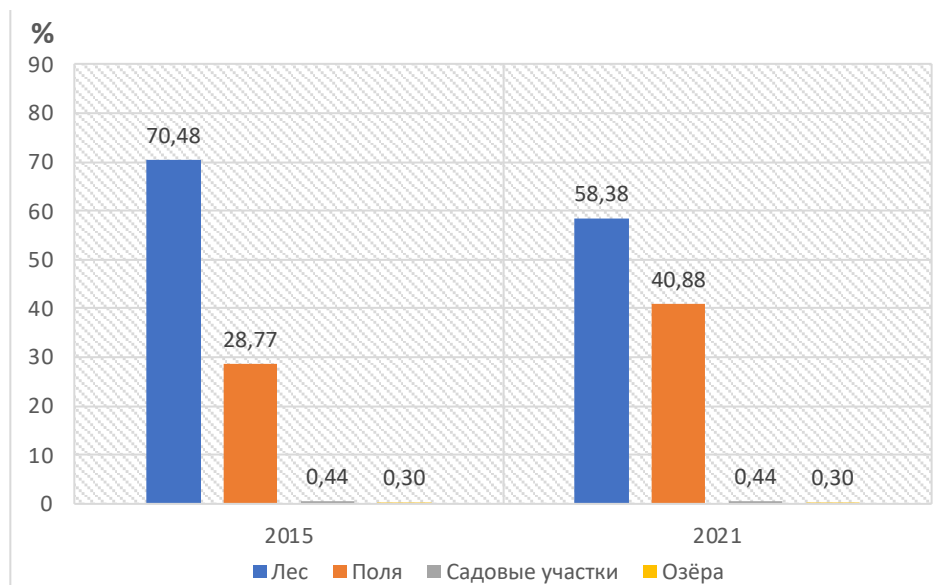


Рис. 22 – Динамика изменения структуры водосбора р. Петровки.

Далее была построена кривая многолетних расходов рек-аналогов в мае (т. к. на май приходится период половодья данных рек), после чего проанализирована статистическая значимость изменений расхода при помощи критериев Стьюдента-Фишера. В данных о расходах рек-аналогов не было обнаружено статистически значимых изменений, которые можно было бы отнести к структурным изменениям водосбора для дальнейшего анализа.

Суммарные интегральные кривые максимальных многолетних расходов рек Авлоги и Петровки приведены на рисунках 23 и 24. Оранжевой линией на графиках обозначены приблизительные линии тренда до перелома характеристики, экстраполированные на весь период наблюдений. Они проведены на графике для того, чтобы эмпирическим путём (визуально) определить момент изменения в гидрологическом режиме реки, за которым следует рост или падение рассматриваемой характеристики.



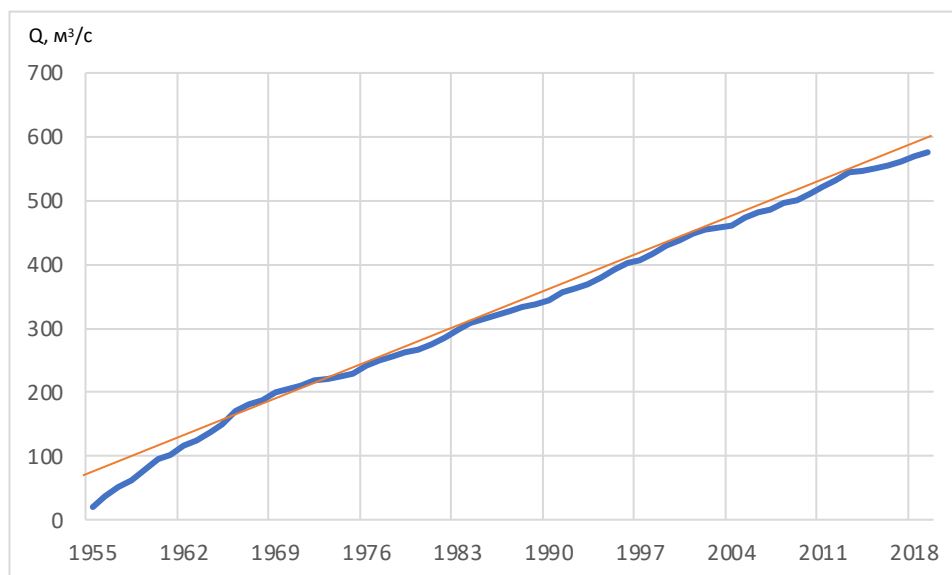


Рис. 23 – Суммарная интегральная кривая максимальных многолетних расходов р. Петровки

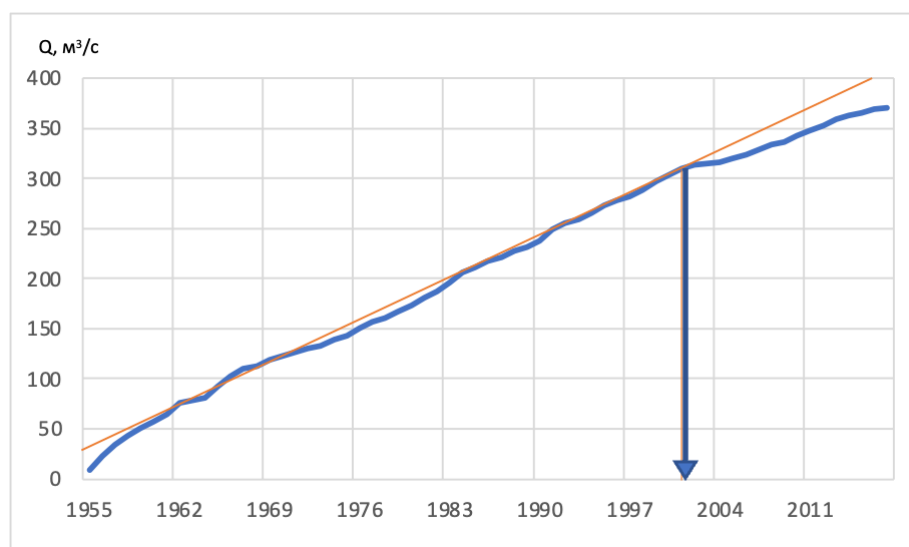


Рис. 24 – Суммарная интегральная кривая максимальных многолетних расходов р. Авлоги

На графиках можно наблюдать суммарные расходы за период наблюдений. Видно, что на р. Петровке не происходило заметных изменений расхода, которые можно было бы связать с изменениями в структуре водосбора. На р. Авлоге наблюдается снижение расходов начиная с 2000-х лет. Данный тренд был рассмотрен с точки зрения его значимости, однако по результатам анализа выяснилось, что тренд не является статистически значимым. Корреляция со структурными изменениями водосбора реки также не были выявлены (однако, не удалось найти источники данных для

определения структуры водосбора за тот период, в который произошло изменение).

В ходе проведения полевых работ производился осмотр русла, который показал, что русло реки местами замусорено, в особенности на отдельных узких участках под мостами. Для того чтобы определить степень влияния замусоренности русла на формирование наводнений на р. Приветной, были проведены расчёты уровней высших вод весеннего половодья для 1% обеспеченности с использованием разных значений коэффициента шероховатости русла. Полученные результаты представлены в таблице 10.

Таблица 10. Зависимость расчётного уровня высших вод от коэффициента шероховатости русла

Коэффициент шероховатости русла	Расчётный уровень высших вод, м БС
0,050	5,34
0,040	4,45
0,025	4,12

Из результатов данных расчётов следует, что изменение коэффициента шероховатости русла, зависящего в свою очередь от степени замусоренности русла и неровностями дна, имеет значительное влияние на уровень высших вод в период весеннего половодья с повторяемостью один раз в 100 лет: при снижении коэффициента шероховатости русла с 0,05 до 0,04 (что соответствует изменению характеристики с «значительно засорённые русла» на «сравнительно чистые русла» согласно своду правил), расчётный уровень высших вод снижается на 89 сантиметров.

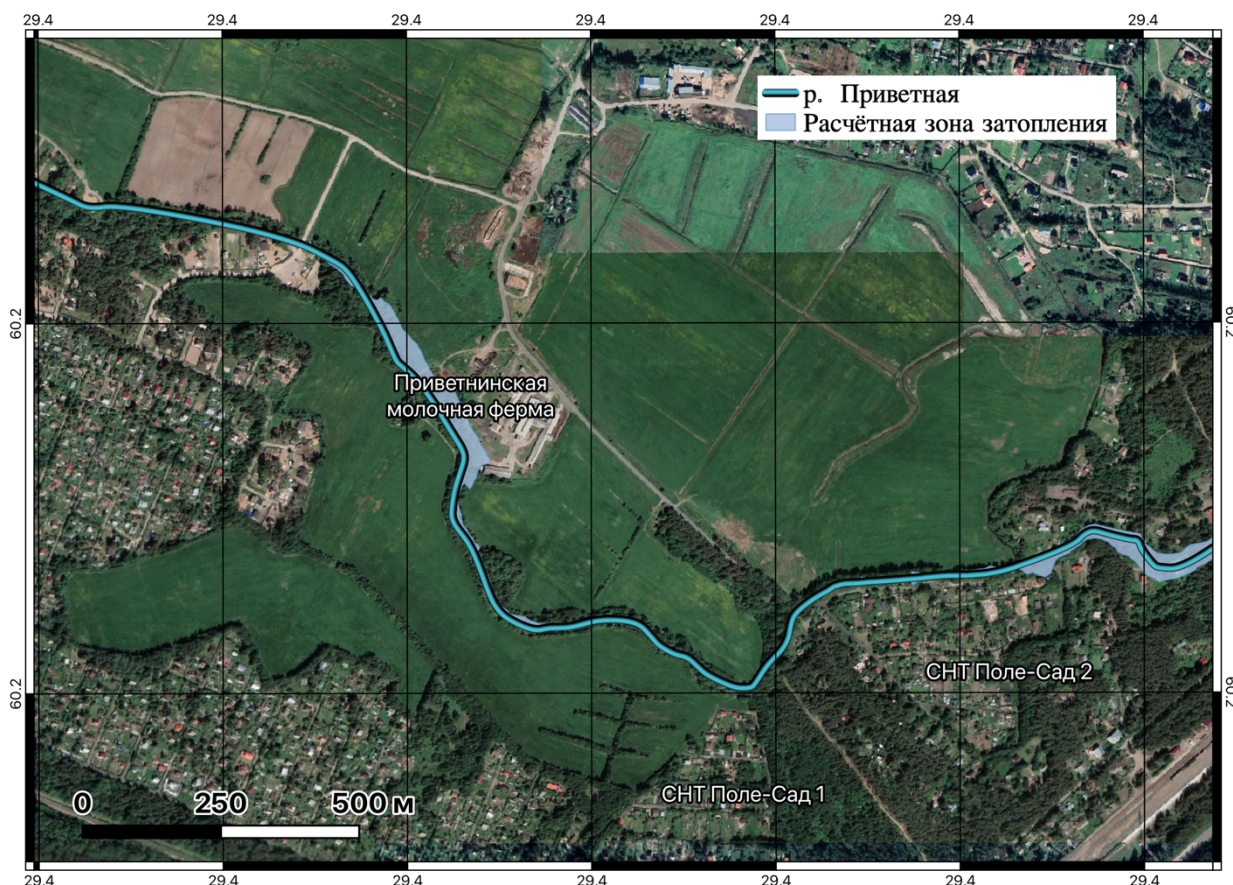


Рис. 25. Расчётная зона затопления при уровне высших вод равном 4,45 м БС.

Также были определены границы зоны затопления при полученном уровне высших вод в случае с сравнительно чистым руслом реки (при коэффициенте шероховатости равном 0,04). Как показывает рисунок 25, в таком случае в зону затопления не попадает ни одно жилое строение.

Стоит отметить, что влияние замусоренности русла малых рек, равно как и иное антропогенное влияние, отмечается в других работах как основной фактор наводнений на малых реках, в том числе работа Маркова М. Л. о наводнениях в г. Тосно (Гуревич, и др., 2018), упомянутая в обзоре существующих исследований.

Таким образом, на основании рассмотренных гипотез о влиянии различных факторов на формирование наводнений, можно сделать вывод о том, что наибольшее значение в случае с р. Приветной оказывает антропогенное влияние, в частности замусоренность русла. При этом не было обнаружено значительных изменений в формировании наводнений в

зависимости от изменений структуры водосбора или при гипотетическом искусственном увеличении площади сечения русла путём дноуглубления.

## Заключение

В ходе выполнения данной работы был произведён обзор имеющихся исследований, были рассмотрены вопросы определения границ зон затопления на территории пос. Приветнинское, проведены расчёты гидрологических характеристик р. Приветная, произведено создание дополнительного методического обеспечения для дальнейших расчётов, связанных с исследованием наводнений на малых реках Ленинградской области путём расчёта коэффициента дружности половодья для других малых рек области, а также проведён анализ факторов формирования наводнений на малых реках Карельского перешейка.

Среди факторов формирования наводнений, выявленных на р. Приветной в ходе рекогносцировочных мероприятий и анализа геоинформационных материалов в ГИС можно отметить особенности рельефа местности и узкое русло реки, подверженное замусориванию. Исследованный участок отличается наличием пойменных лугов, что подтверждается присутствием крупных затопленных полей в расчётной зоне затопления. Также затоплениям в результате паводков способствует высокая терраса, из-за наличия которой осадки скапливаются в пойме, в которой находится жилая застройка. В пределах исследованного участка р. Приветная имеет пойму простой формы, уклон водной поверхности реки на протяжении данного участка незначительный. Были проанализированы такие факторы, как глубина русла, недостаточная для пропуска вод половодья, влияние изменений структуры водосбора и степень замусоренности русла реки и неровностей его дна. Результатом анализа стал вывод о том, что решающее значение в формировании наводнения имеет замусоривание русла вследствие антропогенного влияния.

Для того, чтобы полноценно оценить возможные факторы затоплений на малых реках Ленинградской области в целом, необходимо дополнительно провести анализ динамики изменений структуры водосборов других рек, а также рассмотреть другие потенциальные факторы, такие как

метеорологический режим районов исследования. Во время исследования было выявлено, что сток малых рек зачастую сильно зависит от различных стокоформирующих факторов: характер рельефа, заболоченность местности и антропогенное влияние. В связи с этим, при изучении факторов наводнений, необходим индивидуальный подход при изучении каждого водотока. При наличии собранной во время индивидуального исследования разных рек области экспертизы станет возможным типизация и определение основных категорий факторов формирования наводнений, а также выделение закономерностей их проявления.

## Список литературы

1. Жигулина Е.В. Рекреация и туризм в регионе: современные проблемы развития, территориальной организации и управления // Рекреационные особенности ландшафтов бассейнов малых рек Воронежской области. Воронеж. 2010. С. 222-225.
2. Аборнев В.С. Противопаводковые мелиоративные мероприятия в бассейнах малых степных рек. 2013.
3. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1965.
4. В Выборгском районе области вышла из берегов река. Затоплены десятки домов. // Телеканал Санкт-Петербург. 2014. URL: <https://tvspb.ru/news/2014/08/28/v-vyiborgskom-rajone-oblasti-vyishla-iz-beregov-reka-zatoplenyi-desyatki-domov/> (дата обращения: 09.08.2022).
5. Комитет градостроительной политики Ленинградской области. Материалы по обоснованию схемы территориального планирования Ленинградской области в области транспорта (железнодорожного, водного, воздушного), автомобильных дорог регионального или межмуниципального значения, Ленинградская область, 2020.
6. Шандроха А.Н., Боголюбова А.А. К вопросу актуальности использования сведений о границах зон затопления в кадастровой оценке земель населенных пунктов в Ленинградской области // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия. Комсомольск-на-Амуре. 2018. С. 202–206.
7. Бузмаков С.В., Гуревич Е.В., Журавлёв С.А., Курочкина Л.С., Марков М.Л. Практические аспекты определения зон затопления по опыту исследования рек Ленинградской области, Т. 8, 2016.
8. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Схема комплексного использования и охраны водных объектов (СКИОВО) бассейна реки Нева. Т. 2. СПб. 2010.

9. Невско-Ладожское бассейновое водное управление. Разработка проекта СКИОВО, включая НДС, рек и озёр бассейна Финского залива (от границы Российской Федерации с Финляндией до северной границы бассейна реки Нева). СПб. 2013.

10. Опасные гидрологические явления на территории ЛО // ФГБУ "Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды". 2008. URL: <http://www.meteo.nw.ru/articles/index.php?id=389> (дата обращения: 02.02.2023).

11. Гуревич Е.В., Марков М.Л. Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития // Природные и антропогенные факторы формирования наводнений в г. Тосно. СПб. 2018.

12. Государственный Гидрологический Институт. Первое информационное письмо. II Всероссийское совещание на тему "Вопросы рассмотрения и согласования проектов определения границ зон затопления и подтопления". СПб. 2019.

13. Терский П.Н., Фатхи М.О., Цыпленков С., Землянов И.В., Горелиц О.В., Павловский А.Е. Определение границ зон затопления рек города Москвы, Т. 03, 2017.

14. ГГИ. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб: Нестор-История, 2009.

15. Косицкий А.Г. Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации // Перспективы повышения точности оценок гидрологических характеристик неизученных рек при проведении инженерных изысканий. М. 2019.

16. Немчинов Е.О. Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития // Расчёт максимального стока неизученных рек юга Сибири в период весеннего половодья. СПб. С. 482–484.



17. ВСЕГЕИ. Физическая карта // Учебный географический атлас Ленинградской области и Санкт-Петербурга. СПб. 1997. 4–5 с.
18. Комитет по природным ресурсам Ленинградской области. Состояние окружающей среды в Ленинградской области. СПб. 2019.
19. Даринский А.В. География Ленинградской области. СПб.: Глагол, 2012.
20. Приветная (река) — справка // Справочник водных ресурсов. URL: <https://waterresources.ru/reki/privetnaya-reka/> (дата обращения: 04.07.2022).
21. Дмитренко В.В. Резюме плана лесопользования ООО «Конгломерант» в Выборгском районе Ленинградской области. Приморск. 2016.
22. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь. Издание второе переработанное и дополненное. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1970.
23. Госстрой России. Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. Издание официальное. М. 2004.
24. Вуглинский В.С., Журавлёв С.А., Трушевский В.Л. Методические указания к практикуму по воднобалансовым расчётам. СПб.: С.-Петербург. ун-та., 2012.
25. Свод правил СП 33-101-2003. Определение основных расчётных гидрологических характеристик. Издание официальное. М.: Госстрой России, 2004.
26. РТК – режим для GNSS-оборудования. Всё, о чём вы не постеснялись спросить! — Полезные статьи ГИС // Геодезия и строительство. URL: <https://gis2000.ru/articles/rtk-rezhim-dlya-gnss-oborudovaniya.html> (дата обращения: 02.10.2022).
27. Уникальная спутниковая сеть дифференциальных (базовых / опорных / референцных) геодезических станций - "ГЕОСПАЙДЕР"!

[Электронный ресурс] // Геоспайдер: [сайт]. URL: <http://geospider.ru/> (дата обращения: 04.03.2022).

28. Трушевский В.Л., Паршина Т.В. Учебно-методический комплекс «Специальная учебная практика по гидрологии суши». СПб.: ИНОЗ, 2018.

29. Каталог программного обеспечения : Гидрология // GeoDigital. 2020. URL: [https://www.geodigital.ru/soft\\_hydr](https://www.geodigital.ru/soft_hydr) (дата обращения: 08.02.2022).

30. // Публичная кадастровая карта: [сайт]. [2023]. URL: <https://pkk.rosreestr.ru/> (дата обращения: 2023.01.07).

31. Бельдиман И.Н. Оценка погрешности расчётов максимального стока малых рек // Гидросфера. Опасные процессы и явления, Т. 3, вып. 1, 2021. С. 59–71.

32. Даринский А.В. Рельеф и полезные ископаемые // География Ленинградской области. СПб.: Глагол, 2001. 5–15 с.

## Приложение 1. Графики профилей рельефа и живого сечения реки Приветной.

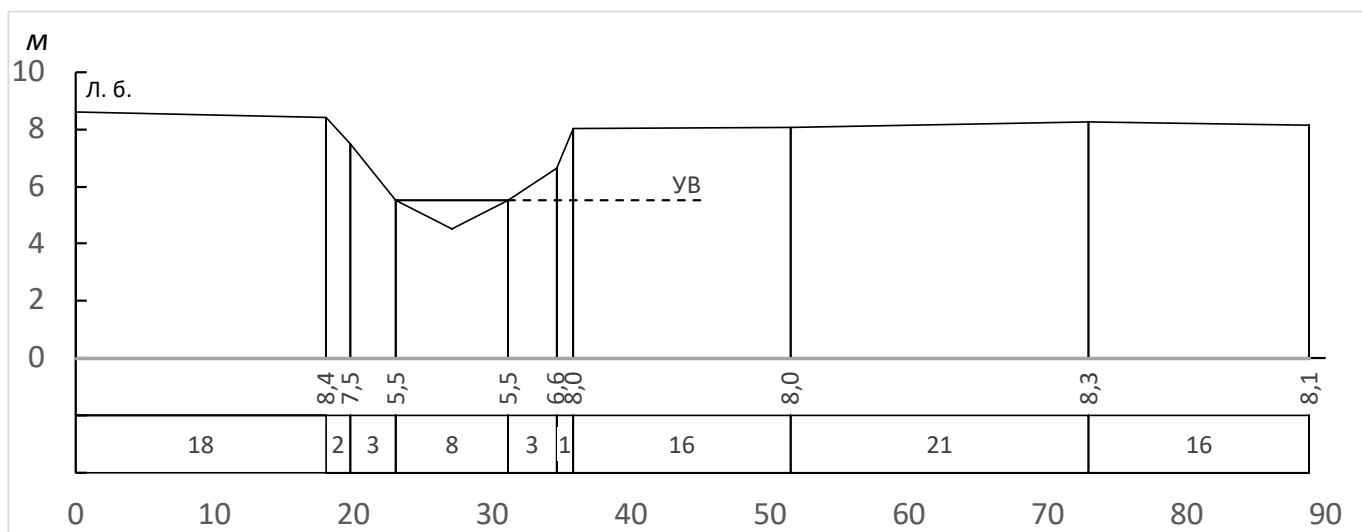


Рисунок 1. Поперечный профиль рельефа участка исследования №1.

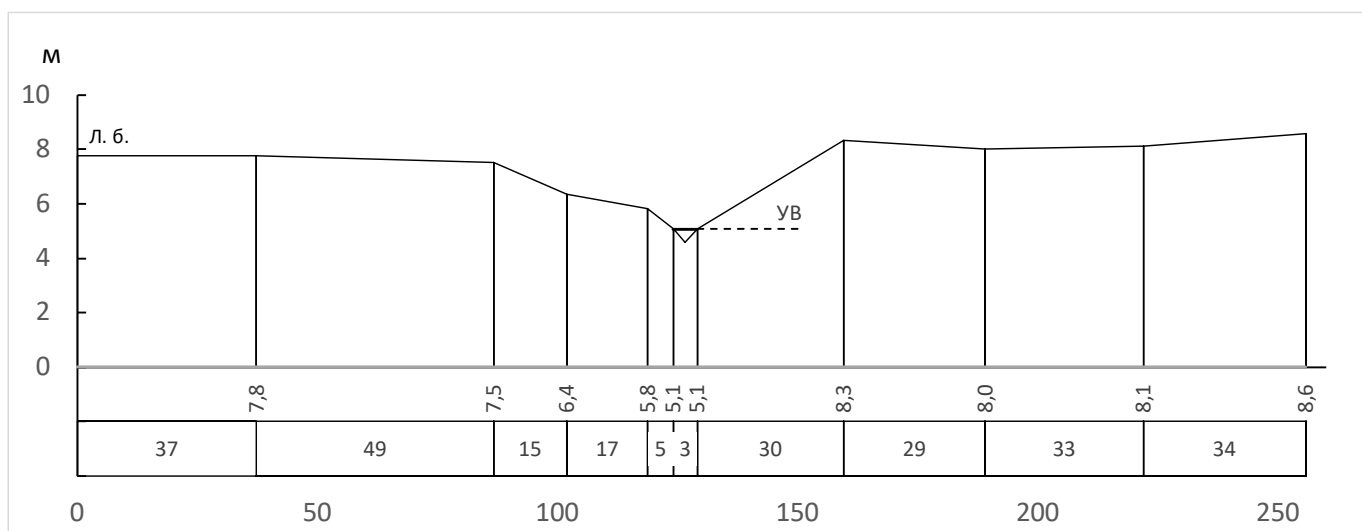


Рисунок 2. Поперечный профиль рельефа участка исследования №2.

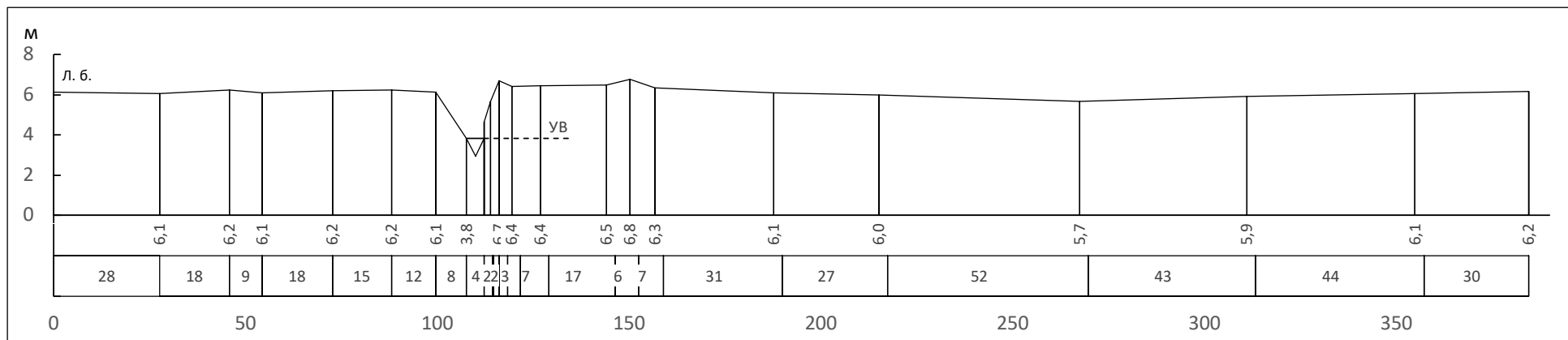


Рисунок 3. Поперечный профиль рельефа участка исследования №3.

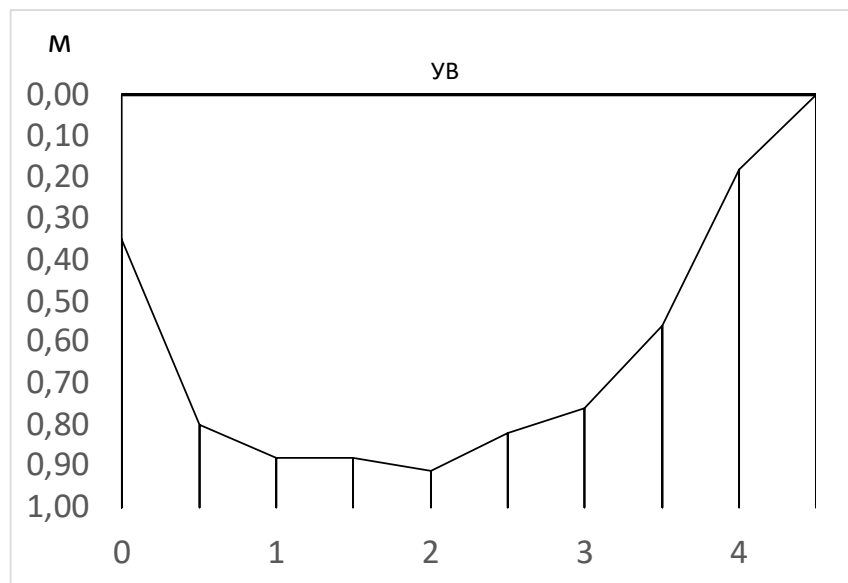


Рисунок 4. Поперечный профиль живого сечения реки Приветной на участке исследования №3.

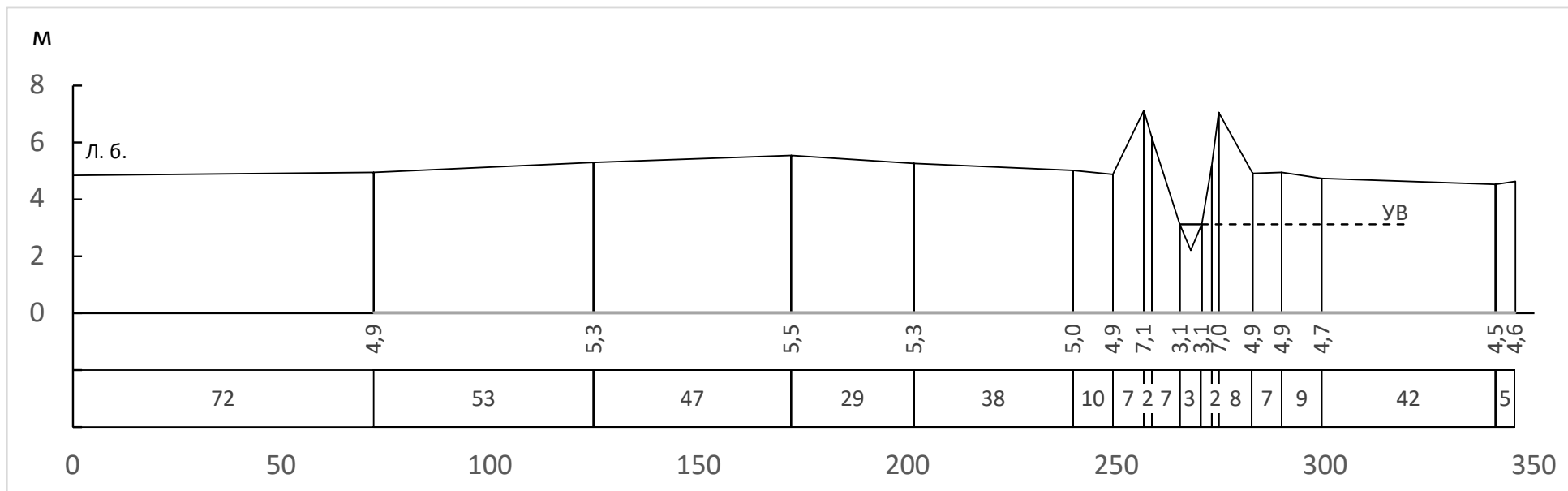


Рисунок 5. Поперечный профиль рельефа участка исследования №4.

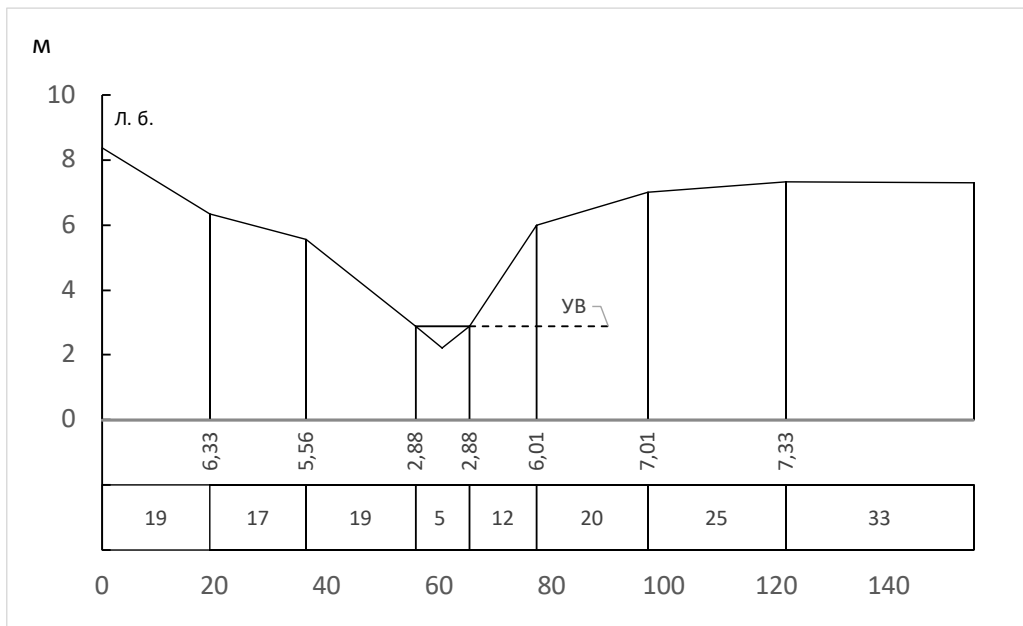


Рисунок 6. Поперечный профиль рельефа участка исследования №5.