

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Сазонов Алексей Александрович

**Вероятные сценарии и расчет характеристик затопления
селитебных территорий на основе комплекса
математических моделей**

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
кандидат географических наук, доцент
Жук Виктор Архипович

Москва – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение.....	4
Глава 1. Район исследований, особенности ледового режима рек и формирования ледовых заторов.....	17
1.1 Исследуемый участок	17
1.2. Особенности ледового режима на рассматриваемом участке реки.....	20
1.3 Социально-экономическая характеристика исследуемого района.....	27
1.4 Особенности наводнений на исследуемом участке	30
1.5 Заторы льда и факторы их образования	41
1.6 Природные факторы заторообразования и условия формирования катастрофических наводнений на исследуемом участке.....	45
1.7 Влияние изменений климатических факторов на образование ледовых заторов	50
Глава 2. Адаптация гидродинамической модели STREAM_2D для ключевого участка	56
2.1 Постановка задачи.....	56
2.2 Основные этапы построения двумерной гидродинамической модели	60
2.3 Описание двумерной модели участка р. Малая Северная Двина (участок от узла слияния рек Сухона и Юг до г. Котлас).....	62
2.4 Описание высокодетальной модели узла слияния р. Сухона и р. Юг (участок г. Великий Устюг) .	64
2.4.1 Исходные данные для построения детальной сетки на территорию города Великий Устюг.....	65
2.4.2 Построение расчетной сетки в программе Automesh-2D	67
2.5 Численные эксперименты по оценке чувствительности гидродинамической модели к изменению параметров	72
2.5.1 Оценка чувствительности гидродинамической модели к изменениям коэффициента шероховатости	72
2.5.2 Оценка чувствительности гидродинамической модели к изменению параметров ледового блока	77
2.6 Калибровка и верификация параметров модели STREAM_2D для моделирования наводнений заторного генезиса с учетом высоты заторного повышения уровней воды	79
Глава 3. Использование динамико-стохастического моделирования для определения максимального расхода воды малой обеспеченности	86
3.1 Краткое описание структуры ИМК ECOMAG	88
3.2 Адаптация ИМК ECOMAG для бассейна реки р. Северная Двина.....	93
3.3 Генератор погоды и использование модели ECOMAG для анализа сценариев прохождения половодья	102
3.4. Результаты стохастического моделирования половодья 0.1% обеспеченности с помощью комплекса моделей.....	109
Глава 4. Характеристики затопления поймы Северной Двины (на примере ключевого участка) для различных сценариев	116
4.1 Анализ выдающихся исторических наводнений.....	116

4.1.1 Анализ наводнения 1998 г.	116
4.1.2 Анализ выдающегося половодья 2016 г.	119
4.1.3 Оценка ущерба от негативного воздействия вод по шкале балльности разрушений.....	126
4.2 Затопление при уровнях воды различной вероятности	130
4.2.1 Оценка затопления территории при расчете уровня 1% обеспеченности стокового генезиса.....	131
4.2.2 Оценка затопления территории при расчете уровня 1% обеспеченности заторного генезиса.....	138
4.2.3 Оценка затопления территории при расчете уровня 0,001% обеспеченности заторного генезиса	145
Глава 5. Анализ возможных мероприятий по обеспечению гидрологической безопасности г. Великий Устюг	149
5.1 Оценка эффективности противопаводковых дамб.....	149
5.2 Долгосрочный прогноз возникновения заторов льда с помощью методов машинного обучения .	159
5.3 Возможные подходы к применению комплекса моделей для краткосрочного прогнозирования характеристик затопления	166
Заключение.....	179
Список литературы.....	182

Введение

Актуальность исследования. По данным МЧС наводнения — самое распространенное стихийное бедствие по повторяемости и по площади распространения и, так и по причиняемому ущербу. По количеству человеческих жертв наводнения находятся на втором месте после землетрясений [Государственный доклад..., 2018]. Климатические особенности нашей страны обуславливают ежегодное прохождение половодья на реках, которое характеризуется выходом вод из меженного русла и затоплением поймы. В периоды весеннего половодья подьёмы уровня воды значительны — до 10–15 м и более над меженным уровнем, при этом в равнинных частях бассейнов больших рек наблюдаются разливы рек, достигающие ширины 10–20 км. В северных районах на разлив рек в весенне-летний период первостепенное влияние оказывает таяние снега и льда, а также появление ледовых заторов и торосов. Уровень воды может достигать и превышать критические отметки, в результате чего в зоны подтопления попадают хозяйственные объекты, населённые пункты, расположенные в прибрежных зонах, что наносит существенный ущерб экономике регионов, а также может причинить вред здоровью населения.

Начало ледохода на реках России, в том числе на территории Европейской части зачастую сопровождаются образованием ледового затора. Причина этому — ориентированность большинства рек с юга на север, которая приводит к более позднему вскрытию от льда в нижнем течение. Перемещаясь вниз по течению лед попадает в район, где река еще не освободилась ото льда, происходит закупоривание русла, в связи с чем река выходит из берегов.

Наводнение или временное затопление освоенной человеком местности, вызывающее отрицательные последствия социально-экономического характера, которые могут выражаться в гибели людей, эвакуации населения, в материальном и нематериальном ущербе [Добровольский, Истомина, 2006; Нежиховский, 1988] — одно из наиболее опасных гидрологических явлений. Различным аспектам возникновения и развития наводнений посвящено огромное количество литературы [Авакян, Полюшкин, 1991; Бузин, 2004; Бузин, 2008; Добровольский, Истомина, 2006; Кичигина, Корытный, 1997; РД 52.04.563-2002; Семенов, 2009; Семенов, Коршунова, 2008 и др.]. Ввиду географических особенностей территории России примерно половина наводнений обусловлены таянием снега и льда, на долю наводнений, произошедших в результате дождей, приходится 36%, 15% имели место в результате заторов льда, небольшая часть связана с ветровыми нагонами [Добровольский, Истомина, 2006; Коронкевич и др., 2010]. Часто наводнения связаны с целым комплексом причин: выпадение дождей разной продолжительности и интенсивности в ряде случаев сопровождается таянием снегов, повреждением или разрушением гидротехнических сооружений или же повышенными сбросами в нижний бьеф сооружений, образованием селевых потоков или оползней, прорывами завальных озер, морскими

нагонами в устьях рек. По степени опасности, учитывающей вероятность, продолжительность и площадь затопления, различают катастрофические, опасные, высокие и средние наводнения [Карлин и др, 2008; Доброумов, Тумановская, 2002]. С учетом повторяемости, обеспеченности максимальных уровней воды, доли и глубины затопления поймы, продолжительности затопления, скорости течения транзитного потока, интенсивности подъема уровня воды и ширины разлива рек А.А. Таратунин [Таратунин, 2008] делит наводнения на четыре категории: от средних до катастрофических. В целом опасность наводнений рассматривается как функция гидрологических факторов.

Как любое стихийное бедствие предотвратить наводнение нельзя, можно только ослабить негативное воздействие воды и постараться минимизировать возможные убытки. Чтобы рассчитать границу зоны затопления, выявить влияние жилых и хозяйственных построек, а также проверить надежность гидротехнических сооружений в настоящее время все большее распространения получают методы математического моделирования. Эта отрасль в настоящее время стремительно развивается благодаря появлению достаточно мощных вычислительных машин, ГИС-технологий. Широкие возможности вычислительной техники оказали существенное влияние на развитие самих численных методов, возникла возможность реализации сложных расчетных алгоритмов для детального изучения неустановившегося движения в речных потоках, русловых деформаций в двумерной постановке.

Во многих зарубежных странах особое внимание уделяется разработке технологий, направленных на прогнозирование и оповещения населения о наводнениях [Buizza et al., 1999; Demeritt et al., 2007; Bogner, Kalas, 2008; Alfieri et al., 2011; Cloke et al., 2013], в том числе:

1. С 1 января 1994 г. в США действует программа национального предупреждения населения (Emergency Alert System), причем данная программа не ограничивается наводнениями, а может быть использована в случае природной или техногенной катастрофы, а также террористической угрозы [Byungseok, Choo, 2016]. С 2012 г. в США также была запущена система Wireless Emergency Alerts, направленная на оповещение через мобильные устройства.

2. После наводнения на реках Эльба и Дунай в 2002 г. в Европе была создана система оповещения о наводнениях (EFAS). В настоящее время в рамках данной программы система два раза в сутки принимает и анализирует около 70 прогнозов погоды различных метеослужб, кроме того она учитывает данные автоматических постов на реках [Bartholmes et al., 2009; Thielen-del Pozo et al., 2015]. После приема информации по каждому метеорологическому прогнозу производится расчет зоны затопления. Заблаговременность системы EFAS составляет от 3 до 6 суток, в случае необходимости население оповещается через мобильные устройства о возможной угрозе.

3. В Японии с октября 2007 г. установлена система оповещения населения через все доступные средства теле- и радиовещания, мобильные устройства и даже через автомобильные сигнализации.

4. Швейцарская система оповещения населения включает в себя 8,5 тыс. мобильных и стационарных устройств, особенное внимание уделено оповещению населения, проживающего вблизи плотин [Alfieri et al., 2012].

На данный момент в России система предупреждения населения в случае наводнений развита слабо, несмотря на очевидную ее необходимость, особенно в районах, где наводнения случаются регулярно. Только в XXI в. произошло множество наводнений, повлекших за собой человеческие жертвы [Коронкевич и др., 2014]. В данном обзоре приведены лишь некоторые из них: наводнение в районе г. Ленск на реке Лена, пострадало почти 31 тыс. человек (май 2001 года), наводнение в Иркутской области, во время которого пострадало 7 городов и 300 тысяч человек (июль 2001 г.), наводнение в Южном федеральном округе, затронувшее 9 субъектов, пострадало 335 тыс. человек, 114 человек погибло (июнь 2002 г.), наводнение в Краснодарском крае во время которого погибло 59 человек (август 2002 г.), наводнение в Кемеровской области, произошедшее из-за поднятия уровня рек Кондома и Томь, пострадало 10 тыс. человек (апрель 2004 г.), наводнение в городах Крымск, Геленджик и Новороссийск унесло жизни 168 человек, а еще более 60 тыс. человек пострадало (июль 2012 г.), наводнение на Дальнем Востоке на территории Амурской области, Хабаровского края и Еврейской автономной области стало одно из самых масштабных за последние 115 лет, пострадало более 100 тыс. человек (лето 2013 г.), наводнение в Вологодской области вблизи города Великий Устюг стало самым крупным в XXI в., пострадало 13 тыс. человек (апрель 2016 г.), наводнение в Иркутской области в июле 2019 года в результате которого погибло 25 человек, а общий ущерб превысил 35 миллиардов рублей.

Стоит отметить, что в отдельных районах существуют внутренние, городские системы, информирующие население о гидрологической обстановке. Так, например, в г. Великий Устюг расположены информационные табло, передающие уровень воды и гидрологические явления с близлежащих постов (рисунок В1). Развиваются также и автоматизированные системы мониторинга, например, на реках Дальнего Востока, Краснодарского края [Бугаец, 2017, Гундров, 2018]. Однако единой для всей территории России системы мониторинга и оповещения населения об угрозе чрезвычайных ситуаций, включая наводнения, которая согласно указу Президента России, должна была быть создана 1 января 2014 г (Указ «О создании комплексной системы экстренного оповещения населения об угрозе возникновения или о возникновении чрезвычайных ситуаций»), пока не существует.



Рисунок В1. Информационное табло оповещения населения о гидрологической обстановке по ближайшим постам в городе Великий Устюг

Одним из наиболее подверженных затоплению районов северной части ЕТР является бассейн Северной Двины, где регулярно формируются ледовые заторы, приводящие к подъему уровня воды на 9 и более м. По характеру ледовых явлений бассейн можно условно разделить на три части, отличающихся общим направлением течения рек: восточный (бассейн реки Вычегда), южный (бассейн рек Сухона и Юг) и центральный (бассейн реки Северной Двины, ниже впадения реки Вычегда) [Алексеевский и др., 2011].

Степень разработанности темы. В настоящее время тематике наводнений и изучению опасных ледовых явлений на р. Северная Двина посвящено множество работ [Агафонова, Фролова, 2007; Донченко, 1987; Коновалов и др., 1962; Чалов и др., 2012; Католиков, Католикова, 2017; Козлов, 2015].

Одним из наиболее неблагоприятных районов в плане образования заторов является южный район, бассейн реки Сухона и Юг, где располагается город Великий Устюг, четвертый город по численности населения в Вологодской области.

Первые работы по вопросам анализа и прогнозирования максимальных заторных уровней относятся еще к шестидесятым годам прошлого столетия [Коновалов и др., 1962; Софер, 1967]. Стоит также отметить работу Р.А.Нежиховского и Н.П.Саковской (1975).

Созданием методик прогноза и рекомендаций по борьбе с заторами льда на реке Сухона в районе города Великий Устюг долгие годы занимались гидрологи Государственного Гидрологического института (работы В.А. Бузина, Л.С. Банщиковой и их коллег (1999, 2001, 2004, 2006, 2008, 2011), МГУ имени М.В.Ломоносова (работы С.А.Агафоновой, Н.Л.Фроловой, Н.И.Алексеевского, В.А.Жука, И.Н.Крыленко, А.С.Завадского и многих других). Были описаны условия формирования заторов в зависимости от метеорологических условий. В статье И.Н.Крыленко [Крыленко, 2003] представлены результаты исследования взаимного подпорного явления в узле слияния рек Сухона и Юг, выполненного на основе использования одномерной и двумерной гидродинамической модели, впервые было изучено дальность распространения подпора, изменение скорости течения и уровня воды на основе методов математического моделирования для данного участка. В 2004 г. была опубликована статья [Алабян и др., 2004], описывающая влияние различных природных и антропогенных процессов на формирование

уровня воды. Среди основных факторов формирования были выделены: изменение стока воды, подпорное взаимодействие рек Сухона и Юг, формирование заторов и развитие русловых процессов. В 2005-2009 гг. коллективом кафедры гидрологии суши был выполнен ряд исследований, результаты которых нашли отражение в многих статьях [Жук и др., 2005; Жук и др., 2006; Жук и др., 2007; Крыленко, 2009], в которых описаны результаты прогноза затопления в черте города с помощью методов математического моделирования. Эта тема стала вновь актуальной после наводнения 2013 г. В 2014 г. совместно с сотрудниками НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева МГУ и кафедры экономической и социальной географии России вышла статья [Фролова и др., 2014], в которой на основе современных компьютерных ГИС-технологий и методов математического моделирования приводятся предложения по снижению негативного влияния вод рек Сухона и Юг в период половодья. В этот же год в журнале «Ученые записки», выпускаемым РГГУ, вышла статья В. А. Бузина [Бузин и др., 2014] и коллектива сотрудников ГГИ и РГГМУ, где подробно описана многолетняя изменчивость максимальных заторных уровней воды, а также оценен вклад отдельных факторов (природных и антропогенных) в формировании ледовых заторов. Спустя 2 года, в 2016 г. произошло одно из самых масштабных наводнений XXI в., после чего был опубликован ряд статей, посвящённых проблематике затопления города Великий Устюг. В 2017 г. опубликована статья [Agafonova et al., 2017], в которой были проанализированы факторы заторообразования под влиянием меняющегося климата, также в данной работе приводятся результаты гидродинамического моделирования на рассматриваемом участке, как в естественных условиях, так и при наличии противопаводковой дамбы. В 2017 и 2018 гг. вышли статьи, посвященные наводнению 2016 г., написанные сотрудниками ГГИ, РГГМУ и Северного УГМС [Георгиевский и др., 2017; Георгиевский и др., 2018]. В ней коллектив, опираясь на зимние экспедиционные исследования 2016 г., приводит анализ причин и последствий наводнения. Кроме того, сотрудники РГГМУ в 2018 г. опубликовали статью [Шаночкин, Сакович, 2018], в которой предложена методика прогнозирования максимального заторного уровня и продолжительности стояния затора.

Отдельным этапом в изучении вопроса обеспечения безопасности города Великий Устюг от негативного воздействия вод стала совместная работа кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова, СПИИРАН и ИВП РАН, в которой участвовал и автор диссертации. В ходе данного исследования была произведена попытка совмещения различных типов моделей в единый комплекс, получивший название «ПРОСТОР» (Прогнозирование Развития Опасных Ситуаций в Оперативном Режиме), позволяющий прогнозировать зону затопления в режиме реального времени. Данная разработка ориентирована на региональный и местный уровень при планировании мероприятий по защите населения от

негативного воздействия вод. Результаты проведенных исследований были отражены в работах [Alabyan et al., 2016; Зеленцов и др., 2018; Zelentsov et al., 2018].

Автор диссертационной работы принимал активное участие по изучению влияния заторов льда на затопление территории в районе г. Великий Устюг, начиная с 2013 г. [Sazonov et al., 2019; Сазонов и др., 2019; Agafonova et al., 2017; Крыленко и др., 2017]. За время работы над диссертационной работой автором была организована зимняя экспедиция в г. Великий Устюг с целью изучения зимних условий формирования ледяного покрова на р. Северная Двина.

Помимо исследований, связанных с развитием методов математического моделирования, в последнее время развиваются различные методы исследования наводнений у г. Великий Устюг с помощью дистанционного зондирования. Среди них стоит отметить работы, выполненные сотрудниками Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова, Архангельским ЦГМС и ИТЦ «Сканэкс» [Лупачев и др., 2010] и сотрудниками Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [Агафонова и др., 2018]. В данных исследованиях выполнен мониторинг ледовой обстановки на затороопасных участках реки Северная Двина с использованием радиолокационных и оптических снимков, необходимый для составления прогноза условий прохождения весеннего ледохода.

Говоря о любых исследованиях, связанных с моделированием гидрологических процессов на р. Северная Двина стоит выделить неоценимый вклад создателей моделей, а именно В.В.Беликова, автора отечественной двумерной гидродинамической модели STREAM_2D, результаты работы которой отражены в статьях [Belikov et al., 2015; Норин и др., 2016; Norin et al., 2017], Ю.Г.Мотовилова, автора физико-математической модели формирования стока ЕСОМАГ, описание которой наиболее полно представлено в монографии [Мотовилов, Гельфан, 2018] и А.Н.Гельфана, который является создателем динамико-стохастической модели, описание которой представлено в работах [Гельфан, 2007; Гельфан, Морейдо, 2015].

Актуальность данного исследования состоит в создании обоснованной методики исследования характеристик затопления и их максимальных значений с учетом заторообразования, основанной на синтезе разных типов гидрологических моделей, и полученных на ее основе результатов оценки характеристик затопления для различных сценариев.

Объект исследования – освоенные участки р. Северная Двина, от слияния рек Сухона и Юг до г. Котлас (рисунок В2), где наводнения происходят наиболее часто, регулярно нанося огромный экономический ущерб.



Рисунок В2. Положение исследуемого участка на карте бассейна р. Северная Двина

Исследование же процессов формирования весеннего стока было проведено для бассейнов рек Сухоны и Юга.

Предмет исследования – процессы формирования и прохождения половодья, вызывающие затопление освоенной части речных долин.

Цель исследования – выявление причин и особенностей катастрофических наводнений во время весеннего половодья на реках севера ЕТР (на примере участка Малой Северной Двины) и оценка их характеристик на основе физико-математической модели формирования стока и двумерной гидродинамической модели.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Подготовить базу гидрологических и метеорологических данных, включающую суточные данные по уровням, расходам воды, ледовым явлениям для рр. Сухона, Юг, Малая Северная Двина за 1937–2019 гг., суточные данные по температуре и влажности воздуха, осадкам за 1966–2019 гг. по 68 метеостанциям в бассейне р. Северная Двина.

2. Адаптировать двумерную гидродинамическую модель STREAM_2D для всего ключевого участка и отдельно для г. Великий Устюг. На основе моделирования половодий за многолетний период оценить параметры ледового блока модели.

3. Провести адаптацию модели формирования стока ЕСОМАГ для воспроизведения расходов воды в узлы слияния р. Сухона и р. Юг, где расположен г. Великий Устюг.

4. Адаптировать динамико-стохастическую модель (генератор погоды), позволяющую выявить возможные критические значения температуры, количества осадков и дефицита влажности воздуха исследуемого района.

5. Используя динамико-стохастическую модель, рассчитать метеорологические характеристики, являющиеся входными параметрами в модель формирования стока, и на основе модели формирования стока оценить расходы воды малой обеспеченности.

6. Провести моделирование вероятных сценариев затопления для ключевого участка с учетом расходов малой обеспеченности, ледовых заторов и противопаводковых дамб на основе двумерной гидродинамической модели.

7. Визуализировать полученные данные в ГИС-среде и создать карты характеристик затопления (глубин, скоростей течения) для каждого проведенного численного эксперимента.

Защищаемые положения.

Разработанная методика моделирования вероятных сценариев затопления урбанизированных территорий на основе модели формирования стока, гидродинамической модели и динамико-стохастической модели “генератора погоды” позволяет адекватно определять параметры катастрофических наводнений.

2. По результатам моделирования паводков за многолетний период обоснован набор параметров ледового блока гидродинамической модели. Показано, что наиболее выдающиеся наводнения были обусловлены либо сочетанием повышенного стока в период затороформирования с мощным затором, либо затором катастрофической мощности.

3. При рассмотрении вероятных сценариев установлено, что для района г. Великий Устюг даже при прохождении максимального расхода 0.1% обеспеченности при отсутствии льда уровень воды не приблизится к максимальным отметкам наблюдавшихся заторных уровней.

4. На примере г. Великий Устюг предложены различные стратегии минимизации риска затопления селитебных территорий при ограниченной эффективности противопаводковых сооружений.

Научная новизна.

Научная новизна работы заключается в комплексном использовании различных типов моделей на основе метеорологической и гидрологической информации, позволившем обоснованно провести оценку характеристик затопления при различных сценариях, в том числе для условий затороформирования и при наличии противопаводковых сооружений. Впервые для бассейна р. Северная Двина была использована динамико-стохастическая модель с генератором погоды, позволяющая рассчитать сочетание метеопараметров, формирующих максимальный

расход воды малой обеспеченности. Проведенные экспериментальные расчеты при различных коэффициентах шероховатости позволили выявить чувствительность гидродинамической модели к определению глубины затопления, скорости течения и площади затопления. На основе расчетов по данным многолетних наблюдений обоснованы параметры ледового блока двумерной гидродинамической модели для периода ледовых заторов.

Практическая значимость работы.

Результаты моделирования, выполненные с помощью генератора погоды, позволили определить наиболее неблагоприятный сценарий прохождения половодья 0,1% обеспеченности. Эта информация может быть полезна при планировании защитных мероприятий и для дальнейшей городской застройки.

Разработанная методика синтеза математических моделей позволит оперативно определять характеристики затопления, что в свою очередь позволит вовремя избежать значительных ущербов и человеческих жертв.

Результаты работы были использованы при выполнении проектов РФФИ № 14-05-31278 мол_а «Опасные ледовые явления на реках Европейской территории России и их изменение под влиянием нестационарного климата», № 17-05-01230 А «Многолетние изменения характеристик затопления пойм и факторы, их определяющие», № 17-05-41030 РГО_а «Комплексное исследование и картографирование современного водного режима рек европейской территории России и его опасных проявлений», № 18-05-60021 Арктика «Сток рек и изменение водного и ледотермического режима устьевых областей и морских побережий Российской Арктики в XXI веке» и № 18-35-00498 мол_а «Катастрофические наводнения на севере Европейской части России: анализ, моделирование и прогноз.», проектов РНФ № 14-17-00155 "Параметризация характеристик речного стока для диагностики возникновения опасных гидрологических явлений и их экологических последствий» и РНФ № 17-11-01254 «Методология и сервис-ориентированная технология создания и использования системы комплексного автоматизированного моделирования природных и природно-технологических объектов и ее реализация для оперативного прогнозирования речных наводнений».

Материалы и методы исследования.

В данной диссертационной работе были использованы различные типы гидрологических моделей, каждая из которых нуждается в определенных исходных данных.

Гидродинамическая модель STREAM_2D. В основу создания гидродинамической модели исследуемого участка вошли материалы экспедиционных исследований, проводимые сотрудниками научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева и кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени

М.В.Ломоносова [Отчет о научно-исследовательской работе, 2013]. В ходе данных полевых работ были получены:

1. Промеры глубин на реках Сухона и Юг, а также от города Великий Устюг и до города Котлас;
2. Уклоны водной поверхности рек Сухона, Юг и Малая Северная Двина
3. Измеренные расходы воды и скорости течения рек Сухона, Юг и Малая Северная Двина
4. Морфометрические створы через долины рек Сухона, Юг и Малая Северная Двина
5. Положение и высотные отметки дорожных насыпей, наличие водопропускных отверстий.

6. Для создания цифровой модели рельефа использовались данные о рельефе с крупномасштабных топографических карт (1:25000) и планов г. Великий Устюг масштаба 1:10000.

В качестве входных данных для модели STREAM_2D использовалась архивная информация среднесуточных режимных наблюдений (за уровнем воды и расходом воды) на гидрологических постах р. Сухона (гидрологические посты в д. Каликино и г. Великий Устюг), р. Юг (гидрологические посты в д. Гаврино, с. Кичменский Городок и пос. Подосиновец) и р. Малая Северная Двина (гидрологические посты в д. Медведки и г. Котлас), полученная по материалам гидрологических ежегодников за период с 1980–2007 год. Данные с 2008 по 2018 гг. были получены с помощью информационного ресурса АИС ГМВО Федерального Агентства Водных Ресурсов [<https://gmvo.skniivh.ru>]. Данные об уровнях воды по гидрологическим постам за 2019 г. были предоставлены Вологодским ЦГМС. Для определения типа подстилающей поверхности, с целью задания коэффициента шероховатости использовались разновременные оптические и радиолокационные космические снимки, предоставленные информационным порталом Геологической Службы США (снимки спутника Landsat) и инженерным-технологическим центром СканЭкс.

Физико-математическая модель формирования стока ECOMAG. Для моделирования стока рек Сухона и Юг использовался ИМК ECOMAG, включающий в себя различные базы данных. Они делятся на три 4 типа:

1. Картографическая основа. Для моделирования речной сети бассейна реки Северная Двина, который включает в себя бассейны рр. Сухона и Юг и выделения элементарных водосборов была выбрана цифровая модель рельефа GLOBE с пространственным разрешением 1 км².
2. Тематические карты. В базе данных ИМК ECOMAG используется ряд карт, на основе которых происходит расчет стока: почвенная карта (масштаба 1:2500000, разработанная коллективом авторов под руководством М.А. Глазовской и представленная в электронном виде

Почвенным институтом РАН), ландшафтная карта стран бывшего СССР в масштабе 1:2500000 составлена коллективом авторов под руководством В.А. Николаева и представлена в электронном виде Почвенным институтом РАН.

3. Метеорологические данные. В качестве входной информации для ИМК ЕСОМАГ использовались среднесуточные данные о температуре воздуха, дефиците влажности воздуха и сумме осадков по 68 метеостанциям. Калибровка модели проводилась на основе данных за 1969-1984 гг., верификация – за период 1985-2019 гг. Сведения о метеорологических характеристиках были предоставлены лабораторией региональной гидрологии ИВП РАН.

4. Гидрологические данные. Для калибровки ИМК ЕСОМАГ использовались данные среднесуточных расходов воды р. Сухона (гидрологический пост в д. Каликино), р. Юг (гидрологические посты в д. Гаврино и пос. городского типа Подосиновец) и на р. Малая Северная Двина (гидрологический пост в д. Абрамково). Большинство из них ведут наблюдение за стоком с 1966 г. по настоящее время, за исключением поста в д.Гаврино, который был закрыт в 1989 г. Использованные материалы гидрологических наблюдений были получены из архива кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и из архива лаборатории региональной гидрологии ИВП РАН.

Стохастический генератор погоды MSFR_WG (*Multi-Site FRagment-based stochastic Weather Generator*). Для калибровки генератора погоды MSFR_WG, предназначенного для моделирования псевдовременных рядов среднесуточных значений температуры воздуха, дефицита влажности и суммы осадков, используемых в качестве входных данных в ИМК ЕСОМАГ, использовалась архивная информация по 68 метеостанциям, расположенным в пределах бассейна р. Северная Двина и в его буферной зоне за период наблюдений с 1971 по 2018 г.

Для обработки полученных результатов использовались программные пакеты ArcGIS, ERDAS IMAGINE, postgresQL и язык программирования Python.

Степень достоверности и апробация результатов.

В период 2015–2019 гг. результаты диссертационного исследования были доложены на 24 конференциях, в лектории Русского Географического Общества, на семинаре кафедры географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и в Северном Арктическом Федеральном университете. Среди них: *International Geographical Congress* (Китай, 2016), *International Geographical Congress* (Канада, 2018), *European Geosciences Union General Assembly* (Австрия, 2018 и 2019), *Water sustainability in a changing world* (Румыния, 2019). Помимо международных конференций автор принял участие в ряде Всероссийских конференций с международным участием, таких как *Четвертая Всероссийская Научная Конференция с Международным Участием «Фундаментальные Проблемы Воды и Водных Ресурсов»* (Москва,

2015), *Первые, Вторые и Четвертые Виноградовские чтения* (Санкт-Петербург, 2013, 2015, 2020), *V Всероссийская конференция «Ледовые и термические процессы на водных объектах России»* (Владимир, 2016), *Общероссийская научно-практическая конференция и выставка «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»* (Москва, 2017), *конференция молодых ученых и талантливых студентов "Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность"* (Москва, 2017), *XVII Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций»* (Москва, 2018), *VII Международная научно-практическая конференция "Морские исследования и образование" MARESEDU-2018* (Москва, 2018) и конференция «Биомониторинг в Арктике» (Архангельск, 2018). Помимо выступлений на конференциях, отдельные результаты диссертационной работы были доложены на совещании по подготовке к прохождению весеннего половодья 2018 г. заместителю губернатора Вологодской области Рябишину В.В и начальнику аварийно-спасательной службы Вологодской области Лучинскому А.А.

Личный вклад автора.

Автор оценивает свой личный вклад следующим образом:

1) При работе над первой главой автор самостоятельно построил и проанализировал данные наблюдений за ледовым режимом реки Северная Двина, природные и антропогенные факторы заторообразования, все графики и карты были построены автором. С целью изучения условий формирования ледяного покрова рр. Сухона и Юг, а также процесса их вскрытия были проведены экспедиционные исследования в районе г. Великий Устюг в 2018 г.

2) При адаптации двумерной гидродинамической модели STREAM_2D (2-ая глава диссертационного исследования) автором была выполнена калибровка и верификация модели, включая периоды ледовых заторов, а также обновлена информация о типах подстилающей поверхности. Также автором была проведена серия экспериментов по выявлению чувствительности модели к калибровочным параметрам.

3) Была выполнена дополнительная калибровка и верификация физико-математической модели формирования стока ЕСОМАГ для моделирования гидрографов стока рр. Сухона и Юг (3-я глава работы).

4) При работе над четвертой главой диссертации автором под руководством А.Н. Гельфана была собрана необходимая информация для динамико-стохастической модели «генератор погоды» и проведена ее адаптация для исследуемого участка. Все результаты моделирования, включая графики и карты затопления были получены автором.

5) В пятой главе при создании комплекса, объединяющего различные типы гидрологических моделей, автор принимал участие в разработке методики оценки характеристик затопления в черте города. Автором были выполнены все тестовые расчеты в рамках созданного

комплекса: подбор исходных данных, построение расчетной сетки с учетом зданий, расчеты, визуализация результатов и последующий их анализ. Автором проанализирована эффективность противопаводковых сооружений для защиты г. Великий Устюг от затопления и их влияние на изменение характеристик затопления прилегающих территорий.

Публикации. Автором опубликовано 32 печатные работы, в том числе 9 в журналах, определенных положением о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 213 источников. Работа изложена на 201 странице текста, включает 97 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 145 работы на русском языке и 68 работ на иностранном.

Автор выражает благодарность всем сотрудникам кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и ИВП РАН А.Н. Гельфану, Ю.Г. Мотовилову, В.В. Беликову, И.Н. Крыленко за помощь и поддержку в работе, консультирование и мудрое наставничество. Также автор выражает благодарность начальнику Вологодской аварийно-спасательной службы А.А. Лучинскому за помощь в организации экспедиционных работ и предоставление достоверной информации о наводнениях в г. Великий Устюг.

Глава 1. Район исследований, особенности ледового режима рек и формирования ледовых заторов

1.1 Исследуемый участок

Исследуемый участок р. Северная Двина, р. Сухона и р. Юг является наиболее проблемным с точки зрения заторных наводнений на европейской территории России (ЕТР).

Река Сухона вытекает из Кубенского озера, расположенного в центральной части Вологодской области, в Воже-Кубенском тектоническом прогибе. Длина р. Сухона составляет 558 км, площадь бассейна – 50 300 км², лесистость – 70%, заболоченность – 3%. В верхнем течении долина реки Сухоны характеризуется пологими склонами, широкой поймой, берегами, покрытыми заливными лугами, ниже по течению крутизна берегов увеличивается, долина сужается, травянистая растительность сменяется лесами, увеличивается уклон водной поверхности, появляются каменистые пороги и перед слиянием с р. Юг ширина долины достигает 8 км, ширина русла – 500 м [<https://water-rf.ru/>].

Реки исследуемого региона по особенностям водного режима р. Сухона относятся к восточноевропейскому типу, питание рек, смешанное с преобладанием снегового. В верхнем течении водный режим р. Сухоны находится под регулирующим воздействием Кубенского озера, ниже по течению это влияние ослабевает, и амплитуда изменения уровней воды в половодье увеличивается до 11 м у с. Порог, при этом продолжительность подъема и спада снижается. Спад уровней растягивается до конца июля, устойчивая межень наступает в начале августа и продолжается до сентября.

Площадь бассейна р. Юг - 35 600 км², длина – 574 км, истоки реки находятся на северо-западных склонах Северных Увалов, русло реки, сильно меандрируя, образует большое количество песчаных перекатных участков, островов, стариц и заливов. Долина реки характеризуется пологими берегами с широкой низкой поймой, покрытыми преимущественно травянистой растительностью, сменяющейся лесами. Ширина извилистого русла составляет примерно 20–50 м. В среднем течении долина сужается, ширина русла достигает 70–100 м, пойма на этом участке очень узкая. В 35 км выше по течению от места слияния с р. Сухона в р. Юг впадает ее главный приток, р. Луза, увеличивая водность реки в два раза. Ниже впадения р. Луза ширина русла р. Юг увеличивается до 150–200 м, в устьевой части активно развиваются процессы береговой эрозии, формируются многочисленные песчаные косы и перекаты. Бассейн р. Юг находится в пределах всхолмленной равнинной территории в зоне южно-таежных лесов, занимающих 80% площади ее бассейна. Река имеет небольшие глубины и доступна для судоходства лишь в период половодья [<https://water-rf.ru/>].

Для водного режима р. Юг характерно хорошо выраженное весеннее половодье с быстрым подъемом и спадом уровней. Наибольшая годовая амплитуда уровней воды Юга составляет около 6,5 м.

Длина исследуемого участка р. Северная Двина составляет 69,5 км (рисунок 1.1). Верхняя граница участка находится на р. Юг близ д. Карасово и на р. Сухона близ д. Иштутино, нижняя – у г. Котлас выше впадения слияния р. Малая Северная Двина с р. Вычегда (рисунок 1.2).

Русло р. Малой Северной Двины формируется преимущественно в песчаных аллювиально-озерных и аллювиальных отложениях, но при этом на большей части контролируется правым высоким берегом, относительно устойчивые к размыву, коренные породы которого существенно ограничивают боковую эрозию. По левобережью распространена разновысотная пойма со сравнительно выдержанной шириной (4–7 км). К тыловой части поймы спускаются склоны той же поверхности коренного левого борта долины, местами встречаются фрагменты более низких террас. Лишь в верхней части рассматриваемого участка река (678 км по судовому ходу) отходит от правого коренного берега, прижимаясь к левому у с. Бобровниково, и затем (663 км) вновь возвращается к правому. Ниже по течению русло р. Северной Двины еще раз отходит от контролирующего правого коренного берега у устья р. Ухтомки (д. Бурмасово и д. Заухтомье) напротив пос. Приводино, формируя крупную сегментную излучину, затем вновь прижимается к правому коренному берегу у садовых участков г. Котласа (урочище Ефимовское, д. Заовражье) и следует вдоль него уже до слияния с р. Вычегдой [Отчет о научно-исследовательской работе, 2013].

Для понимания особенностей формирования заторов льда остановимся на особенностях ледового режима реки. Для этого были собраны и проанализированы различные характеристики водного и ледового режима за период с 1937 по 2018 г. по г/п г. Великий Устюг, расположенному на р. Сухона.



Рисунок 1.1. Исследуемый участок р. Малая Северная Двина с притоками р. Сухона и р. Юг

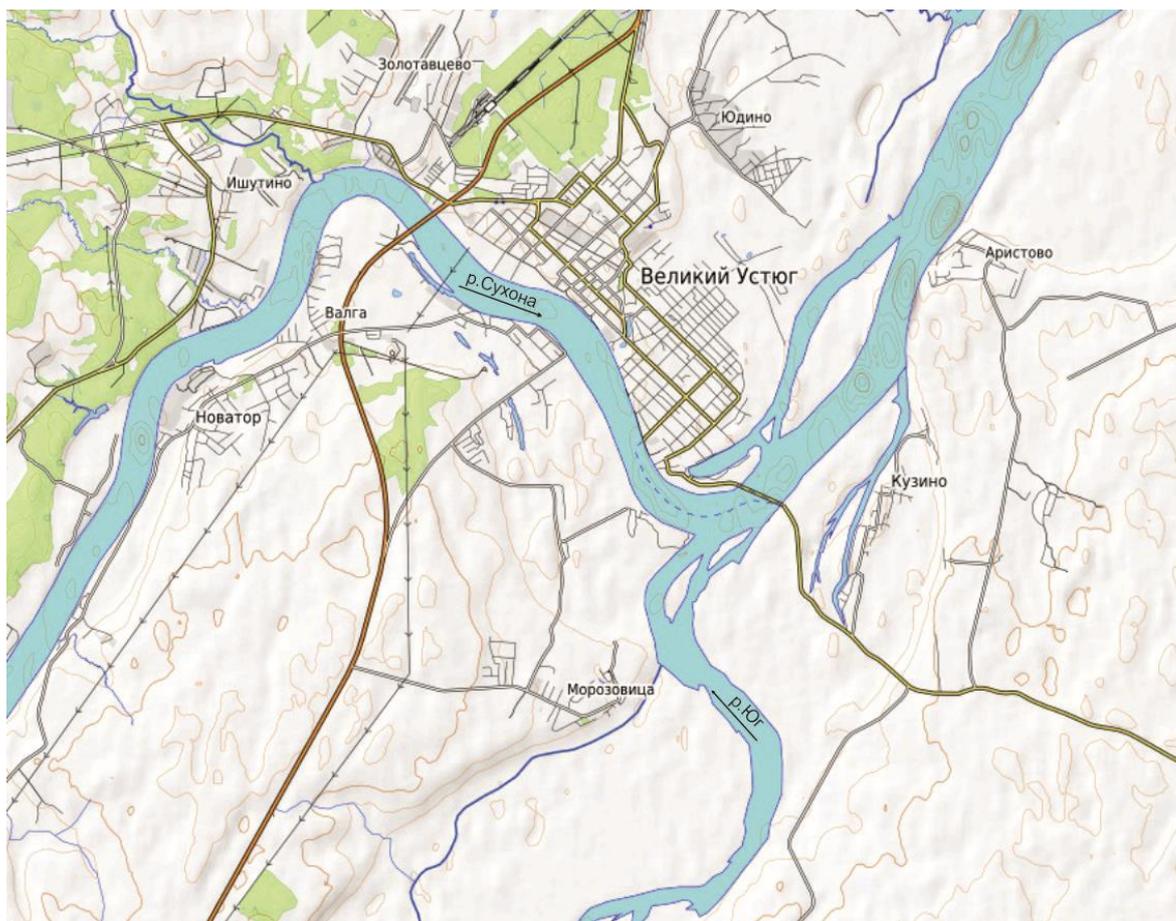


Рисунок 1.2. Схема расположения г. Великий Устюг

1.2. Особенности ледового режима на рассматриваемом участке реки

Замерзание реки. Средняя дата появления льда на р. Сухона вблизи г. Великого Устюга, вычисленная за период наблюдений, приходится на 31 октября (рисунок 1.3). При этом эта дата за период наблюдений заметно изменяется. Так, например, в 1950 г. появление льда на реке было зафиксировано 10 октября, а в 2013 и 2014 гг. – 28 ноября. В целом за период наблюдений отмечается сдвиг даты замерзания реки на более поздние сроки. Для статистической проверки данного утверждения по имеющемуся ряду наблюдений был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена при уровне значимости 5%. Рассчитанное значение составило 0,285, что больше соответствующего квантиля нормального распределения. Можно сделать вывод о статистической значимости рассматриваемых изменений.

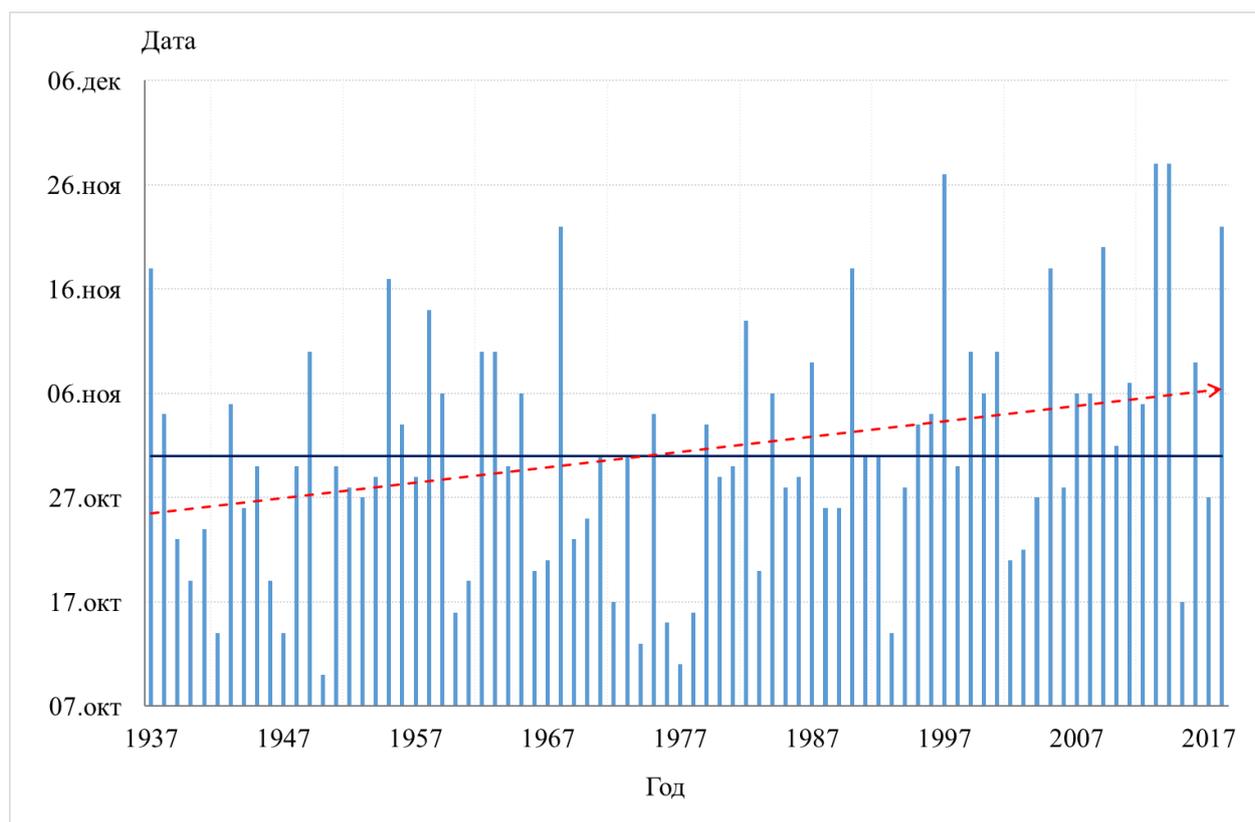


Рисунок 1.3. Дата появления льда на р. Сухона у г. Великий Устюг за 1937–2018 гг. (красным пунктиром показана линия линейного тренда)

Замерзание реки Сухона происходит обычно при низких уровнях воды, вплоть до -1 см от нуля поста у г. Великий Устюг, однако, в отдельные годы, например, в 1955 г., отметка уровня достигала 304 см (рисунок 1.4). Средний уровень воды (за 83 года наблюдений), при котором происходит замерзание, составил 116 см. В последние годы уровни воды в период замерзания превышают среднемноголетнее значение, хотя в целом за весь рассматриваемый период наблюдается тенденция к снижению предледоставных уровней. Это было подтверждено критерием Спирмена. Рассчитанное значение ранговой корреляции Спирмена составило -0,241, что больше соответствующего квантиля нормального распределения. В годы, когда произошли крупнейшие наводнения XX в., а именно в 1953, 1979 гг., замерзание реки происходило при уровне 201–236 см. Исключение составляет 1998 г., когда эта отметка составляла 133 см. Достаточно высоким был предледоставный уровень в 2016 г. – 201 см над “0” поста.

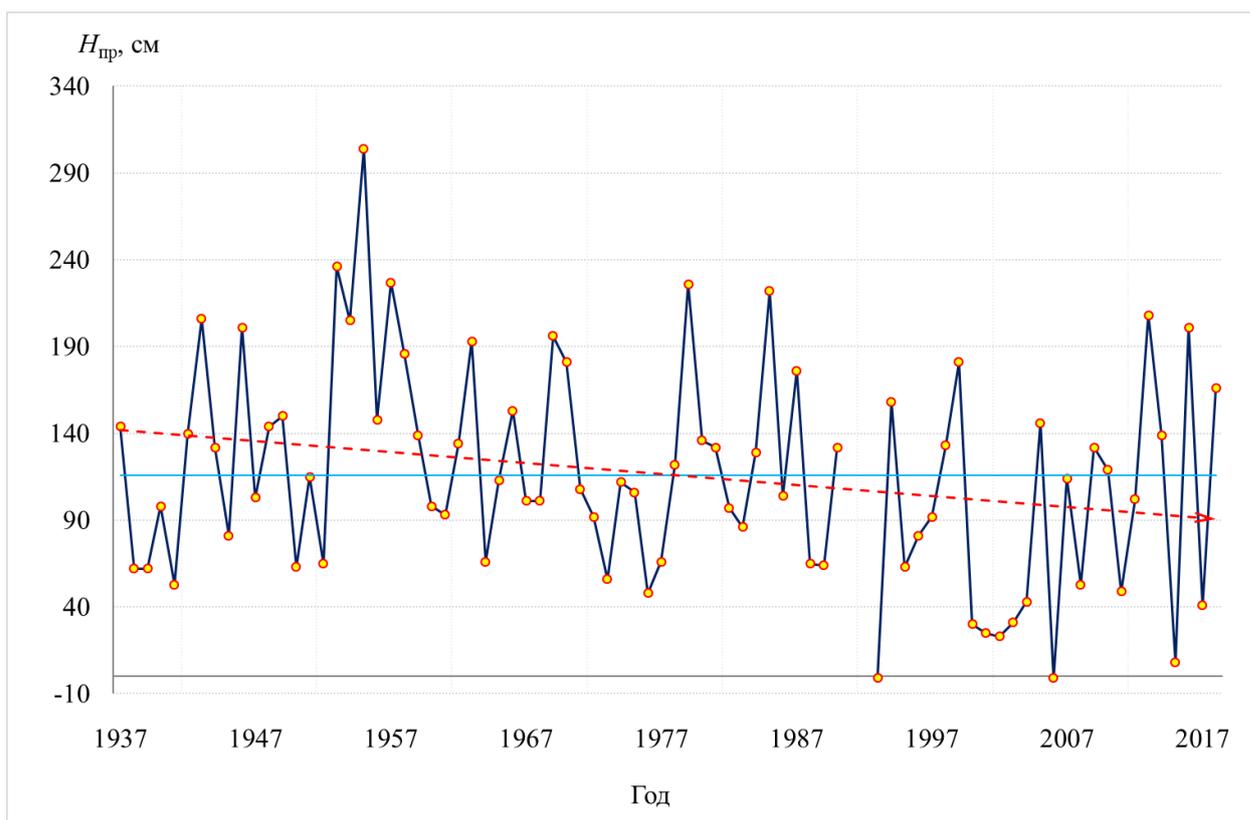


Рисунок 1.4. Предлестованные уровни воды $H_{пр}$ (см над «0» поста) р. Сухона у г. Великий Устюг за 1937–2018 гг. (красным пунктиром показана линия линейного тренда)

Установление ледостава. Установление ледостава на р. Сухона является началом периода зимней межени, которая продолжается вплоть до вскрытия реки. Установление льда в основном зависит от температуры воздуха. Дата замерзания реки определяется наличием антициклона, устанавливающегося над ЕТР в период образования льда [Гинзбург, 1959]. Чем выше температура воздуха, тем больше смещение дат замерзания рек на более поздние сроки. Второй фактор, который влияет на установление льда на реке – морфометрические особенности русла. Интенсивность нарастания льда от берегов к стрежню реки зависит от скорости течения и от уклона водной поверхности. В случае малой скорости течения ледяной покров образуется путем смыкания заберегов, большая скорость течения приводит к образованию зажоров и постепенному их нарастанию. Для начала образования льда необходимо понижение температуры воды в водной толще. Путем турбулентного перемешивания достигается равномерное распределение температуры по глубине в предлестованный период.

Согласно данным наблюдений на гидрологическом посту г. Великий Устюг, дата образования ледостава варьирует в достаточно больших пределах (рисунок 1.5), наиболее раннее замерзание реки наблюдалось в 1948 и 1953 гг., а самое позднее – в 2009 г. В среднем ледостав устанавливается 17 декабря, однако в последние годы наблюдается смещение этой даты на более поздние сроки. Это утверждение было проверено с помощью критерия ранговой корреляции

Спирмена. Рассчитанное значение ранговой корреляции Спирмена составило 0,320, что позволяет сделать вывод о статистической значимости выявленных изменений.

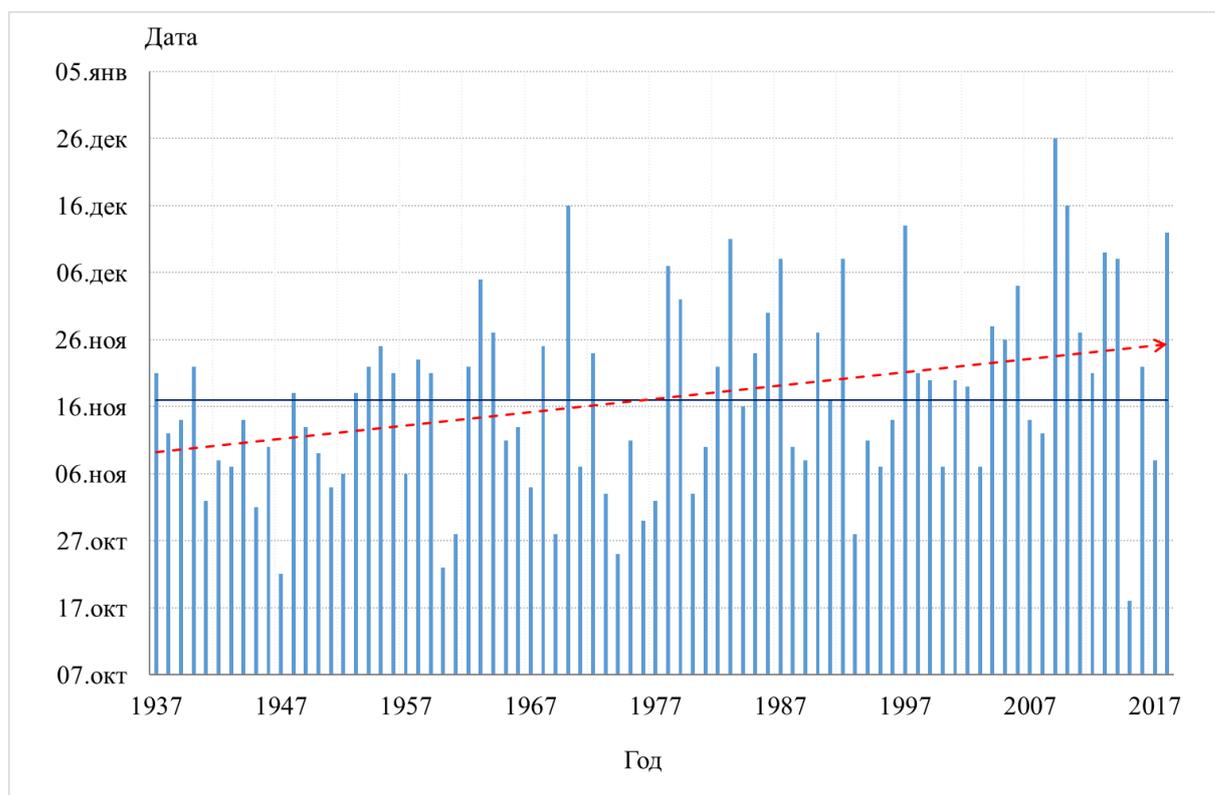


Рисунок 1.5. Дата ледостава на р. Сухона у г. Великий Устюг за 1937–2018 гг. (красным пунктиром показана линия линейного тренда)

Согласно данным наблюдений за максимальной толщиной льда, среднее значение составило 68,8 см (рисунок 1.6). Анализируя график изменения максимальной толщины льда, можно отметить, что, с конца 1970-ых годов наблюдается уменьшение толщины льда. Проверка имеющегося ряда наблюдений на наличие тренда с помощью критерия Спирмена это подтвердила. Рассчитанное значение ранговой корреляции Спирмена составило -0,520. Если рассматриваемый временной отрезок разделить на две равные части, с 1937 по 1977 г. и с 1978 по 2016 г., то можно отметить, что для второго периода средняя величина максимальной толщины льда уменьшается с 77,6 см до 62,8 см, что может говорить об изменении климатических условий, в том числе изменении температуры воздуха. Анализируя связь максимальной толщины ледяного покрова с вероятностью возникновения наводнений, можно отметить, что эта связь незначительная. В качестве иллюстрации можно привести тот факт, что для 6 лет (1953, 1979, 1991, 1998, 2013 и 2016 г), когда подъем уровня был крайне высоким, около 9 метров, лишь в 2 случаях величина максимальной толщины ледостава превышала среднегодовое значение.

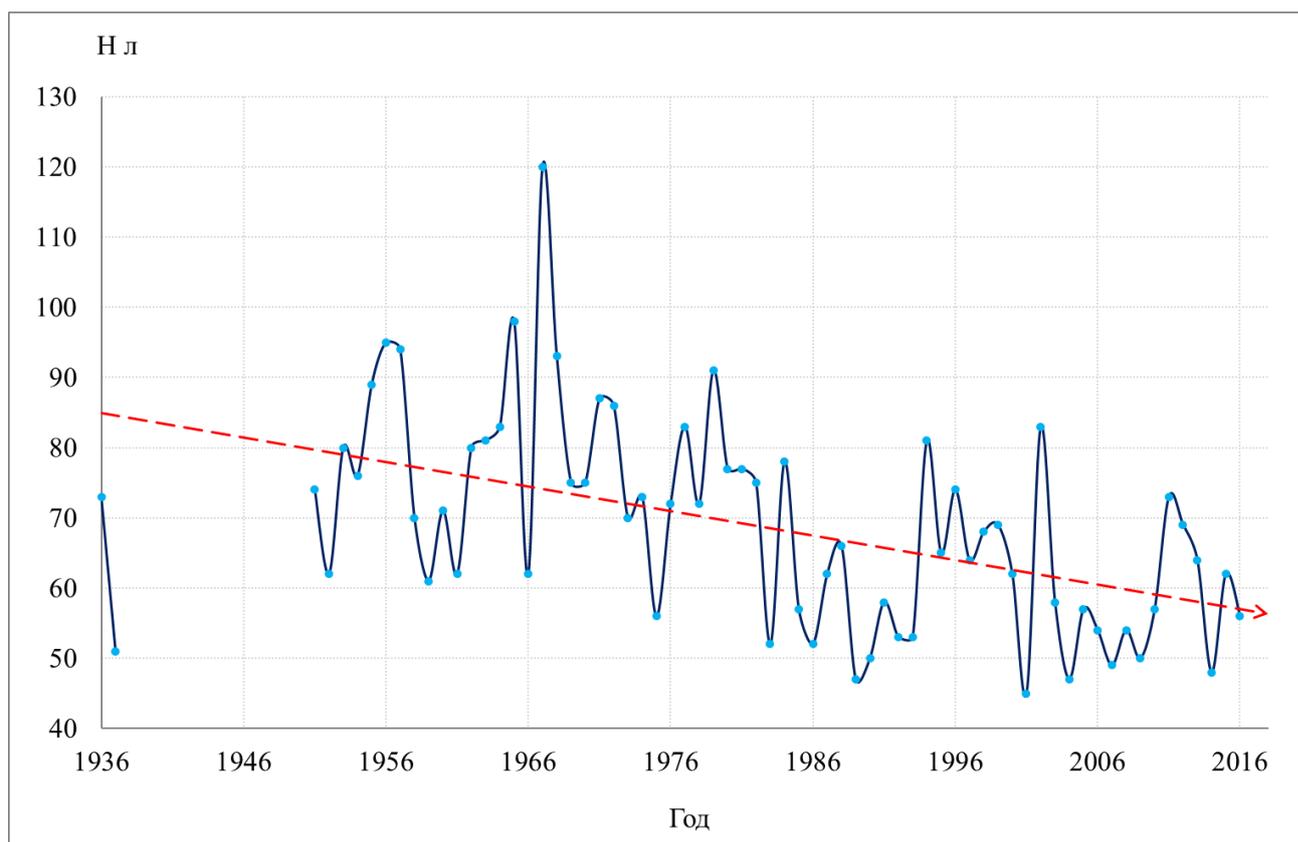


Рисунок 1.6. Максимальная толщина льда р.Сухона у г. Великий Устюг за 1937–2016 гг. (см) (красным пунктиром показана линия линейного тренда)

Вскрытие реки. Вскрытие р. Сухона происходит почти одновременно на всей протяженности реки за счет поступления талой воды с южной (правобережной) части ее бассейна. На участке после слияния р.Сухона и р. Юг, на р. Малая Северная Двина, вскрытие происходит при участии весеннего стока р. Юг [Бузин и др., 2014].

В апреле на территории бассейна р. Сухоны происходит переход температуры через 0°C , в связи с чем начинается таяние снега и льда, увеличивается инфильтрация воды.

На р. Сухона первая подвижка льда в среднем отмечается 20 апреля (рисунок 1.7), однако в некоторые годы подвижки льда не происходит, сразу начинается ледоход. Данные наблюдений показывают, что в последние годы даты первой подвижки льда смещаются на более ранние, однако эти изменения статистически незначимы.

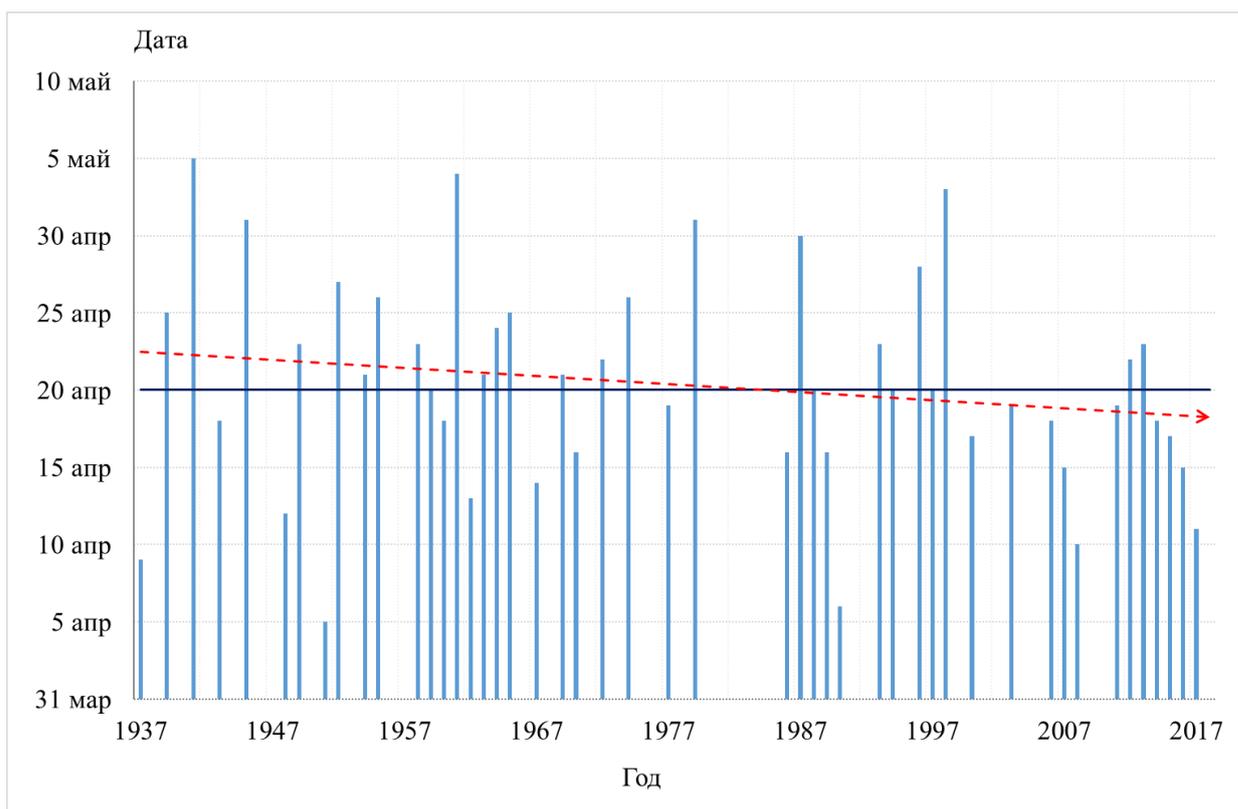


Рисунок 1.7. Дата первой подвижки льда на р. Сухона у г. Великий Устюг за 1937–2017 гг. (красным пунктиром показана линия линейного тренда)

Дата начала ледохода для р. Сухона варьирует от 4 апреля до 6 мая, в среднем она составляет 20 апреля (рисунок 1.8). Следует отметить, что даты начала ледохода образуют группы более ранних и поздних сроков. Этот факт подтверждается проверкой ряда дат на однородность критерием серий (при уровне риска $\alpha=5\%$). Рассчитанное значение критерия составило 4,5, то есть статистически выявлено нарушение однородности. Имеющийся ряд наблюдений был изучен на наличие или отсутствия тренда с помощью критерия Спирмена. Рассчитанное значение ранговой корреляции Спирмена составило $-0,244$, что свидетельствует о статистически значимом изменении.

Продолжительность ледохода на р. Сухона в среднем составляет 4,2 дня, однако это значение может сильно меняться год от года (рисунок 1.9). Наибольшая продолжительность ледохода – 12 дней – была зафиксирована в 2018 г. Несмотря на возрастающую линию тренда на графике, нельзя однозначно говорить о каких-либо значимых изменениях за период наблюдений. Это утверждение было подтверждено проверкой имеющегося ряда наблюдений с помощью критерия Спирмена.

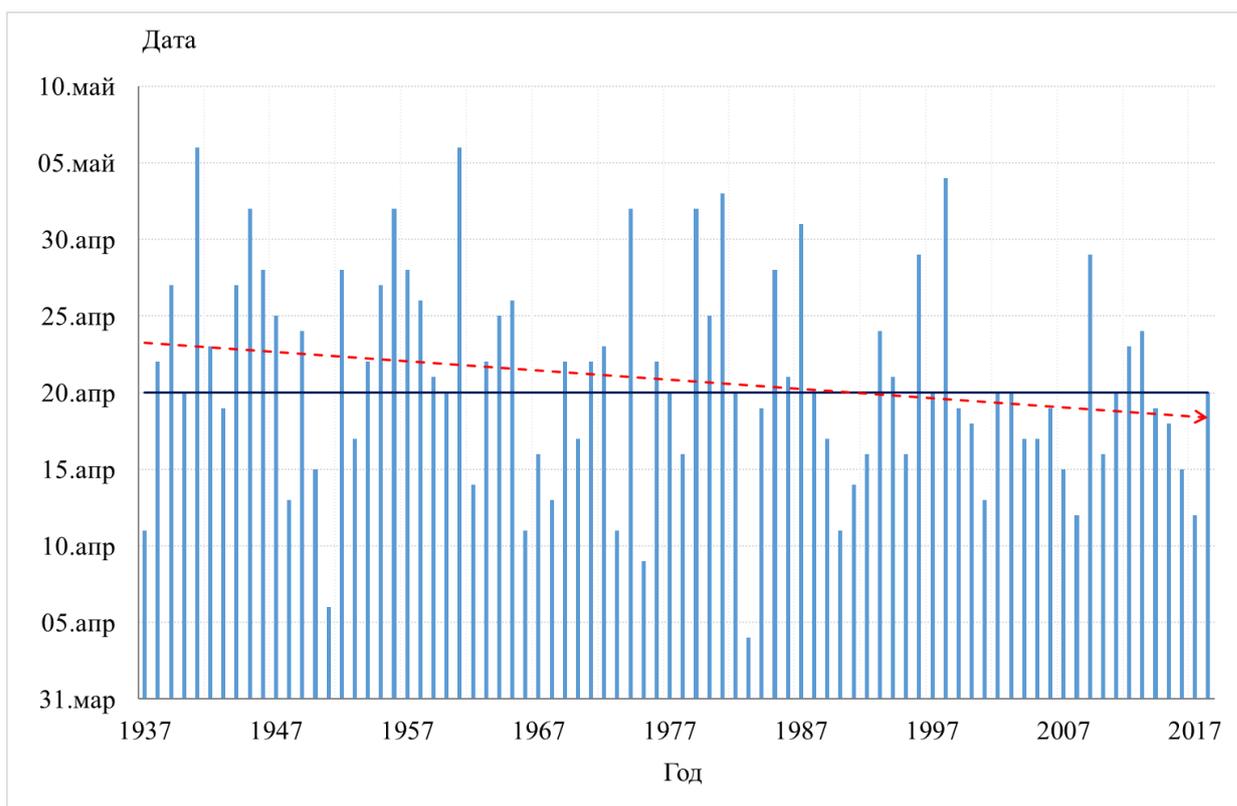


Рисунок 1.8. Дата начала ледохода на р. Сухона у г. Великий Устюг за 1937–2018 гг. (красным пунктиром показана линия линейного тренда)

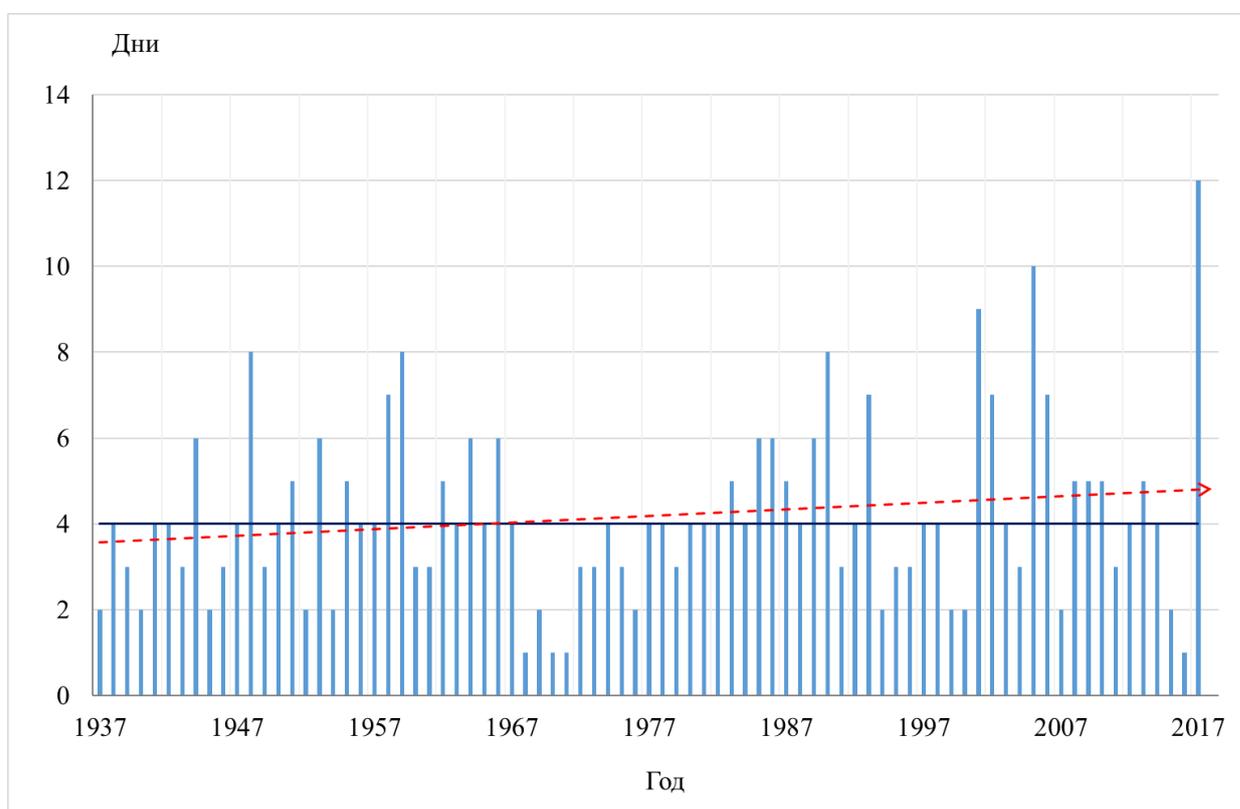


Рисунок 1.9. Продолжительность ледохода на р. Сухона у г. Великий Устюг за 1937–2017 гг. (красным пунктиром показана линия линейного тренда)

1.3 Социально-экономическая характеристика исследуемого района

Долина р. Малой Северной Двины пересекает Вологодскую и Архангельскую области (рисунок 1.10–1.12). В пределах указанных административных образований население исследуемого региона составляет 99,46 тыс. чел. (2017 г.) или 5,8% общей численности Архангельской и Вологодской областей. Городское население составляет 87%. Сельские населенные пункты характеризуются небольшой численностью населения.

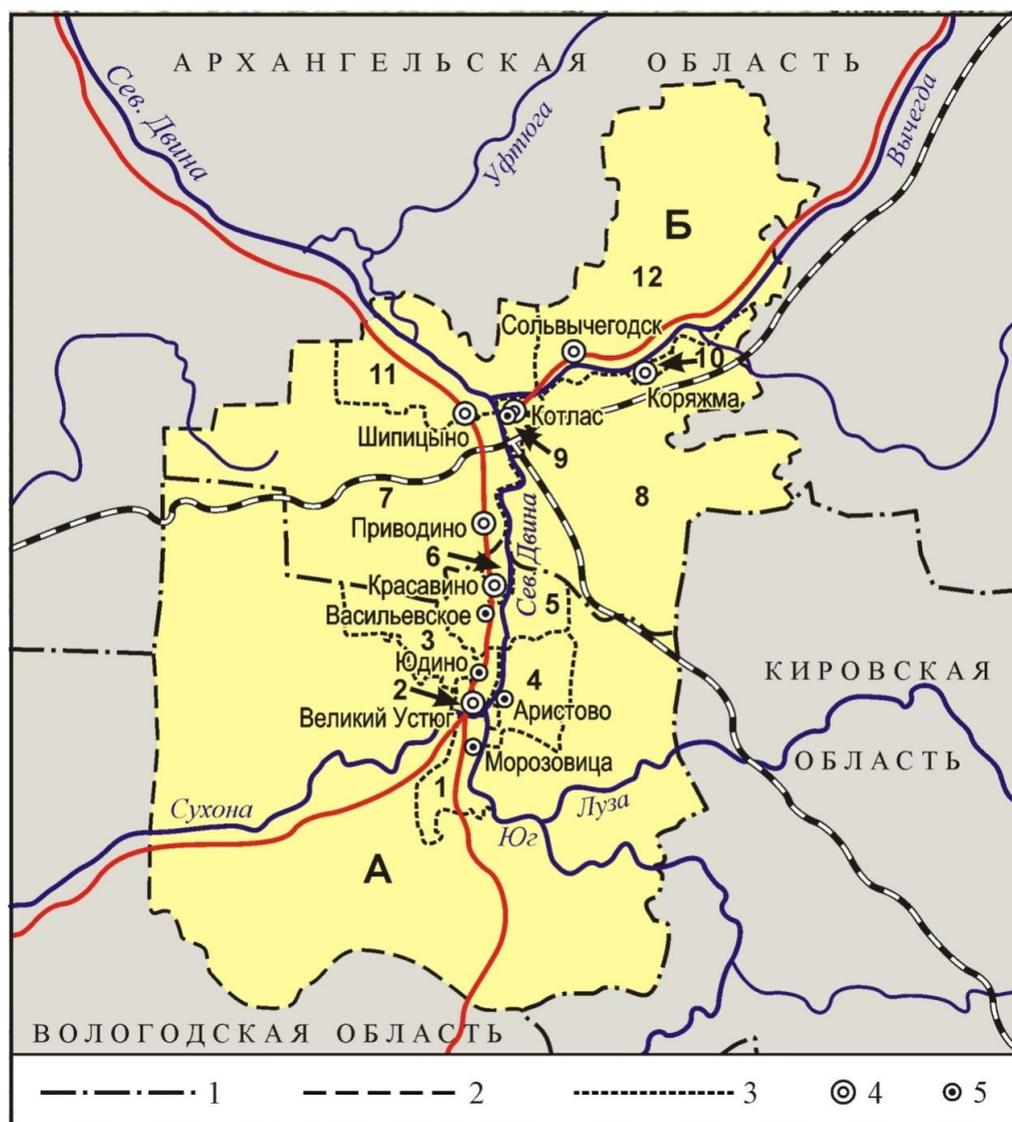


Рисунок 1.10 Административные образования в районе исследований:

1 – границы областей, 2 – границы муниципальных районов, 3 – границы поселений и муниципальных образований, 4 – центры городских поселений, 5 – центры сельских поселений. Муниципальные образования: А – Великоустюгский район, Б – Котласский район, 1 – Трегубовское сельское поселение, 2 – городское поселение Великий Устюг, 3 – Юдинское сельское поселение, 4 – Шемогодское сельское поселение, 5 – Красавинское сельское поселение, 6 – городское поселение Красавино, 7 – Приводинское городское поселение, 8 – Черёмушское сельское поселение, 9 – Котласский городской округ, 10 – городское поселение Коряжма, 11 – Шипицынское городское поселение, 12 – Сольвычегодское городское поселение

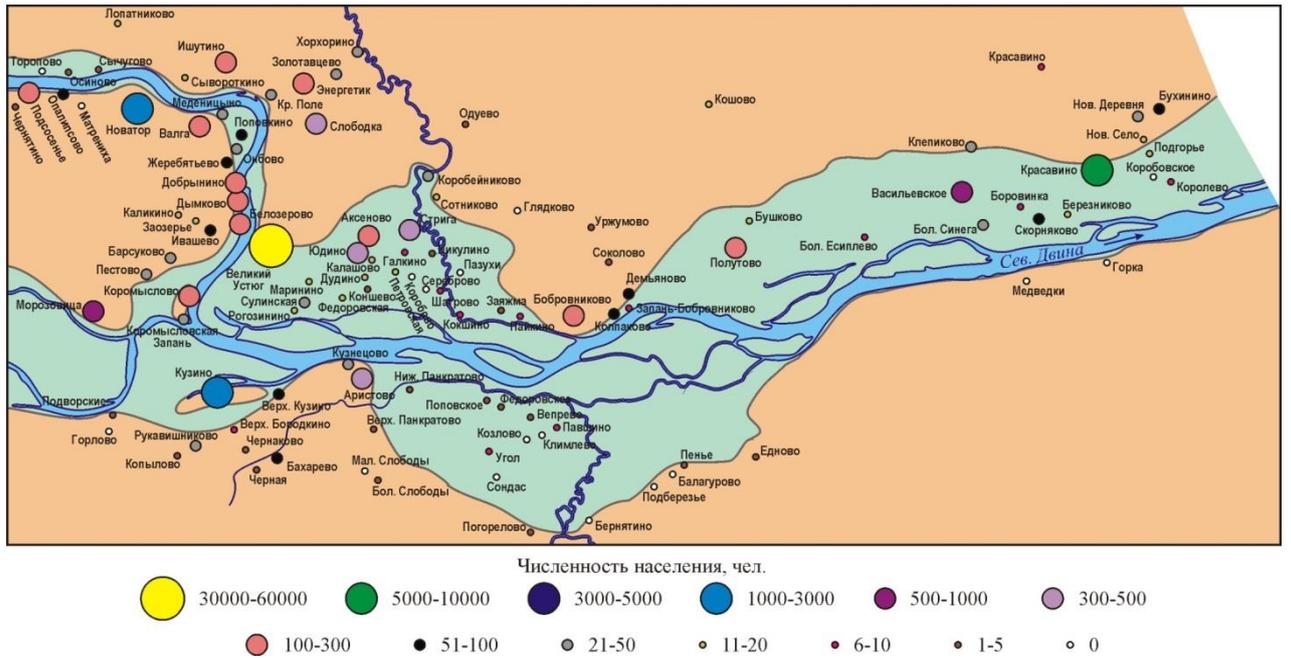


Рисунок 1.11. Населённые пункты Вологодской области, расположенные в долине р. Малая Северная Двина

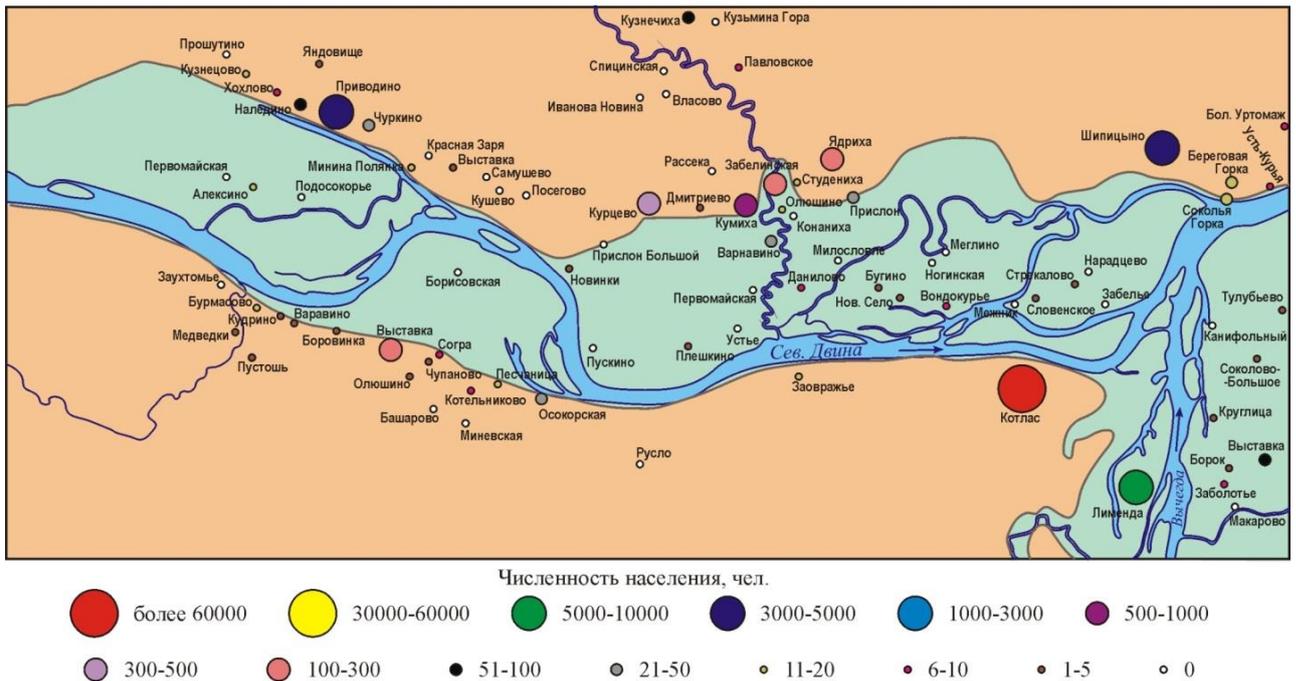


Рисунок 1.12. Населённые пункты Архангельской области, расположенные в долине р. Малая Северная Двина

На берегу рек в пределах рассматриваемого участка расположены г. Великий Устюг и г. Красавино (Вологодская область) и г. Котлас (Архангельская область). Город Красавино подчинен администрации г. Великого Устюга. Данные населенные пункты расположены в зоне регулярного подтопления.

Великоустюгский район. Великоустюгский район расположен на северо-востоке Вологодской области, на стыке ее границы с Архангельской и Кировской областями. Районным центром является г. Великий Устюг, расположенный в 460 км к северо-востоку от г. Вологды на левом берегу р. Сухона, в месте впадения в неё р. Юг.

Численность постоянного населения Великоустюгского муниципального района составляет 54,6 тыс. человек или 4,7% населения Вологодской области (2017 г.), большая часть населения – городское – 39,8 тыс. человек, сельское население – 17,5 тыс. человек. Около 60% общей численности населения относится к трудоспособному возрасту (34,4 тыс. чел.), из которых работающее население – 23,5 тыс. Преобладающая часть занятого населения сосредоточена на крупных и средних предприятиях, где работают 12,0 тыс. человек. На 01.08.2016 г. уровень безработицы по району составил 2,6%, а общая численность работающих 23,5 тыс. человек. В 2012 г. социально - экономическая ситуация в районе осложнилась в связи с ликвидацией производства на промышленной площадке №2 ОАО «Вологодский текстиль» г. Красавино.

Основными отраслями промышленности района являются лесозаготовительная и деревообрабатывающая промышленность.

В г. Великом Устюге работает маломощная ТЭЦ для городских нужд, построенная еще в 1928 г. Другие предприятия представлены только распределительными сетями и котельными. Основная распределительная и сбытовая компания Великоустюгского района – МО «Великоустюгские электрические сети».

Пищевая промышленность – третья по значимости отрасль района. С пищевой промышленностью неразрывно связано развитие сельского хозяйства, представленное 11 сельхозпредприятиями, 7 предприятиями переработки, 27 крестьянско-фермерскими хозяйствами и свыше 8200 личных подсобных хозяйств граждан. Посевная площадь основных сельскохозяйственных культур в 2012 г. составила 13,5 тыс. га, в том числе зерновые - 6,56 тыс. га, лен - 0,624 тыс. га. Валовой сбор зерна составил 8,9 тыс. т, льноволокна - 408 т. Большинство крупных сельхозпредприятий района в 1990-2000-е годы были ликвидированы. Из местных предприятий, расположенных в пойме и долине реки (главным образом, вблизи д. Юдино и г. Великого Устюга) следует отметить сельхозпредприятия «Двина», «Усть-лен», производственную базу лицея № 44, очистные сооружения и городскую свалку.

Важное значение в экономике района играет туризм. В туристическом плане выделяется г. Великий Устюг. Великий Устюг – один из древнейших городов Русского Севера. Он вытянут на несколько километров вдоль левого берега р. Сухона, к которой обращены его многочисленные архитектурные памятники, каменные церкви и колокольни, выделяющиеся среди невысокой городской застройки и создающие впечатляющую панораму города своеобразием силуэтов. В городе на государственной охране состоит 154 объекта культурного

наследия, в том числе 45 федерального и 109 регионального значения. С 1998 г, на территории района реализуется туристический проект «Великий Устюг — родина Деда Мороза». Территория Великоустюгского муниципального района характеризуется относительно высокой плотностью транспортной инфраструктуры. В районе имеется 971,8 км дорог общего пользования, из них местного значения 442,2 км, регионального 528,9 км. По территории района проходит магистральная автодорога Р157 «Урень-Шарья-Никольск-Котлас», связывающая его с Костромской, Кировской и Нижегородской областями. В 1998 г. введена в эксплуатацию автодорога «Тотьма – Нюксеница – Великий Устюг».

Котласский район. Муниципальное образование «Котлас» (далее – МО «Котлас») состоит из г. Котласа, пос. Вычегодский и д. Слуда и д. Свининская. Площадь муниципального образования – 7993 га, численность населения – 80,8 тыс. человек. Г. Котлас расположен у слияния р. Малая Северная Двина и р. Вычегда на надпойменных террасах. Котласский муниципальный район расположен в юго-восточной части Архангельской области, площадь его территории — 6,3 тыс. км². Граничит с Устьянским (на западе), с Красноборским (на севере), с Ленским (на северо-востоке), с Вилегодским (на востоке), с Лузским (на юго-востоке) муниципальными образованиями Кировской области; с Великоустюгским муниципальным районом Вологодской области на юге, а также с двумя самостоятельными муниципальными образованиями Архангельской области – городские округа «Котлас» и «Город Коряжма».

В структуре обрабатывающей промышленности 30,7% занимают производства лесопромышленного комплекса, это обусловлено тем, что район богат лесными ресурсами.

В пределах территории, подверженной подтоплению и затоплению в пределах Великоустюгского и Котласского муниципальных районов, проживает чуть более 140,0 тыс. человек, из которых более 120,0 тыс. человек – проживает в г. Великий Устюг и г. Котлас.

С точки зрения транспортного сообщения следует отметить, что многие деревни как Великоустюгского, так и Котласского муниципальных районов, используются как дачи. Летом их население возрастает многократно, что ставит необходимость восстановления автобусного или водного сообщения с ними, которое отсутствует в зимний период или сведено к минимуму.

1.4 Особенности наводнений на исследуемом участке¹

Изучение исторических источников, летописей, описания очевидцев, отметок на зданиях может предоставить важную информацию о характеристиках затопления, которые могут быть использованы в дальнейшем при моделировании динамики наводнений [Сазонов, Савенкова,

¹ Раздел написан на основе статьи [Сазонов, Савенкова, 2013]

2013]. Так, подобный опыт отображен в работе немецких ученых на примере г. Кёльн [Herget, Meurs, 2010].

На протяжении существования г. Великий Устюг, а именно начиная с 1212 г., неоднократно подвергался затоплению. Несмотря на регулярно причиняемый рекой ущерб, фактор выгодного экономического положения оставался определяющим.

Интересно отметить, что первоначально город располагался на месте д. Морозовицы. Город простоял на этом месте вплоть до 1438 г., после чего был перенесен на противоположный, левый берег реки. Одной из причин переноса города стал подмыв берега.

Впервые в летописных источниках разрушительное воздействие наводнения было описано в 1517 году. В книге «Реки Севера» [Ильина, Грахов, 1987] приводится фрагмент летописи: «...в Устюге льдом город стерло, берег срыло, дворов множество снесло и людей многих утопило».

Из этой фразы можно сделать вывод, что ущерб был вызван механическим воздействием льда, а не только затоплением.

В качестве источника датировки современного положения города можно принять год постройки церквей. Самые старые церкви и храмы, расположенные вдоль набережной реки Сухона, относятся к началу XVII в., например, Успенский собор был построен в 1619 г. С этого момента расположение городской черты кардинально не менялось, за исключением появления дачной застройки или отселения домов, расположенных в зоне затопления.

В книге «Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы» Е.П. Борисенков и В.М. Пасецкий, опираясь на исторические летописи, выделяют три крупных наводнения в течение XVII в. – в 1621, 1679 и 1686 гг. [Борисенков, Пасецкий, 1988], однако в летописи не отмечается значительных разрушений, вызванных ими. Это можно объяснить меньшей плотностью застройки пойменной территории, нежели в настоящее время. Интересно отметить, что 1686 г., наблюдалось не только в Устюжском уезде, а и в Тотемском, Вычегодском и Мезенском, о чем свидетельствуют летописи [Полное собрание русских летописей, т. 37, 1982].

Многие климатологи период XVI–XVIII вв. называют малым ледниковым периодом, в связи с резким похолоданием на территории Европы. Причины его возникновения до сих пор остаются дискуссионными. Например, одной из возможных причин могло быть изменение механизма переноса тепла в северном направлении субполярным круговоротом воды [Moreno-Chamorro et al., 2017; Geoffrey, 2013]. В связи с уменьшением температуры в этот период возросла ледовитость в северных морях и реках. Как следствие, увеличилась частота возникновения ледовых заторов, вызывающих наводнения. Только за XVIII в. было зафиксировано пять катастрофических наводнений – в 1723, 1741, 1742, 1761 и 1779 гг. Наводнения в это столетие, вызванные ледовыми заторами, были столь частым явлением, что, например, половодье 1799 г. летописец охарактеризовал как «малая вода», потому что мост через ров не был снесен, а лед был

толщиною в аршин, то есть около 70 см. Частые наводнения, сопровождающиеся движением массивных льдин, ломали суда и сносили мосты, однако судя по описанию современников, подъем уровня воды не превышал 7,5 м относительно современной отметки нуля поста г. Великий Устюг. Приняв во внимание этот факт, можно сделать вывод, что центральная часть города не затапливалась, а затапливались постройки, расположенные на пойме, то есть речной порт и купеческие склады [Сазонов, Савенкова, 2013].

На основании исторического материала, собранного в «Полном собрании русских летописей», можно по косвенным признакам восстановить механизм формирования ледовых заторов. Так, в начале мая 1723 г. очевидец наводнения описывает события следующим образом:

«В ночь зело льду умножилось, а против града лед остановился, и вода начала быть зело велика и рвами лилась на Бутырки и через низкие места в Двину».

Из этих строк можно сделать предположение, что выше по течению г. Великий Устюг, на излучине р. Сухона сформировался затор или серия заторов, которые вызвали подпорное повышение уровня воды с последующим прорывом.

В 1742 г. произошло наводнение, вызванное ледовым затором, образовавшимся вследствие образования торосов льда из-за случившейся оттепели поздней осенью 1741 г., уже после установления ледостава. Подобный сценарий развития событий произошел в 2016 г., однако оттепель произошла не осенью, а зимой. Согласно летописи, в 1742 г. вода дошла до церкви Иоанна Устюжского, высотная отметка которой составляет 60,1 м; это означает, что вода в тот год поднялась на 10,4 м, данная отметка превышает рекордные отметки катастрофических наводнений 1998 и 2016 г.

Спустя 19 лет, в 1761 г., произошло очередное наводнение, нанесшее огромный ущерб городу. Затор сформировался в узле слияния р. Сухона и р. Юг, он был настолько мощный, что вода р. Сухона пошла в обход, переливаясь через шпору излучины. Очевидцы описывают его так:

«Лед на реке Сухоне вскоре от запору остановился, от чего в городе зделалось великое подтопление. И как вода еще умножилась, весь лед потащило ужасным стремлением в оба рва, которым не то что мосты, кузницы и дворы, во рву стоящие, поломало и разнесло, но и по обеим сторонам рва... дома огромного строения быстриною водою от основания опровергло и разнесло».

Согласно современному анализу, максимальная отметка водной поверхности составила 10,2 м, что также превышает максимальный уровень наводнений 1998 и 2016 г., однако она была меньше уровня наводнения 1742г, но продолжительность стояния затора была больше. Это обстоятельство повлекло за собой гораздо больший ущерб.

Впоследствии наводнения повторялись, например, в 1779 г. Они развивались по такой же схеме, однако максимальные отметки уровня были ниже.

В XIX в. в районе г. Великий Устюг было зафиксировано 6 катастрофических наводнений, причем большая часть из них была вызвана ледовым затором – в 1807, 1816, 1817, 1842, 1856 и 1873 гг.

Во время первого из этих наводнений, в апреле 1807 г., из-за действия льда произошло спрямление излучины вблизи устья, позднее образованный проран был расширен и углублен потоком. Позднее, в течение следующих 10 лет, р. Сухона полностью пошла по нему, на том месте, где она располагается в настоящее время, в результате пос. Коромыслово оказался на правом берегу. Это переформирование русла повлияло на положение р. Юг. До образования спрямления устье р. Юг находилось ниже по течению относительно современного узла слияния, в районе д. Кузино. Однако после образования прорана старое русло р. Сухона стало заполняться наносами, и на его месте образовалась пойма, которая достигла отметки 5,5 м над меженным урезом.

Следующее наводнение, 1817 г., отличалось тем, что максимальный уровень воды достиг отметки 8 м, оно было вызвано ледовым затором, вставшим в узле слияния рек.

Наводнение 1856 г. было вызвано дружным таянием снега после многоснежной зимы. Это наводнение повлекло за собой огромный ущерб, были разрушены мосты и затоплены все селения, расположенные на пойме.

Наводнение в 1873 г. произошло позже по сравнению с остальными, оно началось 9 мая и было также вызвано ледовым затором. В этот год река затопила Мироносицкую площадь, ныне площадь Коммуны, причем глубина затопления была настолько велика, что по воде плыли льдины. Большая часть д. Дымково, расположенной на правом берегу р. Сухона, напротив г. Великий Устюг, была снесена льдом. Анализируя описания современников этих событий, можно сделать вывод, что максимальная отметка уровня воды составила около 8,5 м.

Подводя итог обзора наводнений до начала инструментальных наблюдений за уровнем, то есть до 1877 г., можно выделить два катастрофических наводнения, максимальный уровень воды которых превысил 10-метровую отметку (наводнение 1517 г. не относится к ним, так как невозможно достоверно установить границу затопления). Помимо этих двух наводнений, было зафиксировано 14 наводнений, отметка уровня которых достигла или превысила 7 м. Большая часть из них была вызвана установлением ледового затора ниже по течению реки, как правило, в узле слияния р. Сухона и р. Юг, однако часть наводнений была вызвана дружным таянием снега после многоснежной зимы.

Как было отмечено ранее, в 1877 г. были организованы инструментальные наблюдения на гидрологическом посту. За 143 года наблюдений, то есть с 1877 по 2020 г., было зафиксировано три наводнения, во время которых максимальный уровень превысил 9-метровую отметку (1953, 1998 и 2016 гг.), и 9 наводнений, превысивших отметку уровня воды 8 м (1903, 1906, 1929, 1936,

1942, 1946, 1979, 1991 и 2013 гг.) [Сазонов и др., 2019]. Большинство из них было вызвано установлением ледового затора и повлекли за собой значительный ущерб и человеческие жертвы. Упоминания о наводнениях XX в. можно найти в описаниях современников, а порой в виде фотографий на почтовых открытках (рисунки 1.13, 1.14).



Рисунок 1.13. Наводнение 1903 г. на почтовой открытке (из личного архива автора)



Рисунок 1.14. Последствия ледохода 1914 г. на почтовой открытке (из личного архива автора)

В общей сложности за период инструментальных наблюдений г. Великий Устюг подвергался затоплению 22 раза. Самыми крупными со времен наводнения 1953 г. стали наводнения 1998 и 2016 гг.

Наводнение 1998 г. стало одной из крупнейших природных катастроф в Великоустюгском районе в XX в. Стоит отметить, что оно не было неожиданностью для местных властей и местных жителей. Возникновение ледового затора было спрогнозировано за месяц до начала половодья Вологодским областным центром по гидрометеорологии и окружающей среде. Начиная с марта, проводились подготовительные работы, направленные на уменьшение негативного воздействия вод.

Начиная с 27 апреля, уровень воды повышался в среднем со скоростью 30-60 см/сут. В ночь с 30 апреля на 1 мая отметка уровня воды достигла 640 см. 2 мая началось подтопление окраины г. Великий Устюг, а к вечеру этого же дня уровень воды превысил отметку неблагоприятного явления (720 см) и составил 740 см, при этом в зоне подтопления оказалось около 25 улиц, расположенных в юго-восточной части города.

На следующий день, в 6:00 3 мая, уровень воды превысил 8 метровую отметку, тем самым вызвав подтопления участка территории от д. Дымково до пос. Новатор. В 12:00 начался ледоход, однако вскоре произошла его остановка из-за образования ледового затора в районе переката у д. Бобровниково. 4 мая было принято решение о привлечение авиации для проведения бомбометания, однако ледовый затор не удалось ликвидировать.

Вода поступала в город с двух сторон: с юго-востока, со стороны Советского проспекта и с севера-востока, со стороны улицы Дежнева. В 18:30 4 мая они объединились в районе Смольниковского озера. К этому моменту в зоне подтопления оказалось более 300 домов в черте города, около 50 домов в пос. Дымково, расположенной на противоположном от берега берегу, а также полностью подверглись затоплению 2 поселка, Коромыслово и Добрынино и 17 деревень, среди которых оказалась д. Подсосенье, д. Бобровниково и др.

В ночь с 4 на 5 мая, в 3:00, уровень воды достиг своего максимального значения за всю историю водомерных наблюдений г. Великий Устюг — 980 см, тем самым превысив исторический максимум 1953 года (за период инструментальных наблюдений). Утром 5 мая, в 8:30, произошел прорыв затора в районе д. Бобровниково, в связи с чем к 10:00 уровень воды в р. Сухона снизился более чем на 0,5 м. На данный момент в зоне подтопления находилось 4800 домов с населением более 40 тысяч человек, непосредственно в г. Великий Устюг от наводнения пострадало 1478 дома. Общий ущерб от наводнения составил более 300 млн. руб. в ценах 1998 г [<https://tass.ru/spb-news/1061920>].

Наводнение 2016 года является самым крупным со времен 1998 г. Его причиной, как и в большинстве случаев, послужил ледовый затор. Предпосылкой для его формирования стало

необычное сочетание метеорологических факторов в осенне-зимний период 2015-2016 года. Повышенная температура воздуха и выпадение жидких осадков в первой декаде декабря привело к вскрытию реки и началу ледохода. 23 декабря был установлен рекорд уровня воды за весь период инструментальных наблюдений, начиная с 1881 г.: он составил 674 см над нулем поста. Резкое повторное замерзание произошло при высоких уровнях воды (рисунок 1.15), что впоследствии послужило и одним из факторов образования мощного затора.



Рисунок 1.15. Торосы на р. Сухона в районе г. Великий Устюг (декабрь 2015 г.)
(фото Д.Петракова)

6 апреля на р. Сухона начался рост уровня воды, а спустя неделю, 13 апреля начался ледоход, однако спустя сутки лед встал у льдоулавливающей плотины (рисунок 1.16).



Рисунок 1.16. Ледовый затор у льдоулавливающей плотины

После начался резкий рост уровней воды (рисунок 1.17).

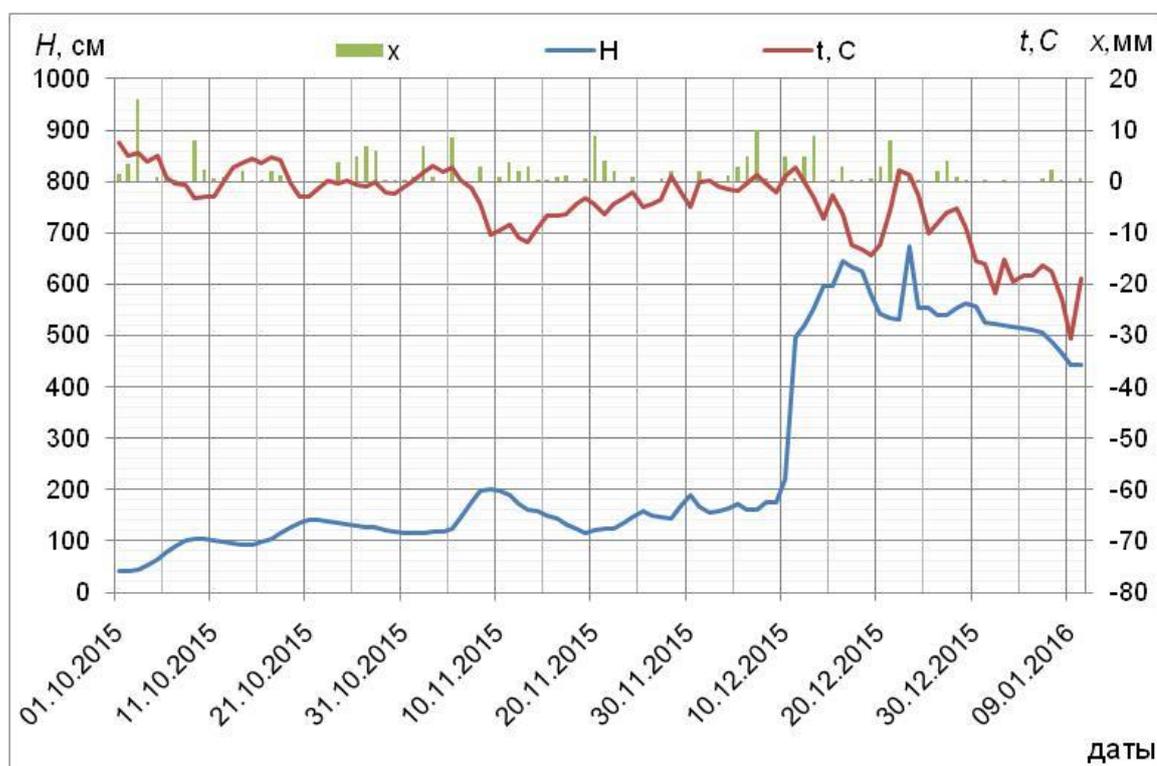


Рисунок 1.17. Изменение температуры воздуха (t) и осадков (x) по м/с Великий Устюг и уровня воды (H) р. Сухона в осенне-зимний период 2015–2016 гг.

Остановка льда была непродолжительной. 14 апреля началось повышение уровня воды в районе г/п д. Каликино на р. Сухона, а уровень воды в районе д. Подсосенье составил 1099 см, тем самым побив исторический рекорд 1953 года. Скорость роста уровня была чрезвычайно большой, за 1 час уровень воды повышался на 1,5 м. Этот фактор привел к тому, что утром следующего дня, 15 апреля, произошел прорыв затора и продвижению льда ниже по течению, в район г. Великий Устюг. Высокий уровень воды в совокупности с большим объемом льда привел к тому, что набережная города, в том числе гидрологический пост оказались под завалами льда. (рисунок 1.18).



Рисунок 1.18. Затор льда на р. Сухона у г. Великий Устюг в апреле 2016 г. (фото Н.Л. Фроловой)

К вечеру 15 апреля лед остановился в 40 км ниже по течению от г. Великий Устюг, при это вода вышла из берегов, огибая тело затора справа стороны. Это обстоятельство привело к затоплению д. Дымково. 14 апреля в Великоустюжском районе был введен режим чрезвычайной ситуации, была привлечена военная авиация. Ледовый затор подвергался бомбометанию, в результате которого удалось несколько понизить уровень воды в районе г. Великий Устюг. Окончательно откачать воду с затопленной части города удалось лишь ко второй декаде мая. Значение максимальных уровней воды различной обеспеченности и критических уровней воды НЯ и ОЯ, при достижении которых происходит затопление (подтопление) г. Великий Устюг приведены в таблице 1.1. Характеристики лет с уровнями воды равными или выше НЯ и ОЯ приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.1. Значение максимальных уровней воды различной обеспеченности и критических уровней воды НЯ и ОЯ, при достижении которых происходит затопление (подтопление) г. Великий Устюг.

Река	Гидрологический пост	Расстояние от устья, км	Период наблюдений	Число лет наблюдений	Отметка нуля поста, м. БС	Установленные отметки неблагоприятных (НЯ) и опасных (ОЯ) гидрологических явлений							
						Неблагоприятные явления				Опасные явления			
						Отметка водной поверхности над нулем поста, см	Отметка водной поверхности над нулем поста, м.БС	Вероятность превышения, %	Продолжительность стояния уровня на отметке НЯ и выше, дни	Отметка водной поверхности над нулем поста, см	Отметка водной поверхности над нулем поста, м.БС	Вероятность превышения, %	Продолжительность стояния уровня на отметке ОЯ и выше, дни
Сухона	г. Великий Устюг	3	1936–2018	82	49,34	720	56,54	25	1–6	960	58,94	1,5	1

Таблица 1.2. Характеристики лет с уровнями воды равными или выше НЯ и ОЯ

Годы с максимальными уровнями воды (равным или выше)		Уровень начала затопления поймы в районе г. Великий Устюг			Средний многолетний		Уровень воды различной вероятности превышения (ВП)									
							1%		5%		10%		25%		50%	
НЯ	ОЯ	Уровень над нулем поста, см	Уровень над нулем поста, м.БС	Вероятность превышения, %	Уровень над нулем поста, см	Уровень над нулем поста, м.БС	Уровень над нулем поста, см	Уровень над нулем поста, м.БС	Уровень над нулем поста, см	Уровень над нулем поста, м.БС	Уровень над нулем поста, см	Уровень над нулем поста, м.БС	Уровень над нулем поста, см	Уровень над нулем поста, м.БС	Уровень над нулем поста, см	Уровень над нулем поста, м.БС
1936, 1942, 1946, 1948, 1953, 1957, 1959, 1969, 1979, 1984, 1991, 1992, 1998, 2005, 2010, 2013, 2016	1953, 1998, 2016	566	55	55	625	55,59	980	59,14	870	58,04	814	57,48	724	56,58	632	55,66

1.5 Заторы льда и факторы их образования

Для северных рек России образование ледовых заторов – одно из наиболее опасных явлений, сопровождающее ледоход, чаще всего весенний. «Затор — это скопление льдин в русле реки во время ледохода, вызывающее стеснение водного сечения и связанный с этим подъем уровня воды» [ГОСТ 19179-73].

Причины формирования заторов могут естественными или антропогенными.

Подробный анализ литературы приведен в монографиях В.А.Бузина (2004; 2009 (в соавторстве с А.Т.Зиновьевым); 2015). В последние годы вопросу их образования посвящен также ряд работ, проведенных в ИВП РАН Е.И. Дебольской [Дебольская, 2014], на Географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова С.А. Агафоновой, Н.Л.Фроловой, А.Н. Василенко [Агафонова и др, 2016; Агафонова и др., 2012; Агафонова, Банщикова, 2019; Фролова и др, 2014, 2016], в Пермском университете В.Г. Калинин [Калинин, 2008; 2009]. Опасным ледовым явлениям посвящена обобщающая работа Д.В. Козлова и др. [Козлов, 2015]. Также Д.В. Козловым и С.Л. Кулешовым с помощью дискриминантного анализа было проведено исследование с целью количественной оценки параметров наводнений заторного генезиса [Козлов, Кулешов, 2019]. На примере речных бассейнов Сибири (р. Обь и водотоки бассейна Карского моря) данным коллективом авторов была построена модель множественной регрессии, позволяющая оценить влияние плановых изменений русла, деления речного потока и изменения его глубин на частоту заторов [Кулешов, Козлов, 2017].

Естественные заторы образуются в местах, где пропускная способность русла уменьшается – на перекатах, излучинах, в узлах слияния рек.

Антропогенные заторы возникают в случае нарушения человеком естественной пропускной способности русла: при возведении опор мостов или трубопроводов, защитных дамб, дорожных насыпей, а также при создании водохранилищ. Однако и прекращение антропогенного воздействия на русло реки может привести к образованию ледовых заторов, например, прекращение проведения дноуглубительных работ на перекатах.

Первая опасность, которую влекут ледовые заторы – это создание подпора, который вызывает резкий подъем уровня воды и может приводить к затоплению жилых и хозяйственные построек, расположенных на пойме как рядом с участком затороформирования, так и значительно выше по течению. Вторая опасность – это прорыв затора из-за возрастающего гидродинамического давления потока, в этом случае ниже по течению наблюдается резкий и кратковременный подъем уровня воды. Во втором случае

затоплению подвергаются только населенные пункты, расположенные в непосредственной близости от головы затора.

Чаще всего ледовые заторы возникают на реках, которые текут с юга на север. Как правило, скорость движения волны половодья на них превышает скорость фронта таяния льда.

Распространение ледовых заторов на территории ЕТР носит повсеместный характер, за исключением южных районов. Вскрытие рек центральных и восточных районов происходит при уровнях воды, близких к пику половодья. При этом прохождение половодья сопровождается интенсивным ледоходом, который приводит к образованию ледовых заторов. Однако наибольшая заторность наблюдается в западных (р. Днестр, р. Западная Двина и др) и северных районах ЕТР (р. Печора, р. Северная Двина, р. Сухона, р. Юг) [Донченко, 1987].

Наиболее подробно механизм формирования заторов описан в монографии В.А. Бузина [Бузин, 2015]. Образование ледового затора происходит в случае, если кинетическая энергия потока недостаточна для разрушения ледяного покрова, таким образом прочность льда, которая в основном определяется его толщиной, является одним из ведущих факторов заторообразования. Кроме того, прочность льда зависит от теплообмена на границе «лед–атмосфера», данный процесс был описан С.Н. Булатовым [Булатов, 1970].

Условия формирования заторов складываются из совокупности факторов – метеорологических и гидрологических, связанных с состоянием водосбора.

К метеорологическим факторам относится приход солнечной радиации, интенсивность осадков, число дней с положительной температурой воздуха за период зимней межени, запас воды в снежном покрове и др. Погодные условия весной определяют начало вскрытия льда. Циклональный тип погоды, то есть низкая температура воздуха и значительная облачность, сдвигает дату вскрытия реки на более поздний срок.

К гидрологическим факторам относятся морфометрические особенности русла, такие как крутизна излучины, глубина русла, его ширина, также немаловажную роль играет водный режим, величина максимального расхода воды, предельный уровень воды и ледовый режим реки.

Большинство из перечисленных факторов можно отнести к неуправляемым [Ильков, Белоусов, 2015], то есть к тем, на которые человек не может оказать воздействие. К управляемым факторам можно отнести пропускную способность русла, которая может быть увеличена путем спрямления излучин и проведения дноуглубительных работ на

перекатах и отмелях, а также прочность льда, которая может быть уменьшена с помощью чернения льда и ледорезных работ.

Для того, чтобы началось ослабление и торошение льда, необходимо резкое повышение уровня воды за счет увеличения расхода воды (стоковой составляющей в подъеме уровня воды). Согласно исследованию В.А. Бузина, она является главным аргументом в эмпирической зависимости, определяющей расходную (стоковую) и ледовую составляющие максимального заторного уровня. Согласно ей, максимальный уровень воды во время установления затора рассчитывается следующим образом [Бузин, 2015]:

$$\Delta H_3 = q_3^{0,6} I^{-0,3} n_p^{0,6} (1,07(r^2 + 1)^{0,3} - \beta \beta^{0,3}) + 0,9 t_{ск} t_{ck}, \quad (1.1)$$

где q_3 – максимальный за период формирования затора расход воды на единицу ширины потока (B) у верхней кромки скопления льдин, равный расходу воды подо льдом при отсутствии фильтрации через затор, м²/с; I – уклон водной поверхности; n_p – коэффициент шероховатости русла; r – отношение коэффициента шероховатости нижней поверхности льда (n_l) к коэффициенту шероховатости русла; β – отношение уклонов водной поверхности при заторе и свободном ото льда русле; $t_{ск}$ – толщина скопления льдин [Бузин, 2015].

Ледовая составляющая в данной формуле зависит от уклона водной поверхности, которая, в свою очередь, меняется по длине затора.

При анализе изменения уровня воды использовалась концепция выделения различных составляющих, которые можно разделить на стоковую (рисунок 1.19-3), заторную (рисунок 1.19-1), подпорную (рисунок 1.19-2), деформационную и т.д.

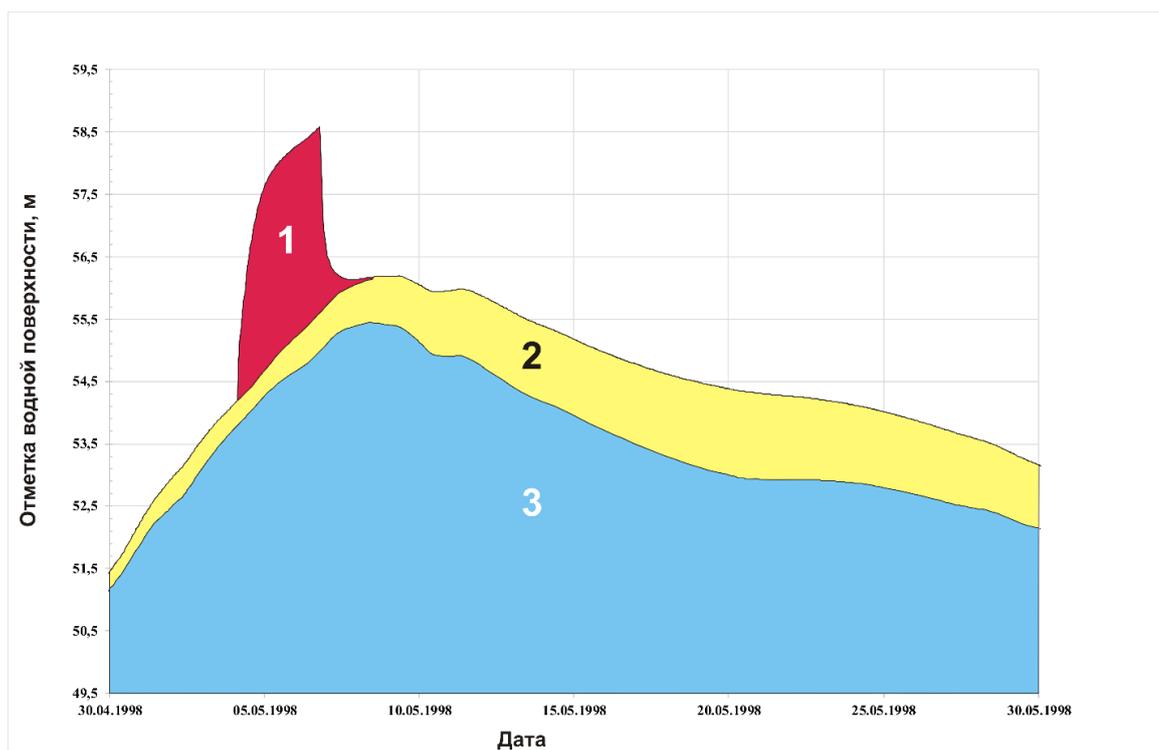


Рисунок 1.19. Выделение генетических составляющих уровней воды (1 – заторная; 2 – подпорная; 3 – стоковая) по гидрологическому посту г. Великий Устюг на основе методов гидродинамического моделирования

Базу этой теории заложил Н.И. Алексеевский [Алексеевский и др., 2005]. Он описал влияние различных факторов на колебание уровня воды и масштаб затопления территории в виде генетического уравнения, где вклад каждой из вышеперечисленных составляющих определяется коэффициентом генетической значимости. Стоковая составляющая определяется при помощи зависимости $Q=f(H)$, где Q — расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$, а H — уровень воды, м. Подпорная составляющая также определяется аналитически на основании эмпирических зависимостей, позволяющих рассчитать величину и дальность подпора. Подобные зависимости приведены в диссертационной работе Н.А. Никитиной [Никитина, 1989]. Заторная составляющая уровня воды определяется по графику изменения уровня водной поверхности по длине реки за определенные моменты времени. Данная методика была разработана Н.М.Бернадским [Бернадский, 1933], позднее она была применена В.С. Антоновым, Н.Г. Маслаевой [Антонов, Маслаева, 1965] и С.Д. Винниковым [Винников, 1978]. На примере р. Северная Двина данный метод подробно был описан в статье Л.С. Банщиковой [Банщикова, 2008]. Заторная и подпорная составляющие также могут быть оценены на основе методов гидродинамического моделирования [Крыленко, 2009; Крыленко, Сазонов и др., 2017].

Высокая доля заторной составляющей в формировании максимальных уровней воды обуславливается притоком талой воды. Наибольшее влияние приток воды оказывает в устье реки. Именно здесь для увеличения скорости течения и начала разрушения ледяного покрова необходим значительно больший подъем уровня воды, нежели в верхнем течении реки.

Формирование критического расхода воды, в свою очередь, определяется состоянием водосбора на момент начала снеготаяния, а именно:

- объемом воды, заключенным в снежном покрове, а также величиной жидких осадков, выпадающих в момент прохождения волны половодья;
- глубинами промерзания почвы на водосборе;
- увлажненностью почвы на момент начала снеготаяния;
- наличием ледяной корки на почве;
- интенсивностью снеготаяния.

Все эти факторы непостоянны и могут меняться год от года. Наиболее значимый фактор среди перечисленных – это величина влагозапаса в снежном покрове. Согласно данным В.А. Бузина [Бузин, 2015], коэффициент корреляции между объемом влагозапаса в снежном покрове и максимальным уровнем воды может достигать для рек ЕТР 0,6.

Следует отметить, что снег не только является основным источником формирования весеннего половодья. Покрывая ледяной покров на реке, он выполняет функцию теплоизоляции, защищая лед от воздействия солнечных лучей.

Помимо расхода воды, на формирование максимального заторного уровня влияет целый ряд других факторов. Одним из них является прочность и объем льда, сформированного за зимний период, и льда, принесенного течением реки.

Еще один фактор, влияющий на характер прохождения весеннего ледохода, – наличие открытых участков воды (полюней): чем больше их суммарная площадь, тем беспрепятственней проходит лед.

1.6 Природные факторы заторообразования и условия формирования катастрофических наводнений на исследуемом участке

Основными участками, где формируются заторы льда, приводящие к наводнениям г. Великий Устюг, являются узел слияния р. Сухона и р. Юг, Аристовские, Бобровниковские и Голодаевские перекаты на Малой Северной Двине [Алабян и др., 2004]. Огромное влияние на формирование заторов на Сухоне оказало прекращение дноуглубительных

работ на перекатах с начала 1990-х годов, приведших к уменьшению глубин на них почти на 30 см.

Крупные заторы на исследуемом участке могут иметь протяженность до 10–20 км. Продолжительность их существования может достигать от 3 до 10 дней. Интенсивность повышения уровней при затороформировании — до 200–350 см/сут. Коэффициент заторности, который показывает отношение лет, когда наблюдалось установление ледового затора к общему периоду наблюдений здесь достигает 72% [Жук и др., 2006].

Подъем уровня воды за счет увеличения расхода воды (стоковая составляющая) для изучаемого участка р. Северная Двина составляет от 37 до 100% от суммарного повышения уровня воды. Соответственно, заторная составляющая колеблется от 0 до 63%. В среднем доля заторной составляющей максимального уровня воды составляет 36% (для тех случаев, когда ледовый затор образуется) (рисунок 1.20).

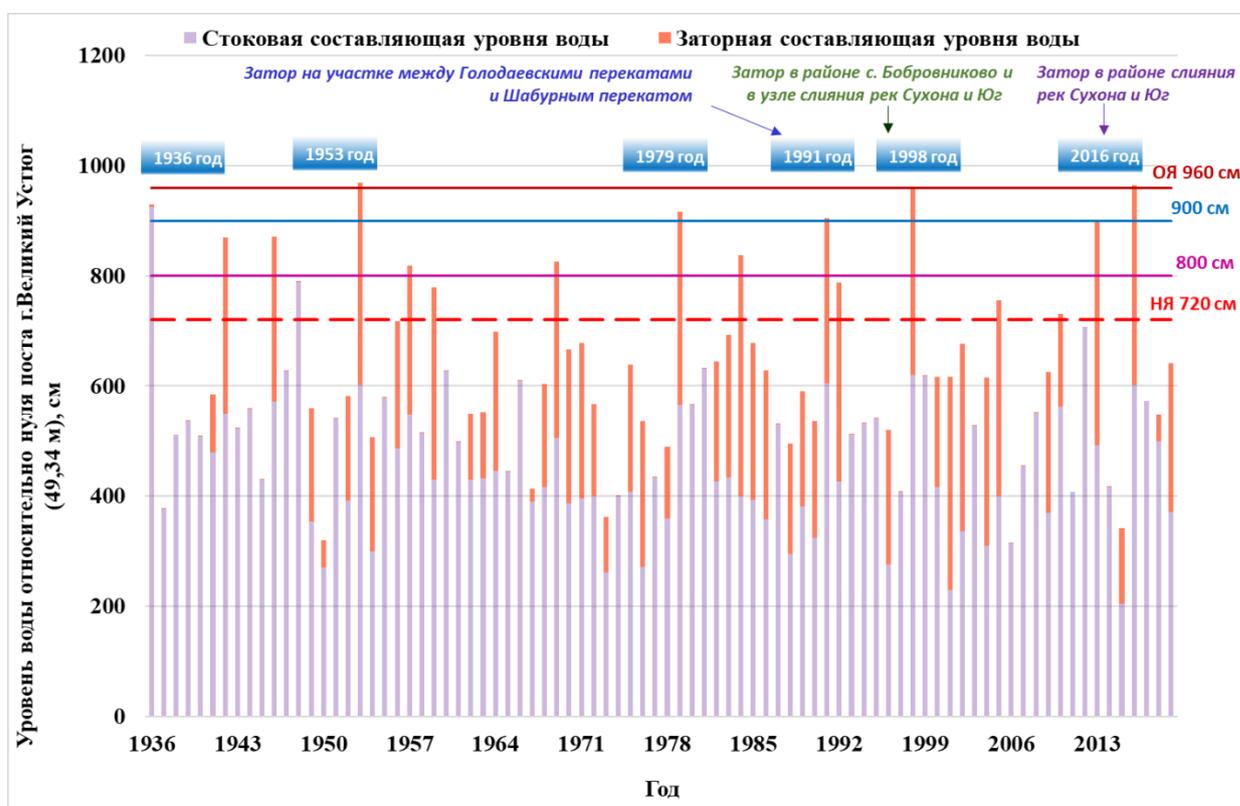


Рисунок 1.20. Стоковая и заторная составляющая максимальных уровней воды за период 1936–2019 гг. р. Сухона – г.Великий Устюг

Для предотвращения ущерба от наводнений, вызванных ледовым затором, необходимо выяснить причины формирования затора на исследуемом участке.

Ниже узла слияния р. Сухона с р. Юг ширина р. Малая Северная Двина увеличивается в 1,5 раза, что заметно увеличивает пропускную способность русла. С другой стороны, ниже слияния расположен целый ряд перекатов, которые способствуют остановке льда во

время весеннего ледохода и служат причиной образования заторов льда (рисунок 1.21). Важную роль в процессе образования ледового затора является комплекс метеоусловий: температура воздуха и жидкие осадки, чем выше значения этих характеристик, тем меньше вероятность образования затора.

Изменение характеристик весенних заторов на реках исследуемой территории весьма неоднозначно. Мощные заторы образуются:

- при высоких осенних уровнях воды;
 - при наличии осенних и зимних зажоров, не разрушенных к началу вскрытия рек;
 - при значительной толщине и прочности льда;
 - при зашугованности русла;
 - при дружной весне, вследствие чего происходит интенсивное поступление талой воды в русло и формирование максимального расхода воды
- при определенной очередности вскрытия р. Сухона и р. Юг и прохождения пика половодья, так как одна река оказывает подпорное влияние на другую.

После катастрофического заторного наводнения 1998 г. в районе г. Великий Устюг ежегодно проводятся противозаторные мероприятия: ледорезные, взрывные и ледакольные работы, чернение льда. Эффективность этих мероприятий требует дополнительного анализа, но очевидно, что они также оказывают влияние на образование или разрушение будущих заторов.

Толщина или мощность затора зависит от толщины льда, сформированного за период зимней межени, и от объема льда, принесенного течением сверху. Вторая составляющая более значима, она формируется из шуги, накопленной в месте стояния затора в предледоставный период, и льдин, принесенных после вскрытия реки. Так, например, в 2016 г. становление ледового затора весной было связано с накоплением льда в русле, вызванного зимним вскрытием реки и последующим ее замерзанием (рисунок 1.22).

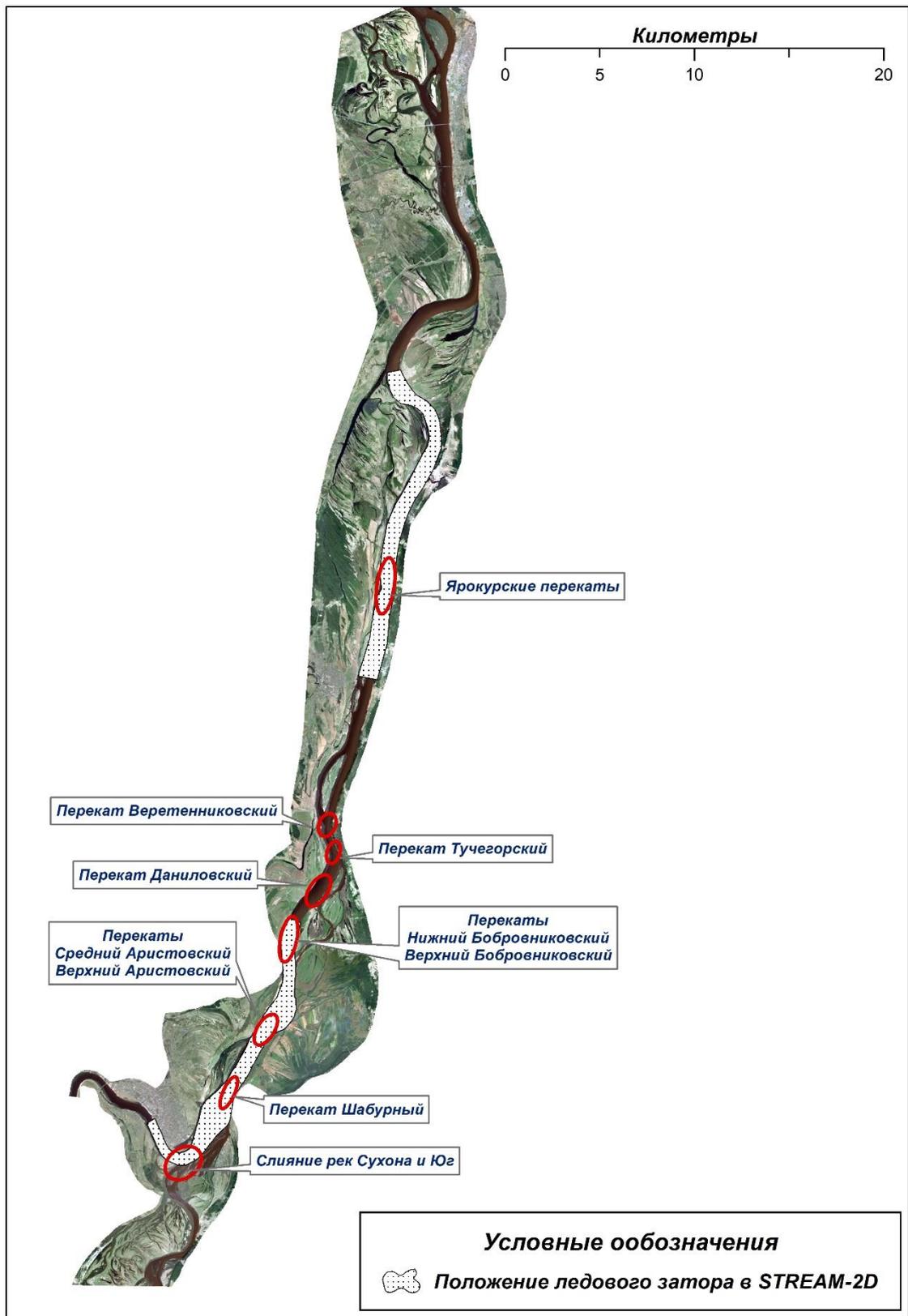


Рисунок 1.21. Положение перекатов ниже г. Великий Устюг



Рисунок 1.22. Река Сухона в районе г. Великого Устюга в декабре 2015 г.
(фото Д.А.Петракова)

Для оценки мощности шуги на момент установления ледостава в гидрологической практике принято использовать максимальный уровень на момент замерзания реки и наименьший уровень воды за период зимней межени. Кроме того, от максимального уровня воды в предледоставный период зависит площадь открытой воды в момент вскрытия реки весной, так как при высоком уровне увеличивается пропускная способность русла.

Интенсивность поступления воды в русло во время таяния снега обусловлена комплексом метеорологических факторов, описанных ранее. Немаловажную роль в образовании ледового затора играет отсутствие резкого понижения температуры воздуха, так как в случае наступления заморозка ледоход останавливается и происходит смерзание отдельных льдин, повышающее прочность и толщину льда. Большой расход воды вызывает увеличение скорости течения и увеличение площади водной поверхности, тем самым влияя на продолжительность ледохода. Следует отметить, что при прохождении расхода воды малой обеспеченности ледовый затор не формируется. В такие годы лед выносится р. Сухона в р. Малая Северная Двина, где скапливается на перекатах. Если весеннее половодье проходит при относительно малых расходах воды, то затор формируется в устье р. Сухона, то есть в месте расположения г. Великий Устюг. Выходу льда из р. Сухона в р. Малая Северная Двина препятствует также подпор, распространяющийся с р. Юг.

1.7 Влияние изменений климатических факторов на образование ледовых заторов²

В настоящее время мировое сообщество гидрометеорологов признало факт глобального потепления [Jones, 1999; МГЭИК, 2014; Santer, 2019]. Одним из показателей изменений климата является изменение режима рек, в том числе ледового. Проведенные ФГБУ «Гидрометцентр России» и ФГБУ «ГГИ» исследования, опубликованные в журнале «Метеорология и гидрология» [Гинзбург, Солдатова, 1997], в трудах ГГИ [Шаночкин, 1991] и в работах коллектива кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова [Vasilenko et al., 2019; Agafonova et al., 2017; Агафонова и др., 2016] показывают изменение сроков замерзания и вскрытия для ряда российских рек.

Также вопросы влияния меняющегося климата на речной и озерный лед освещены в работах В.С Вуглинского [Вуглинский, 2014; Vuglinsky, 2002]. Большой вклад в изучение ледового режима внесли сотрудники Пермского государственного университета [Трофимов, Калинин, 2004; Калинин, 2009; Kalinin, Chichagov, 2018; Калинин, Чичагов, 2019].

При потеплении климата происходит изменение характера замерзания реки: увеличивается доля внутриводного льда и уменьшается доля поверхностного льда. На реках в течение зимнего периода сохраняются участки открытой воды, полыньи, благодаря которым образуется большое количество шуги. Этот факт наглядно подтвердили исследования студенческой экспедиции, организованной кафедрой гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова под руководством автора в феврале 2018 г., на р. Сухона в районе г. Великий Устюг (рисунок 1.23).

² Раздел написан на основе статьи [Agafonova et al., 2017]

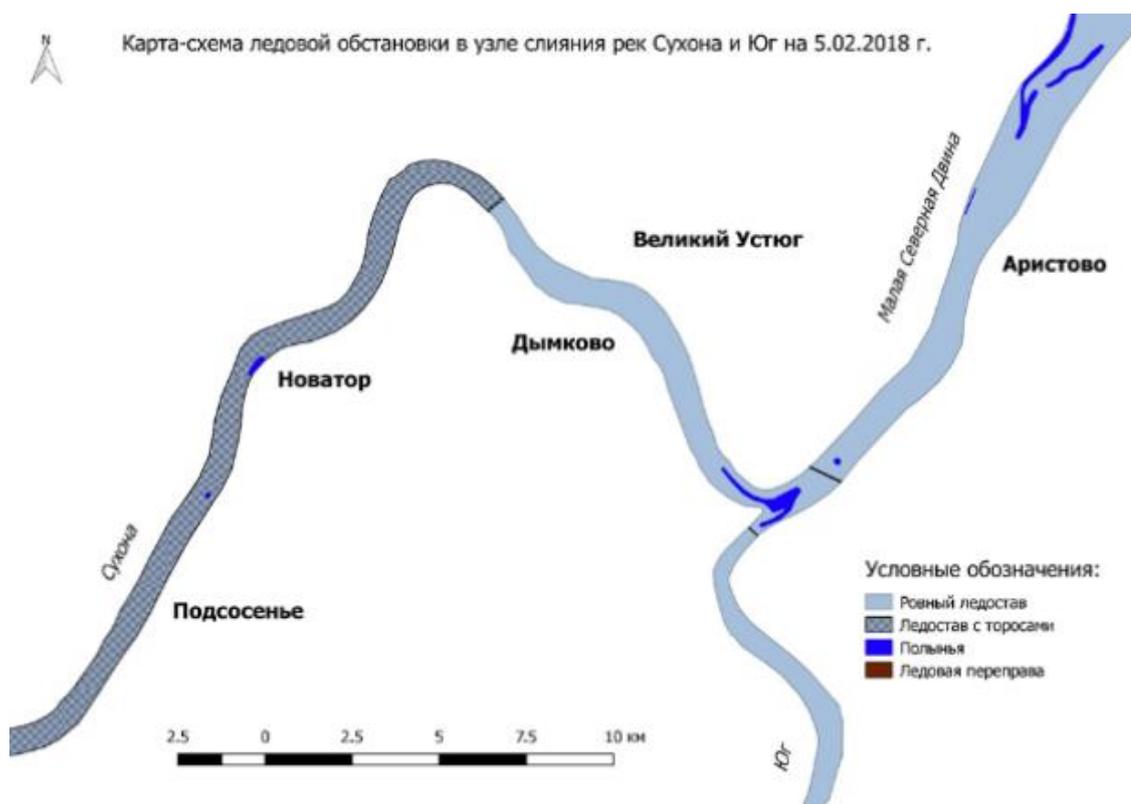


Рисунок 1.23. Положение полыней в районе г. Великий Устюг (наверху) и вид полыньи в узле слияния р. Сухона и р. Юг (внизу, фото автора)

На примере ледового профиля, сделанного в районе пос. Новатор на р. Сухона, можно отметить, что слой шуги подо льдом достигает 2 м (рисунок 1.24).

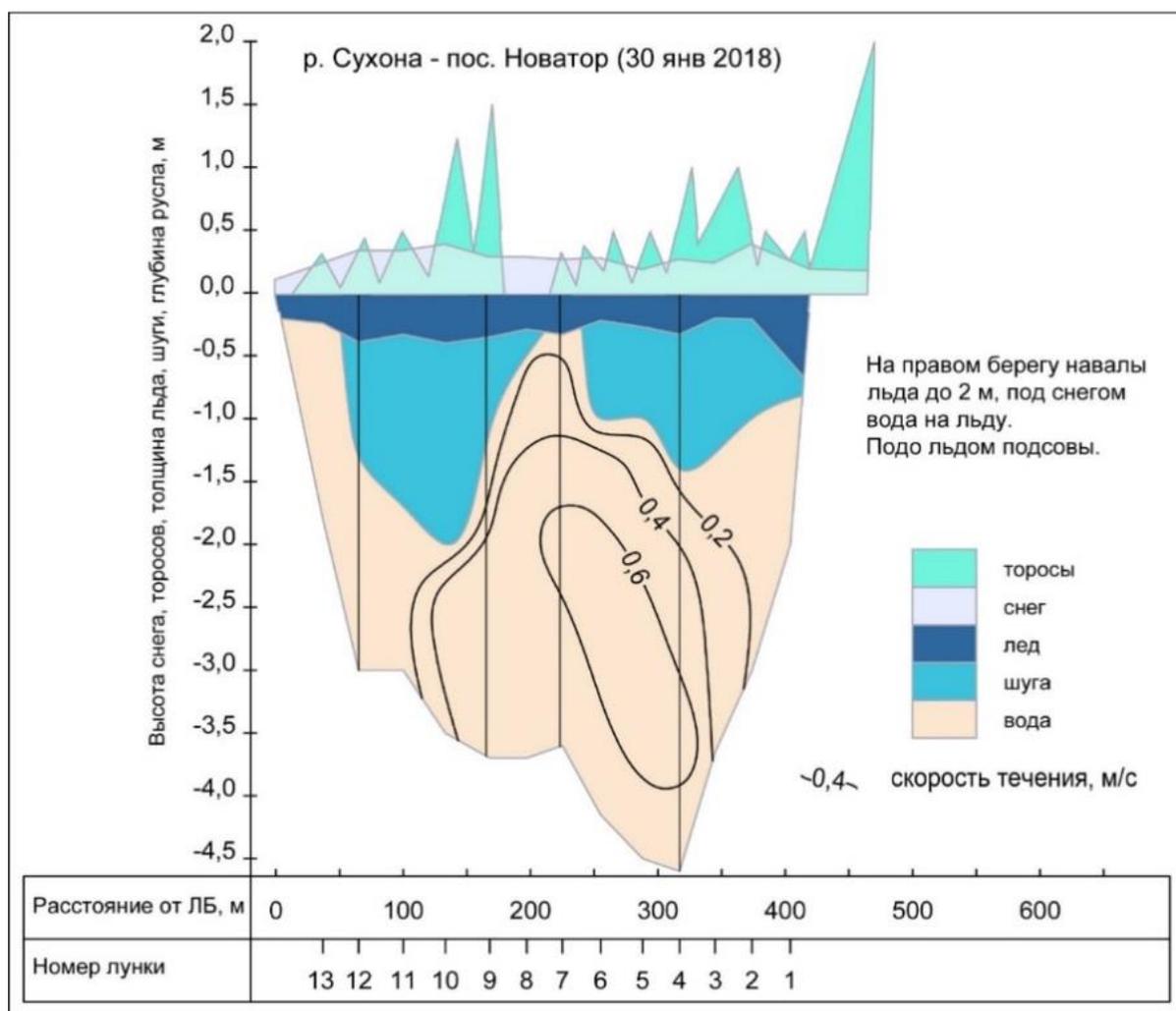


Рисунок 1.24. Результаты ледомерной съемки на реке Сухона в створе пос. Новатор (февраль 2018 г.)

Наличие шуги или внутриводного льда может существенно влиять на пропускную способность русла. Согласно данным В.А. Бузина [Бузин, 2015] в 50–70-е годы XX в. в формировании максимальных заторных уровней ведущим фактором было условие вскрытия реки, а в последующий период главную роль стал играть объем шуги в русле реки. Кроме этого, там же В.А. Бузин утверждает, что потепление климата оказывает незначительное влияние на величину и частоту возникновения заторов, они являются продуктом естественных циклических изменений природных явлений. Это утверждение наглядно подтверждает график колебания максимального уровня воды во время стояния ледового затора (рисунок 1.25). Красной пунктирной линией на рисунке показан тренд изменения высоты заторных уровней. Так как эта линия проходит практически параллельно оси времени, изменений не выявлено.

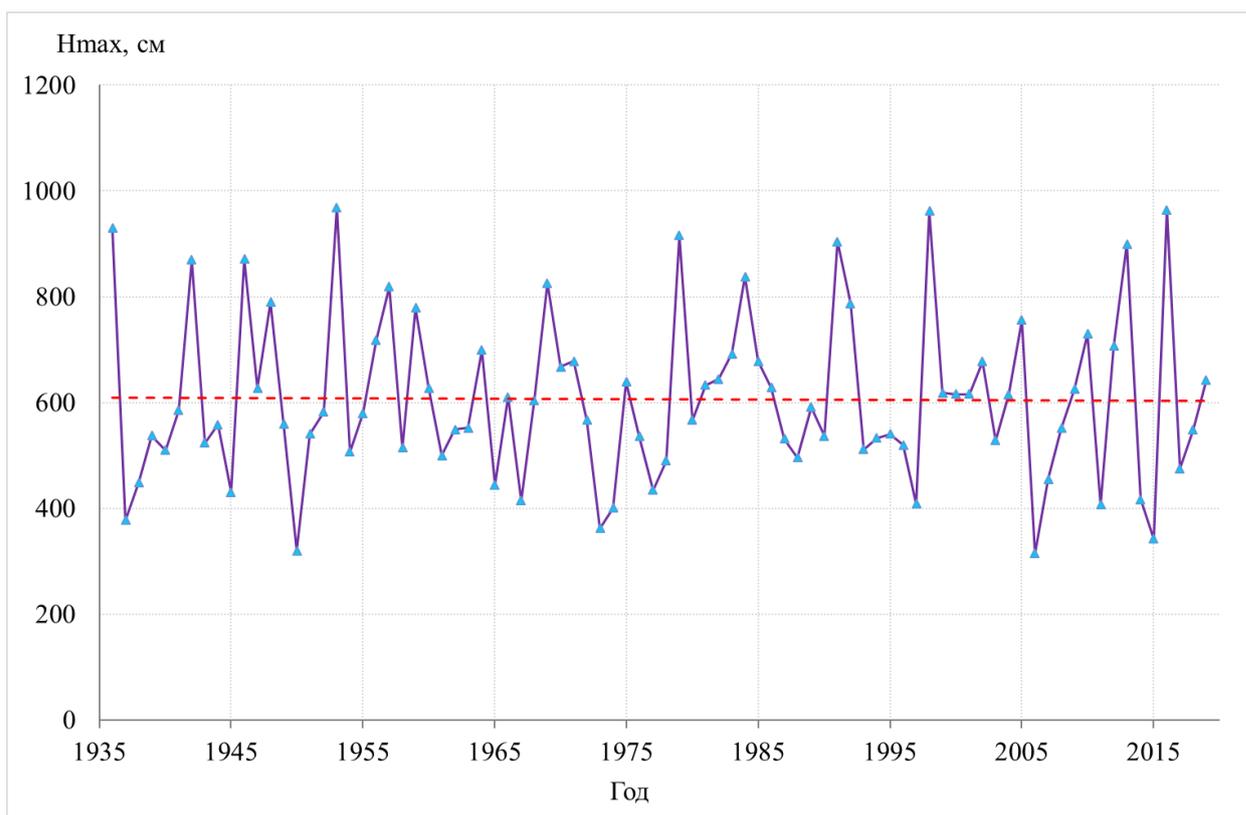


Рисунок 1.25. График колебания максимальных заторных уровней воды р. Сухона по данным гидрологического поста г. Великий Устюг за 1935–2018 гг.

Существующие методики прогноза максимального заторного уровня в исследуемом бассейне основываются на эмпирических зависимостях максимального уровня воды, вызванного установлением ледового затора, от ряда факторов. Все факторы можно разделить на три категории: условия замерзания реки, условия ледостава и условия вскрытия реки.

Первая методика прогноза максимальных заторных уровней для нижнего течения Северной Двины была разработана в 1972 г. сотрудниками ГГИ Р.А. Нежиховским и Н.П. Саковской [Нежиховский, Саковская, 1972]. Согласно данной методике в качестве основного предиктора использовалось среднее значение расхода воды на верхней границе ледяного покрова на ледосборном участке. Позднее, в 1980 г. сотрудником Северного УГМС В.П. Поповым была разработана методика для прогноза максимального заторного уровня в районе г. Архангельска, учитывающая объем превентивных мер, проводимых с помощью ледоколов [Попов, 1980]. В 1984 г. В.Н. Карновичем и Т.В. Кулешовой в методике прогноза максимального заторного уровня в качестве предиктора была введена максимальная интенсивность подъема уровня воды на расположенном выше по течению гидрологическом посту в с. Нижняя Тойма.

Однако в настоящее время наибольшую эффективность показало использование предледоставного уровня в качестве основного предиктора эмпирической зависимости. Это наглядно показано в работах, выполненных сотрудниками МГУ имени М.В.Ломоносова и сотрудниками ГГИ [Каинова, Фролова, 2004; Бузин, 2015]. Коэффициент корреляции для заторных участков между предледоставным и максимальным заторным уровнем воды составляет 0,5 - 0,75 [Агафонова, Фролова, 2007]. При составлении краткосрочного прогноза максимальных заторных уровней (H_{max}) в районе г. Великий Устюг используется зависимость [Каинова, Фролова, 2003]:

$$H_{max} = \sqrt{\Delta Q(H_{пр} - H_{л})}, \quad (1.2)$$

где Q — интенсивность увеличения расхода воды выше по течению (г. Тотьма) между первой подвижкой льда и предыдущим днем, $H_{пр}$ — уровень воды в момент установления ледостава в г. Великий Устюг, $H_{л}$ — максимальная толщина льда на р. Сухона в районе г. Великий Устюг. В монографии В.А. Бузина [Бузин, 2015] приводится зависимость для краткосрочного прогноза максимального заторного уровня, в основе которой также используются аналогичные предикторы, что и в зависимости, полученной С.А. Каиновой и Н.Л. Фроловой, однако она имеет несколько иной вид:

$$H_3 = 0,761H_{пр} + 0,306H_{л} + 237. \quad (1.3)$$

Для краткосрочного прогнозирования подъема уровня воды (ΔH_3), вызванного установлением ледового затора в устье р. Сухона, в качестве предикторов используется расход воды на верхней границе ледяного покрова при вскрытии р. Сухона в районе д. Каликино ($Q_{верхКал}$). Зависимость для прогноза увеличения уровня воды имеет следующий вид:

$$\Delta H_3 = -0,186Q_{верхКал} + 0,990H_{л} + 310. \quad (1.4)$$

Расход воды на верхней границе ($Q_{верхКал}$), необходимый для вычисления подъема уровня воды, вычисляется с заблаговременностью 7 суток по формуле:

$$Q_{верхКал} = 0,673Q_{Наремы} + 0,298Q_{Тотьма} + (M_1\mu_1\Delta F_1 + M_2\mu_2\Delta F_2)10^{-3}, \quad (1.5)$$

где $Q_{Наремы}$ и $Q_{Тотьма}$ — расходы воды р. Сухона у с. Наремы и у г.Тотьма на дату выпуска прогноза, M_1 и M_2 - средние модули стока с южной части бассейна Сухоны, ограниченной створами д. Рабаньга и г. Тотьма, и северной части от г. Тотьма до д. Каликино, л/с · км², $\Delta F_1 = 19800$ и $\Delta F_2 = 14400$ — площади тех же частей бассейна Сухоны, км²; μ_1 и μ_2 - трансформационные функции притока воды с частных бассейнов речных участков д. Рабаньга - г. Тотьма и г. Тотьма - д. Каликино. Заблаговременность прогноза по данной

методике составляет от 2 до 16 суток, в зависимости от величины расхода воды. Оправдываемость данной методики составляет 82% [Бузин, 2015].

Глава 2. Адаптация гидродинамической модели **STREAM_2D** для ключевого участка

2.1 Постановка задачи

В связи с распространенностью такого опасного гидрометеорологического явления, как наводнение, в России существует перечень документов, регламентирующих мониторинг прохождения половодья и связанных с ним ледовых явлений.

Так, например, перечень и критерии опасных явлений описаны в руководящем документе РД 52.04.563-2002, разработанном Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Воейкова и принятом в Росгидромете [РД 52.04.563-2002, 2002]. Кроме того, в рамках реализации Федерального закона «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 21.12.1994 г. был разработан ГОСТ Р 22.1.08-99 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных гидрологических явлений и процессов. Общие требования» [ГОСТ Р 22.1.08-99] и ГОСТ Р 22.1.01-95 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Основные положения» [ГОСТ Р 22.1.01-95]. Данные документы устанавливают общие требования и состав наблюдений, входящих в программу мониторинга и прогнозирования опасных явлений. Согласно их требованиям, система мониторинга и прогнозирования опасных явлений должна включать: объект мониторинга, комплекс технических средств, методы наблюдений и обработки данных, анализ ситуаций и прогнозирование, информационную систему [Фролова, 2012].

Во время прохождения катастрофического наводнения, половодья или паводка на гидрологических постах производится стандартный гидрологический мониторинг, учащенный во время действия опасных гидрологических явлений, с помощью визуальных и инструментальных наблюдений. На основе данных об уровне воды и расходе воды, измеренном или рассчитанном с помощью зависимости расхода воды (Q , м³/с) от уровня (H , м):

$$Q = f(H) \quad (2.1)$$

для гидрологических постов рассчитывается значение уровня водной поверхности, при превышении которого начинается затопление территории.

Гидрологические посты в основном расположены на крупных и средних реках, возле населенных пунктов. Однако данных с гидрологических постов для расчетов и прогнозов стока явно не хватает, а с учетом того, что посты у нас в стране чаще закрывают, чем открывают, необходимы дополнительные способы оценки возможного затопления. И даже

при наличии опорных постов возникает проблема осуществления мониторинга половодий на участках рек между гидрологическими постами. Важной задачей является также построение зависимостей между уровнями воды на гидрологических постах и на затопляемых территориях.

Наиболее простой способ оценки зон затопления – это определение уровня воды, соответствующего поступающему расходу с помощью зависимости $Q=f(H)$ и оценка зоны затопления, соответствующей данному уровню воды на основе планов и топографических карт крупного масштаба (1:2000–1:10 000). Но этот метод не позволяет учитывать особенности прохождения половодий при сложной конфигурации исследуемого участка, а также в случае заторных явлений, подпора и пр.

Одним из ключевых моментов при организации мониторинга во время прохождения половодья является оценка опасности затопления. В книге «Опасные гидрометеорологические явления» [Бузин, 2008] В.А. Бузин различает потенциальную опасность затопления по гидрологическим причинам и потенциальную опасность для освоенной человеком территории. В первом случае она определяется повторяемостью и высотой подъема уровня, без учета социально-экономического фактора. Количественной мерой определения потенциальной опасности затопления по гидрологическим причинам является величина D [Бузин, 2008]:

$$D = (H_{max} - H_n)(1 - p), \quad (2.2)$$

где H_{max} – наивысший наблюдаемый уровень, H_n – уровень выхода воды на пойму, p – повторяемость выхода воды на пойму, выраженная в долях единицы.

Таким образом, опасность возрастает при уменьшении повторяемости, так как возрастает фактор неожиданности. Главная причина большого ущерба, вызванного наводнением, происходящим во время весеннего половодья — это недостаток целостной картины о границе зоны затопления и отсутствия правил использования земель, попадающих в эту зону.

Для получения общей картины о границе зоны затопления на большой территории, например, площадью в десятки или сотни квадратных километров, в последнее время все активнее применяются методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Помимо большого охвата территории, достоинством использования спутниковых снимков является оперативность, достаточно высокое разрешение, возможность применения автоматических алгоритмов для выделения маски затопления и удобства использования в ГИС.

Методы мониторинга природных процессов на основе данных дистанционного зондирования с 1970-ых годов разрабатываются в ряде научно-исследовательских организациях: НИИ Росгидромета и его региональных подразделениях, МГУ имени

М.В. Ломоносова, Институте водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Институте географии Сибирского отделения РАН, Институте космических исследований РАН, Московском государственном университете геодезии и картографии и др. учреждениях [Кравцова, 1980, 1991; Книжников, Кравцова, 1991; Барталев и др., 2016, Региональные проблемы..., 2015, Лаврова и др., 2011 и др.].

В отечественной практике космические снимки применяются с целью мониторинга весеннего половодья и паводков, как для анализ характеристик затопления (площади, конфигурации и т.д.), выявления изменения ледовой обстановки, автоматического составления карт для оценки ущерба от затопления, так и для верификации гидродинамических моделей на основе сопоставления площадей смоделированной затопленной территории и определенной по космическому снимку [Абросимов, Дворкин, 2009; Сидоренко, Романцов, 2010; Евтушенко и др., 2009; Ромасько и др., 2010; Лупачев и др., 2010].

Но применения методов дистанционного зондирования недостаточно, чтобы оценить и тем более спрогнозировать возможные ущербы от затопления жилых и хозяйственных построек, средств коммуникации. Необходимо иметь представление о возможном диапазоне характеристик потока и их зависимости от расходов воды, ледовых явлений и других факторов. Их количественная оценка и прогноз возможны на основе разного рода моделей.

Теоретические основы гидравлического моделирования были заложены в XIX в., в 30–40-е годы XX в. для решения инженерных задач гидравлики открытых потоков широко применялись физические модели. Математическое моделирование движения водного потока основано на разработке и решении математических уравнений, реализующих известные законы гидравлики, отображенные впервые в работах французских ученых Сен-Венана и Буссинеска. Теоретические положения были разработаны в начале прошлого столетия, однако широкое применение математическое моделирование получило с развитием электронно-вычислительной техники. Наибольшее распространение к настоящему времени получило использование уравнений Сен-Венана в одномерной и двумерной схематизации [Кюнж, 1985; Ляхтер, 1984; Беликов и др., 2003]. Численное решение данных уравнений реализовано в ряде программных комплексов: FLOOD, RIVER и STREAM_2D (Россия), разработанные В.В. Беликовым, А.Н. Милитеевым и др. [Belikov, 2018], Mike 11 и Mike 21 DHI (Дания) [Skotner C. et al., 2005], Delft 3D (Нидерланды) [Kerin et al., 2018], HEC-RAS (США) [Rangari et al., 2019], FLO-2D [Piacentini et al., 2020], TELEMAC (Франция) [Pavlíček, Bruland, 2020] и др.

В данной работе использовалась двумерная модель STREAM_2D, широко применяемая в России для решения научных и прикладных задач [Алексеевский, 2014]. Ее первыми версиями были модели RIVER и FLOOD [Беликов, Милитеев, 1992; Беликов и др., 2003; Алабян, 2004]; обновленная версия для распараллеленных вычислений была зарегистрирована под названием STREAM_2D [Беликов, Кочетков, 2014], а наиболее современная версия модели STREAM_2 CUDA позволяет производить вычисления на процессоре видеокарт [Belikov et al., 2018].

Модель STREAM_2D базируется на численном решении двумерных уравнений Сен-Венана, известных как уравнения мелкой воды. Данные уравнения получаются путем интегрирования по глубине уравнений Навье-Стокса при условии, что горизонтальный масштаб намного больше вертикального и допущении, что вертикальные скорости в жидкости малы. Ситуации, когда глубина акватории намного меньше ее горизонтальных размеров, достаточно распространена в случае русел и пойм равнинных рек, поэтому уравнения мелкой воды находят широкое применение.

На период весеннего вскрытия рек, ледохода и формирования ледовых заторов в двумерных гидродинамических моделях необходимо учесть дополнительные факторы, связанные с движением льда: коэффициент шероховатости льда, уменьшение средней глубины потока за счет заполнения русла льдом, места образования заторов, время начала образования затора и время его разрушения. Эти факторы учтены авторами модели STREAM_2D путем следующей модификации уравнений Сен-Венана [Алексюк, Беликов, 2017]:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial\left(hu^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh\frac{\partial b'}{\partial x} + \frac{\tau_1^b + \tau_1^i}{\rho}, \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial\left(hv^2 + \frac{1}{2}gh^2\right)}{\partial y} = -gh\frac{\partial b'}{\partial y} + \frac{\tau_2^b + \tau_2^i}{\rho}. \end{cases} \quad (2.3)$$

где (x, y) и t — декартовы координаты и время, $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ и $h(x, y, t)$ — усредненные по глубине компоненты скорости и глубины потока соответственно.

$$b' = b + \rho_i H / \rho, \quad (2.4)$$

где b — отметки дна, ρ, ρ_i — плотность воды и льда, H — толщина льда; τ_k^b, τ_k^z — касательные напряжения на поверхности дна и льда; g — ускорение свободного падения; b — отметки дна, ρ, ρ_i — плотность воды и льда, H — толщина льда; (τ_1^b, τ_2^b) и (τ_1^i, τ_2^i) — касательные напряжения на поверхности дна и льда.

Для касательных напряжений на поверхности дна и свободной поверхности в этом случае применяется одна и та же эмпирическая формула Маннинга с разными коэффициентами шероховатости (n_b – для дна, n_i – для льда):

$$\frac{1}{\rho}(\tau_1^b + \tau_1^z, \tau_2^b + \tau_2^z) = -g(n_b^2 + n_i^2)h^{-\frac{1}{3}}\sqrt{u^2 + v^2}(u, v). \quad (2.5)$$

Таким образом, гидродинамика рассматриваемых течений рассчитывается путем решения классических уравнений мелкой воды, но с повышенными значениями отметок дна и с учетом дополнительного трения, описывающего трение о внутреннюю поверхность ледяного покрова.

В качестве граничных условий используются для решения системы уравнений (2.5) расходы воды на верхней и уровни воды на нижней границе расчетного участка как функции времени, в качестве начальных - уровни водной поверхности и скорости течения на начало расчета.

Для учета ледовых явлений при моделировании необходимо дополнительно задать значение плотности льда, переменные во времени и по области моделирования толщину льда и коэффициент шероховатости льда. Коэффициенты шероховатости льда необходимо подбирать в процессе калибровки модели для периода с ледовыми явлениями, включая наблюдавшиеся случаи заторообразования путем сопоставления рассчитанных и наблюдаемых уровней в этот период.

Результатами моделирования на основе двумерной гидродинамической модели являются поля отметок водной поверхности, глубин воды, векторные поля осреднённых по вертикали скоростей течения во всех расчетных ячейках модели, границы затопления [Крыленко, 2007].

2.2 Основные этапы построения двумерной гидродинамической модели

Процесс моделирования условно можно разделить на подготовку исходных данных, необходимых для модели STREAM_2D, их ассимиляцию с помощью редактора RedKomar, выполнение непосредственно самого расчета и визуализацию полученных результатов:

1. На первом этапе создания модели производится подготовка исходных данных, сбор информации. Непосредственно на реке проводятся изыскания, в ходе которых производится описание местности, измерение уклонов водной поверхности, промеры глубин, оценка высотных отметок максимального подъема уровня воды. Помимо полевых работ собирается архивная информация об уровнях и расходах воды, анализируются

космические снимки с целью получения информации о подстилающей поверхности и масштабах затопления.

2. На основе картографического плана крупного масштаба исследуемого участка долины или космического снимка выделяется область моделирования, для которой строится расчетная сетка. В модели STREAM_2D используются треугольные, прямоугольные, треугольные и гибридные (треугольно-прямоугольные) расчетные сетки, имеющие нерегулярную топологическую структуру [Беликов, 2000, 2002]. В результате построения создается группа файлов, которая содержит информацию о количестве ячеек, типе ячеек, количество узлов и т.д. Тип расчетной сетки выбирается, исходя из формы объекта, для которого она строится.

3. С помощью обработки в ГИС-пакетах на основе карт, планов, результатов полевых изысканий, а также привлечения проектной документации гидротехнических сооружений создается файл, содержащий информацию о пространственном положении точек и их высотах. Данные о рельефе дна русел могут быть получены в результате промеров глубин или сняты с лоцманских карт; данные о высоте и рельефе пойм могут быть получены с крупномасштабных топографических карт и планов или получены в результате нивелировок при полевых работах. Отметки поверхности интерполируют в центры ячеек расчетной сетки, формируя «файл рельефа».

4. После подготовки расчетной сетки и рельефа пользователем создаются файлы, отвечающие за начальные и граничные условия, а также за параметры счета. Для каждой входной границы создается отдельный файл, в котором записаны расходы воды, соответствующие определенному моменту времени. В файле, отвечающем за нижнее граничное условие, задается уровень воды на нижней границе модели за различные времени или задается кривая зависимости расхода воды от уровня. Кроме того, пользователем задаются параметры счета, например, моменты времени, для которых должен быть осуществлен вывод результатов или количество часов счета.

5. Результаты расчетов сохраняются в текстовых файлах за заданные моменты времени. Существует несколько типов результирующих файлов: файл, содержащий в себе информацию о векторах скорости, файл, содержащий информацию об уровнях водной поверхности во всех расчетных ячейках и файлы, описывающие изменение уровня воды и скорости течения для различных моментов времени для заданных пользователем контрольных точек. После проведения расчетов выполняется их визуализация в виде графиков и карт.

2.3 Описание двумерной модели участка р. Малая Северная Двина (участок от узла слияния рек Сухона и Юг до г. Котлас)

Участок р. Малая Северная Двина для гидродинамического моделирования включает в себя узел слияния рек Сухоны и Юга и всю р. Малая Северная Двина до ее слияния с р. Вычегда (общая протяженность 69.5 км).

Исходными данными для моделирования являлись:

▪ Результаты экспедиционных изысканий географического факультета МГУ в 2013 г. [Отчет о научно-исследовательской работе, 2013], включая промеры глубин; отметки урезов водной поверхности; измеренные расходы воды и скорости течения; морфометрию долины по ключевым створам, в том числе высоту дорожных насыпей и других сооружений на пойме.

• Векторизованный рельеф с топографических карт (масштаба 1:25 000, 1:50 000), и планов г. Великий Устюг (масштаба 1:10 000).

• Данные гидрологических постов за многолетний период, включая расходы воды по гидрологическим постам р. Сухона – д. Каликино, р. Юг – д. Гаврино, р. Юг – с. Кичменгский городок для задания расходов воды на верхних границах модели, уровнях воды р. Северная Двина – г. Котлас - для задания уровней воды на нижней границе модели, уровнях воды по г/п р. Сухона – г. Великий Устюг, р. Северная Двина – д. Медведки в качестве контрольных для калибровки и верификации модели.

• Данные о ледовых явлениях по перечисленным гидрологическим постам за многолетний период.

• Разновременные космические снимки.

Цифровая модель рельефа пойм (ЦМР) была получена путем оцифровывания топографических карт. На основе имеющихся промеров, пересчитанных в абсолютные отметки, и полученных с карт границ русла была сформирована цифровая модель рельефа для всей области моделирования (рисунок 2.1).

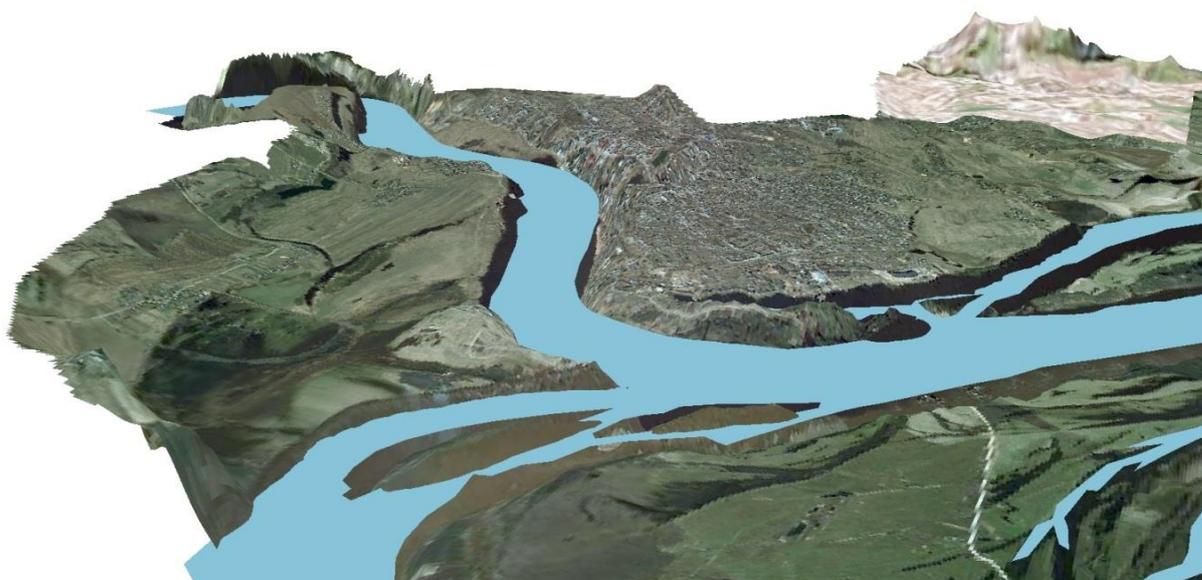


Рисунок 2.1. Цифровая модель рельефа узла слияния рек Юг и Сухона

При помощи специального инструмента программы ArcGIS 10.2 все оцифрованные объекты были преобразованы в точки с целью дальнейшей обработки в программе RedKomar (рисунок 2.2).

Для расчетов применялись гибридные треугольно-четырёхугольные сетки нерегулярной структуры. Для русла использовалась четырёхугольная сетка, а для поймы – треугольная. Всего расчетная сетка содержит более 50 тыс. ячеек с длинами сторон от 40–50 м в русле до 100 до 250 м на пойме. На первом этапе калибровка и верификация модели выполнялась по материалам полевых изысканий, а также данных гидрологических постов за многолетний период. При коэффициентах шероховатости русел 0,025, пойм – 0,05, территории городской застройки – 0,08 удалось добиться хорошего соответствия смоделированных и фактических уровней воды по г/п г. Великий Устюг, г/п. Медведки, с расхождением в диапазоне $\pm 0,15$ м [Agafonova et al., 2017]. Дальнейшее уточнение параметров модели для периода ледовых заторов будет детально рассмотрено в разделе 2.6.

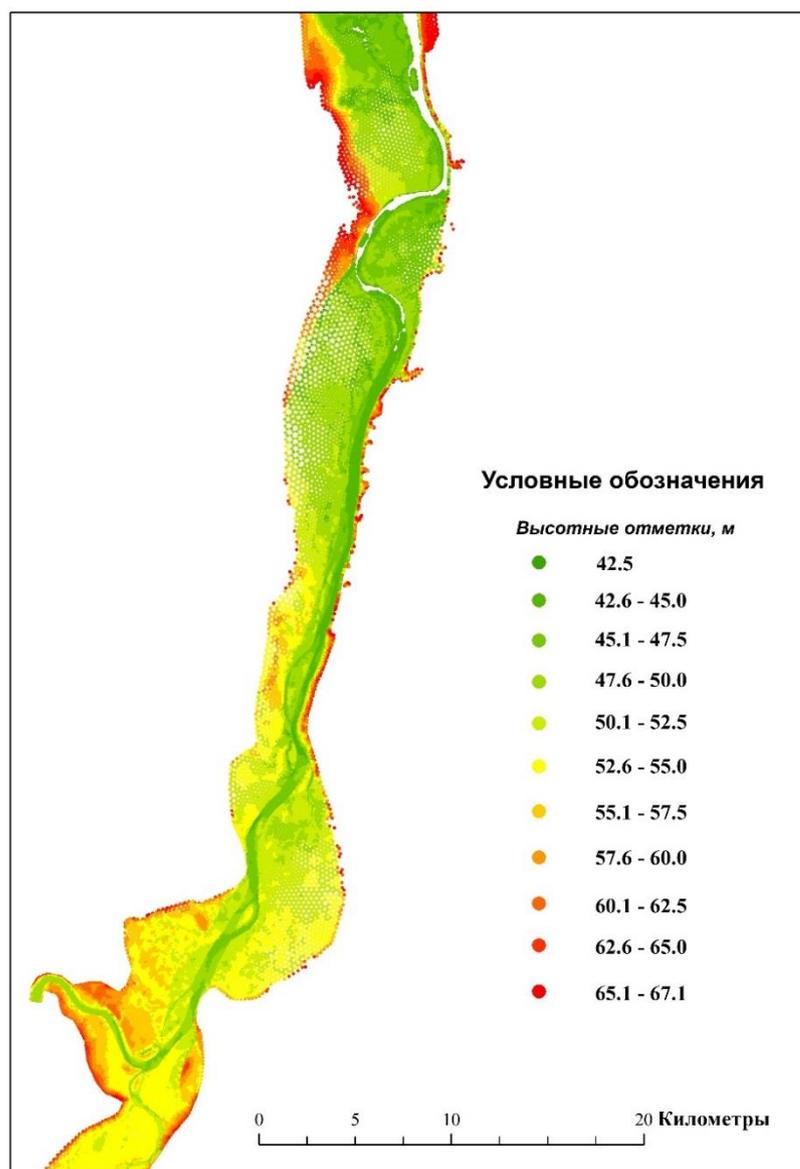


Рисунок 2.2. Исходное поле высотных отметок

2.4 Описание высокодетальной модели узла слияния р. Сухона и р. Юг (участок г. Великий Устюг)³

Традиционно моделирование затопления на урбанизированных территориях выполняется с помощью повышения коэффициента шероховатости на застроенных участках. Однако такой подход имеет ряд недостатков, т.к. при моделировании затопления городских кварталов практически не учитывается гидравлическое сопротивление отдельных зданий, их формы и размера. При этом применение детальной расчетной сетки, учитывающей характер застройки, для моделирования затопления городских территорий в

³ Раздел написан на основе статей [Sazonov et al., 2020; Сазонов и др., 2020]

настоящее время не значительно распространено из-за высоких требований к исходной информации и машинным ресурсам. В России первый опыт подобного моделирования был получен в ИВП РАН под руководством В.В. Беликова для г. Ярославль и г. Крымск [Норин, 2016]. В данной работе на примере г. Великий Устюг впервые предпринята попытка использования аналогичного подхода с учетом зданий при формировании ледового затора.

Для реализации данного подхода в рамках уже существующей гидродинамической модели территории от слияния рек Сухона и Юг до г. Котлас был выбран относительно небольшой участок, в пределах которого расположен г. Великий Устюг, протяженностью менее 10 км, и для него построена высокодетальная расчетная сетка для вложенной двумерной гидродинамической модели. При этом здания, расположенные на моделируемом участке, в детальной модели представлены в виде бесконечно больших строений и исключены из расчетной сетки. В таком случае на улицах, то есть на участках между «вырезанными» домами, появляется возможность с большой детальностью воспроизводить динамику водного потока, скорость течения и влияние подпора.

2.4.1 Исходные данные для построения детальной сетки на территорию города Великий Устюг

Исходной информацией в зданиях являлись данные Open Street Map, выбранные из ГИС-проекта, приобретенного в компании Next GIS (рисунок 2.3). Данный ГИС-проект содержит 27 слоев: дороги, гидрографическая сеть, административные границы, здания и др. Вся информация представлена в формате ESRI Shape в системе координат WGS84, всего в черте города располагается 3276 жилых и хозяйственных построек различного назначения [Sazonov et al., 2020; Сазонов и др., 2020].



Рисунок 2.3. Полигональный SHP-файл жилых и хозяйственных строений г. Великий Устюг

В связи с тем, что вся исходная модель была выполнена в системе прямоугольных координат Пулково-42 (8-я зона), все данные OSM были конвертированы в нее. Для построения расчетной сетки было выполнено несколько подготовительных этапов в программе QGIS 3.10.

На первом этапе была произведена визуальная оценка полигонов, отображающих здания и проведена ручная корректировка в случае обнаружения вложенных друг в друга полигонов или пересекающихся в единственной точке контуров зданий. Причина, по которой необходимо выполнять подобное редактирование, – образование острого угла, построение сетки внутри которого невозможно.

Далее территория города была разбита на отдельные полигоны с размером ячейки 250 х 250 м с возможностью отдельной обработки каждого из них. Отдельно следует отметить, что для наилучшего построения сетки необходимо, чтобы ориентация полигонов совпадала с общим направлением улиц города.

На заключительном этапе подготовки данных была выполнена конвертация всей группы объектов (полигональных зданий и линейной сетки, наложенной на город) из формата SHP, используемого в ГИС-пакетах, в формат DXF, используемого в программе Auto CAD и в программе-сеткостроителе AutoMesh-2D (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4. Территория г. Великий Устюг, разделенная квадратными полигонами в формате DXF

2.4.2 Построение расчетной сетки в программе Automesh-2D

Для построения детальной сетки использовалась программа AutoMesh-2D, первоначально разработанная в Шаньдунском университете (г. Цзинань, Китай) для формования металлических деталей (рисунок 2.5) [Ma et al, 2011]. Однако, в дальнейшем эта программа нашла применение и для построения расчетных сеток для других задач, в том числе для гидродинамического моделирования [Norin et al., 2017; Sazonov et al., 2020].

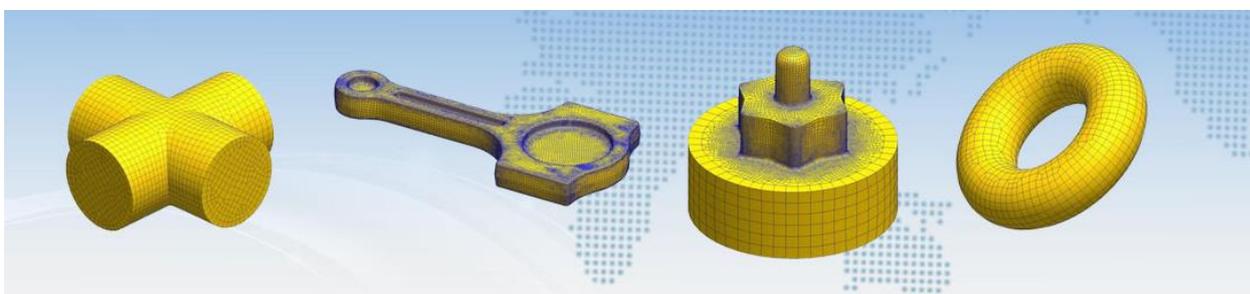


Рисунок 2.5. Пример использования программы AutoMesh-2D для построения сетки при моделировании металлических деталей

При построении расчетной сетки в программе AutoMesh-2D можно выделить несколько этапов:

1. Разделение области моделирования на отдельные участки, ограниченные линиями. Именно на этом этапе происходит разделение рассматриваемой области на два класса: «застройка» и «область затопления». Также на этом этапе происходит разделение области построения сетки на отдельные квадратные полигоны, , наложенные в программе QGIS на город (рисунок 2.6).

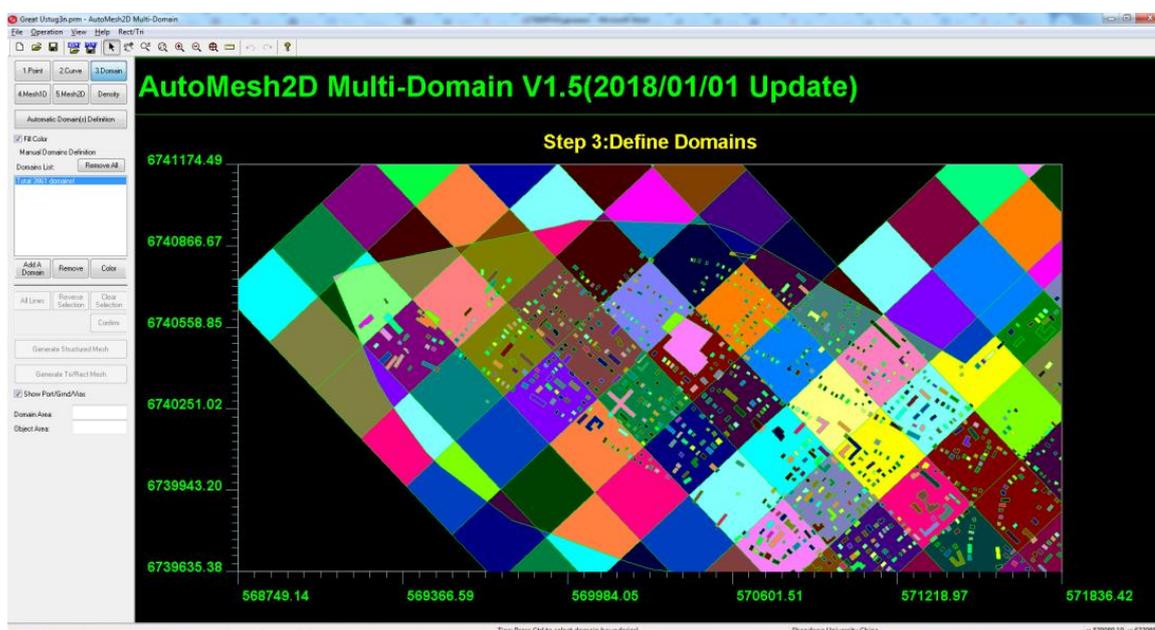


Рисунок 2.6. Область построения сетки, разделенная на квадратные сектора в программе Automesh-2D

2. На втором этапе происходит разбиение линий на интервалы (рисунок 2.7). В программе AutoMesh-2D пользователю предлагается выбрать метод разбиения – по длине заданного отрезка или по количеству интервалов. В данной работе разбиение происходило по отрезку длиной 10 м, в случае, если длина здания составляла менее 10 м, то программа устанавливала точку на концах отрезка. Именно этот способ разбивки был выбран, так как в случае разбиения по количеству интервалов расчетная сетка получилась бы неравномерной: на маленьких отрезках было бы сгущение узлов, а на больших – наоборот.

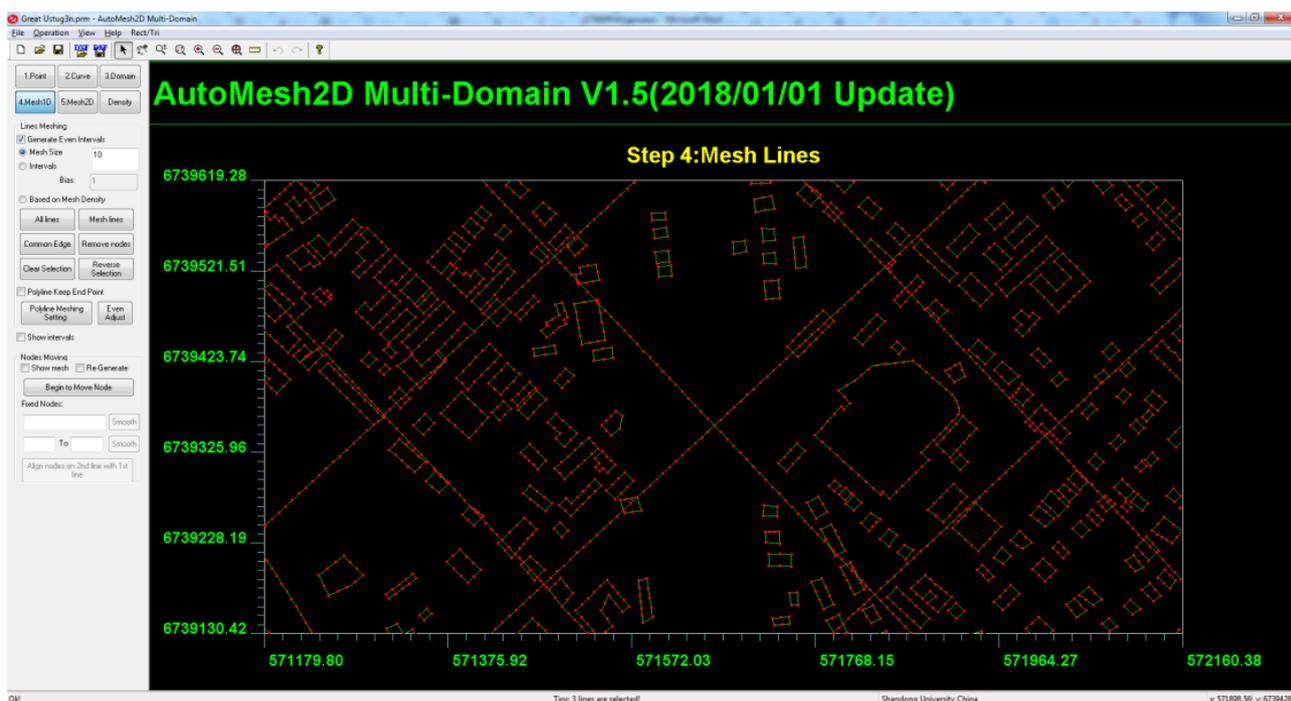


Рисунок 2.7. Пример разбиения линейных границ городских зданий на отрезки в программе Automesh-2D

3. На третьем этапе было выполнено непосредственное построение сетки. Программа AutoMesh-2D позволяет строить сетки, используя различные алгоритмы, причем как прямоугольные, так и треугольные. Для городской территории была использована нерегулярная прямоугольная сетка, которая хорошо адаптируется под очертания улиц и зданий. Алгоритм, использованный для построения сетки, описан в статье южнокорейскими учеными [Lee et al, 2003].

4. После построения сетки была выполнена ручная корректировка проблемных участков. Программа Automesh-2D позволяет автоматически определить некорректно построенные ячейки сетки по одной из семнадцати классификаций: по максимальному углу между линиями сетки, минимальному углу, пропорции сторон четырехугольника или треугольника, искажению, форме, якобиану и т.д. На рассматриваемом участке было вручную исправлено около 100 ячеек сетки с предварительным упорядочением некорректных элементов по искажению и пропорции сторон. Преимущественно подобные элементы возникали на границе сетки, предварительно наложенной на очертание города (рисунок 2.8).

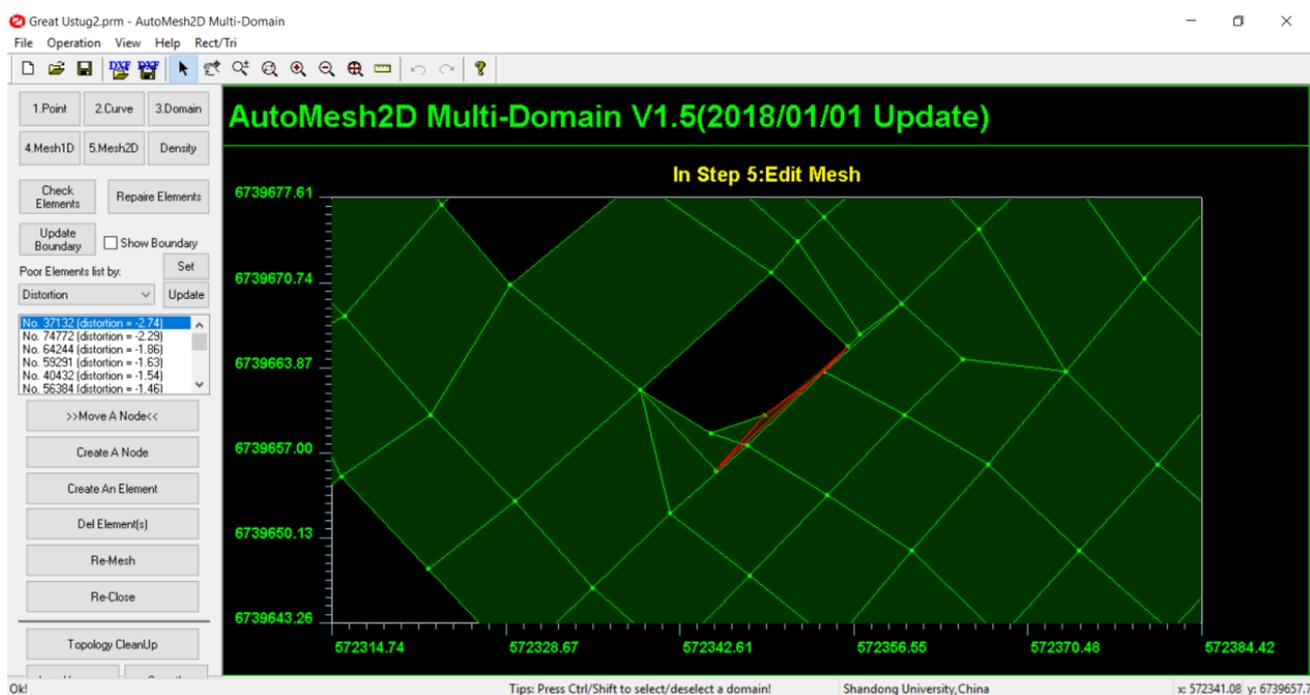


Рисунок 2.8. Пример некорректно построенного участка четырехугольной сетки в программе Automesh-2D

5. Заключительным шагом стала адаптация сетки, построенной в программе AutoMesh-2D в формате MSH, в входной формат модели STREAM_2D.

Построенная таким образом детальная расчетная сетка на 10 км участок в районе г. Великий Устюг содержит 122 404 ячейки и 129 535 узлов (рисунок 2.9, 2.10). Граничные условия для вложенной детальной модели для города Великий Устюг переносились с основной модели всего участка [Sazonov et al., 2020; Сазонов и др., 2020].

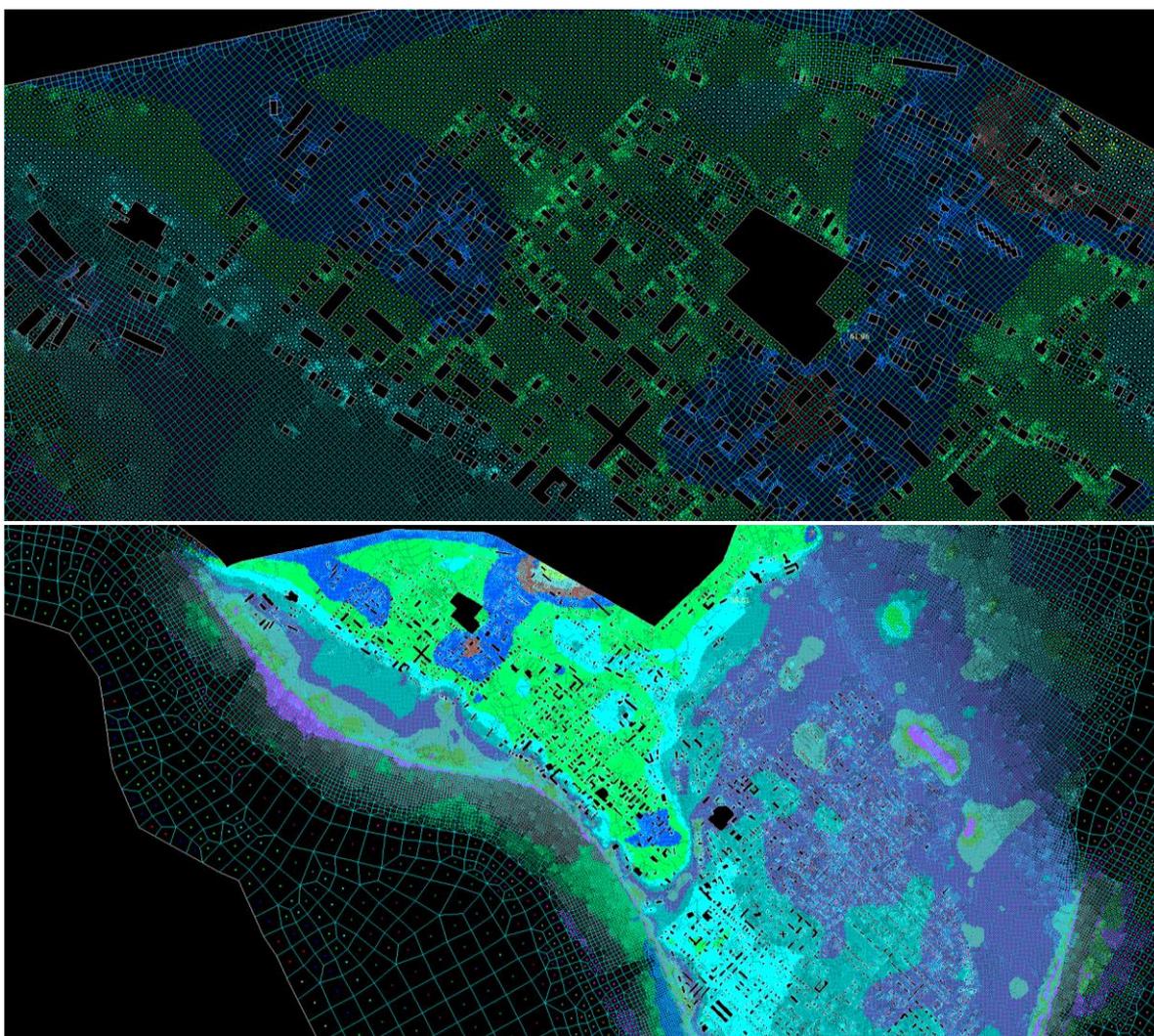


Рисунок 2.9. Фрагмент детальной модели города Великий Устюг в программе Red Komar

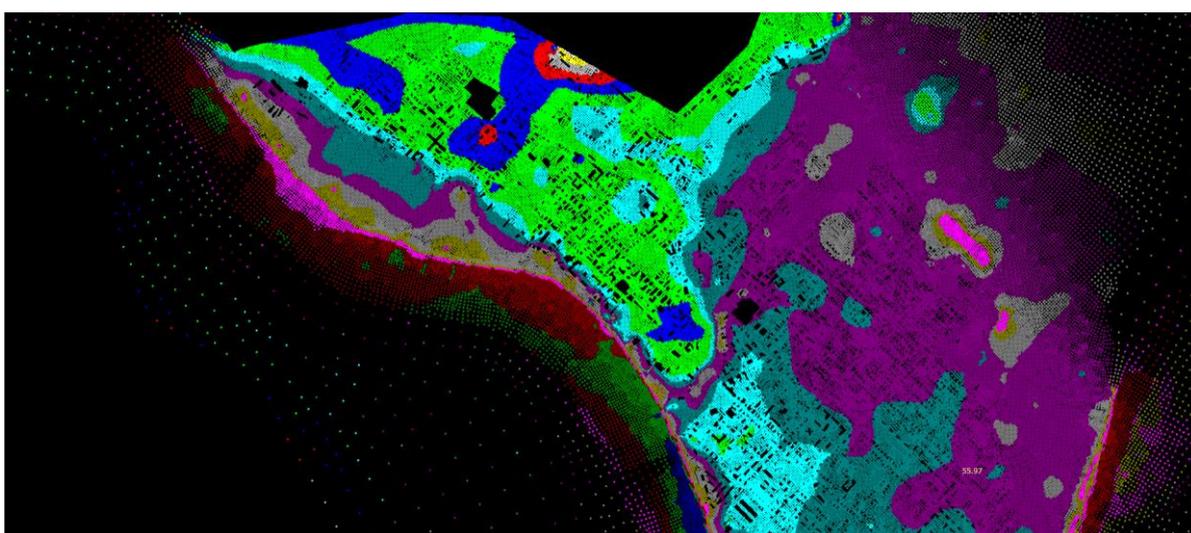


Рисунок 2.10 Узлы детальной сетки г. Великий Устюг, построенной в программе Auto Mesh-2D и результаты интерполяции рельефа на детальную сетку в программе Red Komar

2.5 Численные эксперименты по оценке чувствительности гидродинамической модели к изменению параметров⁴

2.5.1 Оценка чувствительности гидродинамической модели к изменениям коэффициента шероховатости

Основным параметром, влияющим на режим моделируемого речного потока, является коэффициент шероховатости, характеризующий состояние подстилающей поверхности русла и поймы. Для определения коэффициента шероховатости в различные годы были составлены таблицы такими исследователями как М.Ф. Срибный, В.Т. Чоу, И.Ф. Карасев, Дж. Бредли, Н.М. Носов, И.И. Агроскин и др.

В отечественной прикладной гидрологии наиболее распространены таблицы М.Ф. Срибного [Срибный, 1960], которые содержат значения коэффициента шероховатости для 17 различных типов подстилающей поверхности: 7 типов для пойм и 10 типов для речных русел, где коэффициент шероховатости пойм изменяется от 0,04 до 0,2, а русел – от 0,025 до 0,133.

Подобная классификация была разработана американским гидравликом В.Т. Чоу [Чоу, 1969]. Все равнинные реки США он разделил по типу подстилающей поверхности на 10 типов. В ней диапазон коэффициентов шероховатости для русел составляет от 0,025 до 0,070, а для пойм – от 0,025 до 0,160.

Другой американский гидравлик – Дж. Бредли [Braydlay, 1960] – предложил использовать классификацию типов поверхностей русел и пойм в зависимости от ширины водотока в период прохождения максимального расхода, то есть во время прохождения половодья или паводка. Данная классификация основана на идее различного влияния факторов, формирующих коэффициент шероховатости в различные периоды водности. Следует отметить, что минимальные и максимальные значения коэффициентов шероховатости в классификации М.Ф. Срибного и Дж. Бредли достаточно близки, так, минимальное значение коэффициента шероховатости русла у М.Ф. Срибного – 0,025, в то время как у Дж. Бредли это значение составляет 0,028, для поймы эти значения составляют 0,04 и 0,03 соответственно. Максимальные значения коэффициента шероховатости для русла у М.Ф. Срибного и у Дж. Бредли совпадают, для поймы значение коэффициента шероховатости у М.Ф. Срибного несколько выше, однако значения по-прежнему очень близки: 0,133 и 0,05.

⁴ Раздел написан на основе статьи [Сазонов, Крыленко, 2018]

Для горных рек СССР Н.М. Носовым была разработана классификация, в которой основным критерием для разделения на типы является уклон водной поверхности и максимальные расходы воды. Для русла, сложенного мелкими фракциями наносов, илом, песком или мелким гравием, значение коэффициента шероховатости составляет 0,022, а для крупных фракций, таких как валуны, оно составляет 0,12. Данные коэффициенты шероховатости применимы для диапазона уклонов водной поверхности от 0,0005 до 0,08 и для диапазона максимальных расходов от 50 м³/с до 1000 м³/с [Железняков, Данилевич, 1966].

При расчетах, в том числе в гидродинамическом моделировании, следует понимать, что коэффициент шероховатости – величина осредненная, фактическая шероховатость может заметно отличаться в том числе в связи с неравномерностью ее пространственного распределения (различные виды донной растительности, различные типы ледяного покрова и т. д.).

В данной работе на примере разработанной двумерной гидродинамической модели всего ключевого участка в узле слияния р. Сухона и р. Юг (от г. Великий Устюг до г. Котлас), реализованной на основе программного комплекса STREAM_2D, были проведены численные эксперименты по оценке чувствительности основных моделируемых характеристик, таких как глубина потока (м), скорость течения (м/с), площадь водной поверхности (км²), к изменению коэффициентов шероховатости русел и пойм [Сазонов, Крыленко, 2018].

Все характеристики потока, полученные в ходе моделирования для каждой расчетной ячейки модели, осреднялись на основе программы AverageInRegion, разработанной А.И. Алексюком (лаборатория гидрологии речных бассейнов ИВП РАН).

Все расчеты проводились в программном комплексе STREAM_2D, всего было выполнено 99 сценарных расчетов. В качестве исходных данных задавались расходы р. Сухона и р. Юг в пределах диапазона их изменений за период наблюдений, суммарный расход р. Малой Северной Двины составлял от 1000 до 11 000 м³/с. Уровень на нижней границе автоматически рассчитывался моделью STREAM_2D на основании кривой зависимости $Q = f(H)$, построенной по суточным данным о расходах воды во время прохождения беззаторного половодья.

Для каждого расхода воды было проведено 9 вариантов расчетов при разных коэффициентах шероховатости русла, которые последовательно менялись с 0,02 до 0,032 с шагом в 0,04. На графике зависимости средней глубины от расхода воды при различной шероховатости русла (рисунок 2.11а) видно, что до расхода воды 4000 м³/с различия незначительные и находятся в пределах погрешности определения. Начиная с расхода

4000 м³/с, коэффициент шероховатости русла начинает влиять на различие в глубине потока на величину более, чем 40–50 см. В среднем, при изменении коэффициента шероховатости русла на 0,04 средняя глубина затопления меняется на 17 см. Наибольшая средняя глубина будет наблюдаться при расходе в 11 000 м³/с и коэффициенте шероховатости 0,032 и будет составлять 4,04 м. Разница глубины при расходе в 11 000 м³/с при коэффициенте шероховатости 0,02 и 0,032 составляет 53 см, что является достаточно большим различием при использовании двумерной гидродинамической модели при решении задач, связанных с затоплением территории. Относительно верхней границы диапазона изменения глубины затопления при разных коэффициентах шероховатости, данная величина составляет 13,1%.

Изменение средней по области моделирования скорости течения в зависимости от расхода воды показано на рисунке 2.11 б. При наибольшем расходе воды, 11 000 м³/с, различие между скоростью течения при коэффициенте шероховатости 0,02 и 0,032 составляет 0,16 м/с. Относительно наибольшей рассчитанной величины скорости течения данная величина составляет 19%.

Форма кривой зависимости изменения площади затопления от расхода воды напрямую зависит от морфометрии долины (рисунок 2.11 в). Чем больше уклон склона и перепад высот между высотными отметками меженного уровня реки и бровками берега, тем меньше будет влияние коэффициента шероховатости русла.

Разница площадей затопления при максимальном расходе 11 000 м³/с при коэффициентах шероховатости русла 0,02 и 0,032 составляет всего лишь 17,2 км². Относительно наибольшей рассчитанной величины площади водной поверхности данная величина составляет 5,8%.

В следующей серии экспериментов для русла устанавливался коэффициент шероховатости, равный 0,028, и последовательно менялся коэффициент шероховатости поймы. Для проведения данного эксперимента были выбраны 5 вариантов коэффициентов шероховатости для поймы: 0,04, 0,05, 0,06, 0,08 и 0,1. Данный набор коэффициентов был задан для рассмотрения всего диапазона изменения типов подстилающей поверхности от растительности на неосвоенной пойме до урбанизированных территорий. По итогам численных экспериментов для каждой характеристики затопления были построены графики зависимости от входного расхода воды при различных значениях коэффициента шероховатости (рисунок 2.12). При анализе результатов моделирования с изменением коэффициента шероховатости поймы можно отметить, что при максимальном задаваемом расходе воды разница средней глубины затопления составляет 29 см. Относительно наибольшей величины значения разницы глубин составляет 7,2% (рисунок 2.12а).

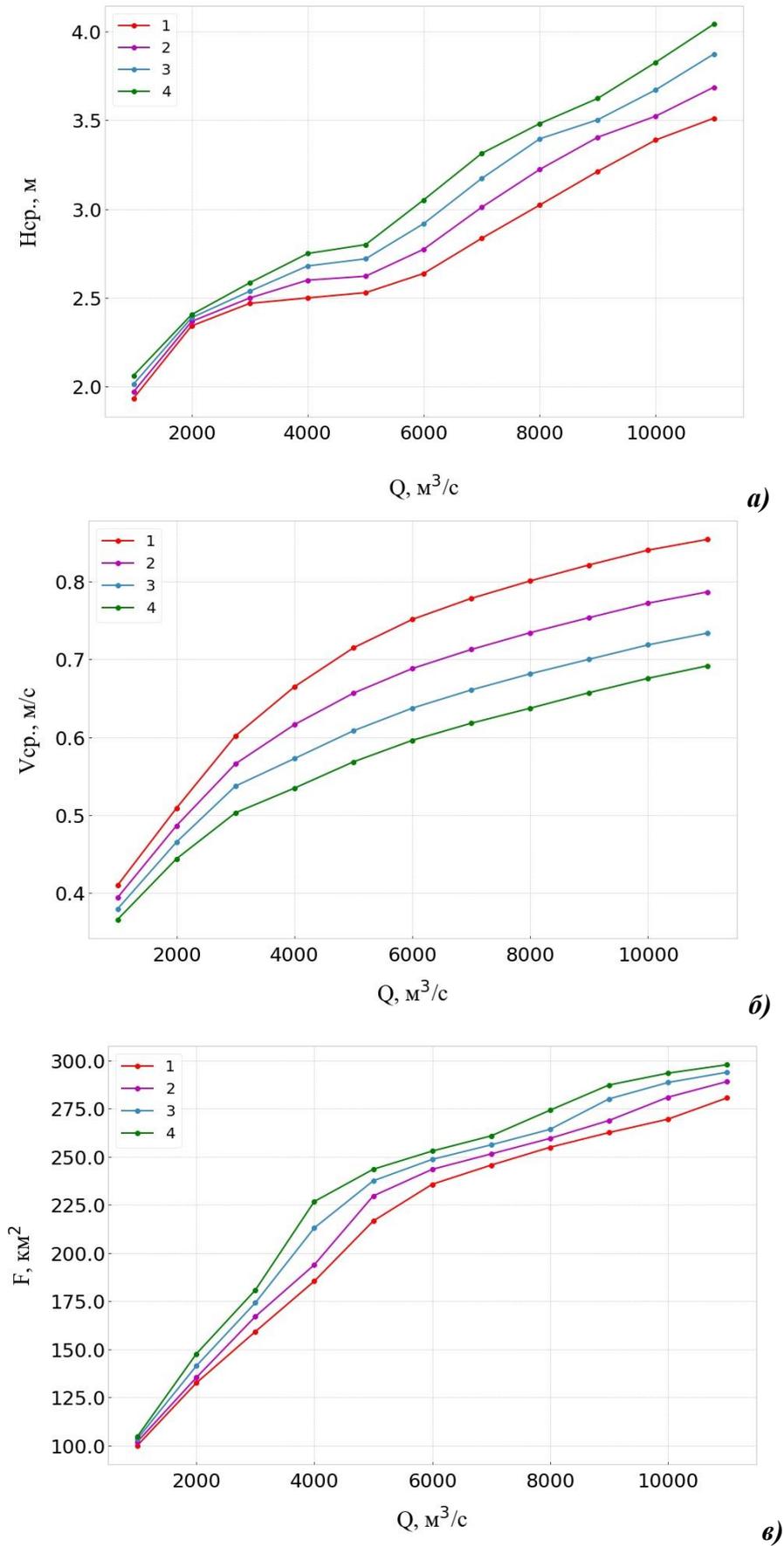
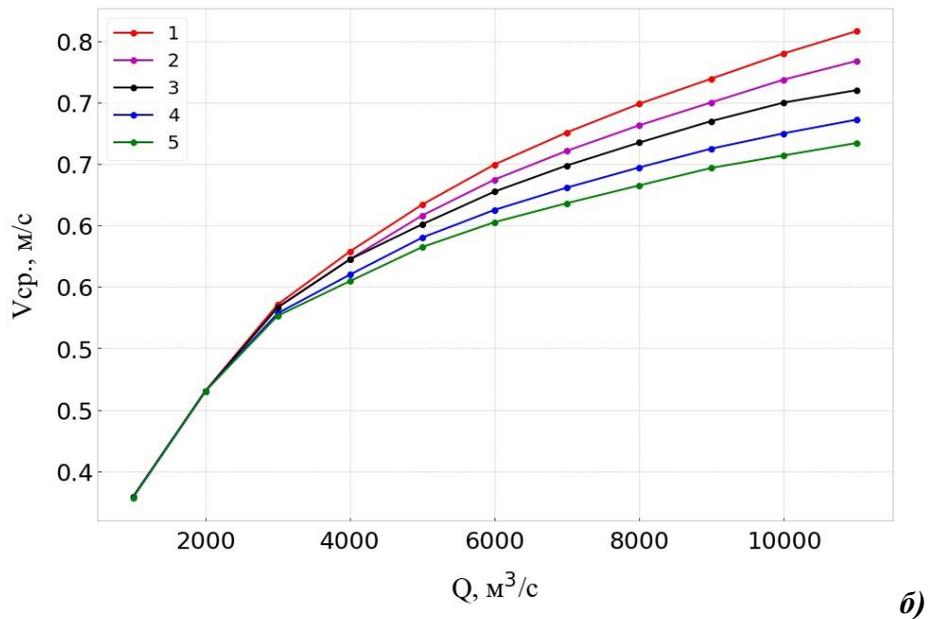
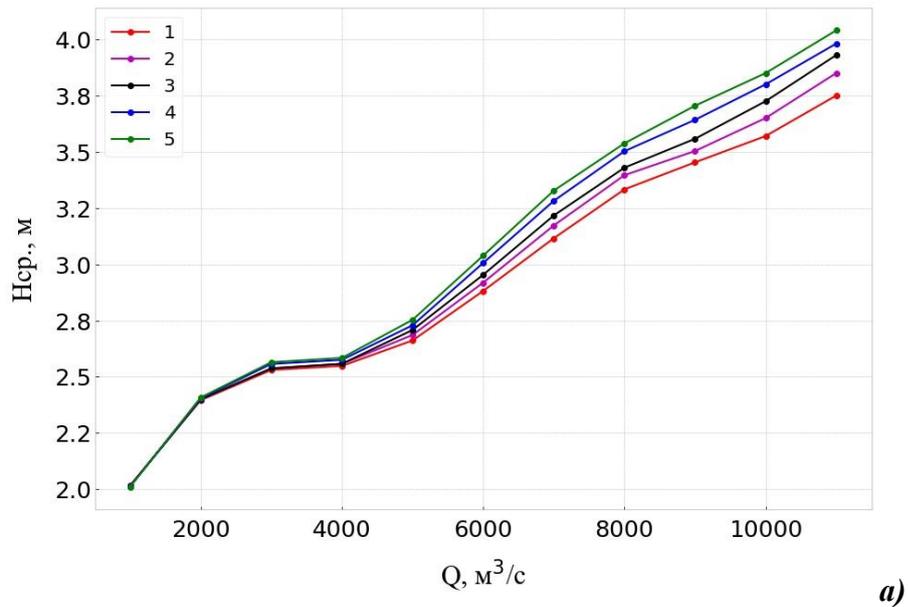


Рисунок 2.11. Изменение основных характеристик затопления (а – средней глубины, м; б – средней скорости течения, в – площади водной поверхности) в зависимости от шероховатости русла: 1 – 0,02; 2 – 0,024; 3 – 0,028; 4 – 0,032

Средняя по области моделирования скорость течения меняется незначительно, наибольшее значение, равное 0,76 м/с, достигается при коэффициенте шероховатости 0,04, а минимальное значение, равное 0,67 м/с, – при коэффициенте шероховатости 0,1. Таким образом, диапазон изменения скоростей составляет 0,09 м/с. Данная разница составляет 13,6% от максимальной рассчитанной величины (рисунок 2.12 б).

Площадь затопления также изменяется незначительно, в диапазоне от 289 км² до 304 км², для коэффициентов шероховатости от 0,1 до 0,04 соответственно. Данная разница составляет 4,9 % от максимальной рассчитанной величины (рисунок 2.12 в).



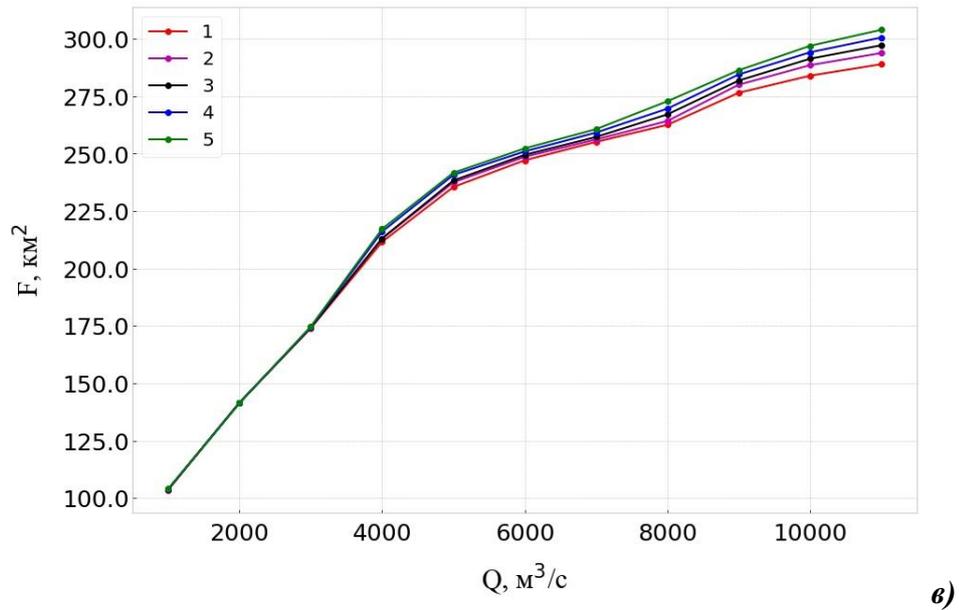


Рисунок 2.12. Изменение основных гидрологических характеристик (а – средней глубины, м; б – средней скорости течения, в – площади водной поверхности) в зависимости от шероховатости поймы: 1 – 0,04; 2 – 0,05; 3 – 0,06; 4 – 0,08; 5 – 0,1

В качестве вывода можно отметить, что модель наиболее чувствительна к изменению коэффициента шероховатости русла реки, в относительном выражении особенно сильно меняется скорость течения. В случае уменьшения коэффициента шероховатости скорость течения в силу уменьшения сопротивления возрастает. Разница средних по области моделирования скоростей течения при расходе воды $11000 \text{ м}^3/\text{с}$, но при разных значениях коэффициентах шероховатости составляет $0,16 \text{ м/с}$, что составляет 19% . При изменении коэффициента шероховатости поймы разница величин скоростей течения достигает $0,09 \text{ м/с}$, что составляет $13,6\%$ от наибольшего значения.

2.5.2 Оценка чувствительности гидродинамической модели к изменению параметров ледового блока

В данном численном эксперименте изменялись два основных параметра ледового блока гидродинамической модели – дополнительная шероховатость с учетом льда и уменьшение глубины потока за счет толщины льда при формировании затора. Дополнительную шероховатость задавали в диапазоне коэффициентов шероховатости Маннинга для ледовых условий от $0,035$ до $0,125$ [Барышников, 1991; Леви, 1958], с шагом $0,01$. Дополнительно уменьшалась средняя глубина руслового потока на величину $0,1$ или

2 м в зависимости от толщины льда в заторе. В качестве верхних граничных условий были взяты средние значения расходов воды в р. Сухона и р. Юг в дни пиков ледовых заторов (1770 и 630 м³/с соответственно), а продолжительность стояния затора предполагалась равной 2 суткам. Результаты этих численных экспериментов были обобщены в виде номограммы (рисунок 2.13).

Зависимость дополнительного повышения уровня воды в ледяном заторе от величины шероховатости льда может быть аппроксимирована логарифмической кривой. Максимальное повышение уровня воды на посту г. Великий Устюг, которое может быть достигнуто только за счет увеличения шероховатости до максимальных значений, составляет около 2,9 м. Дальнейшее увеличение коэффициента шероховатости приведет к значениям этого параметра, значительно выходящим за пределы естественного диапазона. Дополнительное повышение уровня воды может быть связано с уменьшением поперечного сечения русла из-за скопления льда. Следует отметить, что максимальные значения повышения уровней воды при учете льда, представленные на диаграмме, выше наблюдаемых значений заторных повышений уровней воды, поскольку описанный численный эксперимент предполагает неизменный приток воды и положение затора в течение двух дней, чего практически никогда не наблюдается во время весеннего половодья.

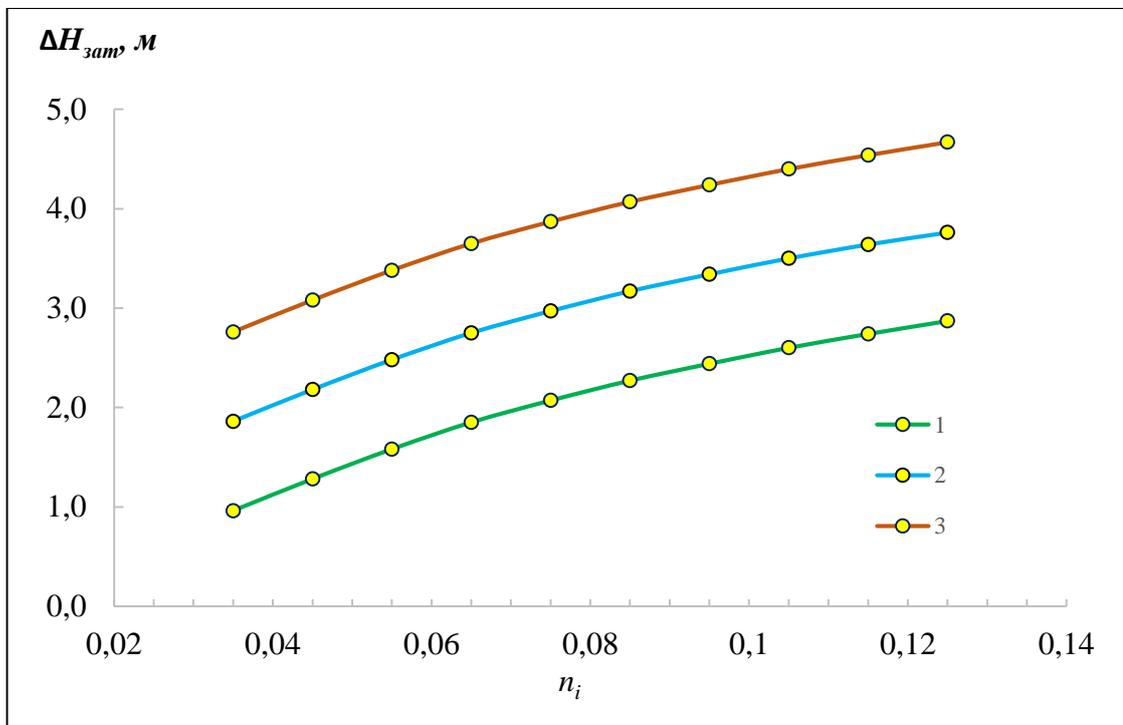


Рисунок 2.13. Увеличение уровня воды на гидрологическом посту города Великий Устюг за счет дополнительной шероховатости льда (n_i) в модели STREAM_2D в зависимости от мощности затора: 1 – беззаторные условия, при толщине льда в заторе: 2 – 1 м; 3 – 2 м

2.6 Калибровка и верификация параметров модели STREAM_2D для моделирования наводнений заторного генезиса с учетом высоты заторного повышения уровней воды ⁵

Как показывает практика, для отдельных гидрологических ситуаций можно с большой точностью подобрать калибровочные параметры гидродинамической модели. Однако, для воспроизведения заторных уровней воды в течение всего периода наблюдений необходимо разработка дополнительных методов уточнения параметров модели.

Для этой цели на первом этапе были проанализированы все заторные уровни воды за весь период наблюдений с 1980 до 2016 года. Было использовано сценарное моделирование без подключения ледового блока гидродинамической модели. Принимая во внимание, что уровни открытой воды воспроизводятся моделью с высокой точностью [Agafonova et al., 2017; Zelentsov et al., 2018], максимальные наблюдаемые уровни наводнений, связанных с ледовыми заторами, сравнивались с моделируемыми стоковыми уровнями за те же даты, и заторные повышения уровня рассчитывались как их разность. Таким образом были получены величины заторных повышений уровней воды у г. Великий Устюг за многолетний период.

Выяснилось, что в разные годы величина заторного подъема уровня воды у г. Великий Устюг составляет до 3,8 м. Из 18 проанализированных половодий с заторами в семи случаях заторные повышения уровней воды (ΔH_3) были более 2,5 м, из них в трех случаях – превышали 3 м (1992, 2013, 2016 годы). В семи случаях заторные повышения уровня воды составили от 1,5 до 2,5 м, а в остальных – были менее 1,5 м. Несколько случаев ледовых заторов с незначительными (менее 1 м) повышениями уровней воды, такие как 1981, 1986, 2000, 2009 годы, не были включены в анализируемый набор данных о ледовых заторах.

Существующие классификации мощности заторов [Бузин, 2014; Донченко, 1987] могут быть адаптированы для ключевого участка с учетом полученных величин заторного повышения уровней воды (ΔH_3) за различные годы, с учетом 4 градаций величин заторных подъемов уровня воды: небольшой затор ($\Delta H_3 < 1,5$ м), средний затор ($\Delta H_3 = 1,5-2,5$ м), мощный затор ($\Delta H_3 = 2,5-3,5$ м) и катастрофически мощный затор ($\Delta H_3 > 3,5$ м).

Для подбора параметров ледового блока и верификации модели рассматриваемый временной отрезок был разделен на две равные части: период калибровки (1980–1998 гг.) и период верификации модели (1999–2016 гг.). Расчеты за каждый год проводились с 1 апреля по 30 июня, чтобы начало и конец любого половодья попадали в период моделирования.

⁵ Раздел написан на основе статьи [Krylenko et al, 2020]

Для периода, когда русло свободно ото льда, задавался коэффициент шероховатости русла 0,025. Данное значение было получено в процессе калибровки модели на основе экспедиционных исследований 2013 г. Для периода, предшествующего началу половодья и вскрытию реки, устанавливался коэффициент шероховатости, равный 0,035 и среднемноголетнее значение толщины льда, равное 0,7 м.

Для периода калибровки параметры ледового блока модели, обеспечивающие лучшее совпадение моделируемых и наблюдаемых уровней воды для поста г. Великий Устюг, подбирались в зависимости от высоты заторного повышения уровней воды (таблица 2.1). Было выявлено, что заторные повышения уровней менее 1,5 м (тип 1) лучше воспроизводятся при дополнительном коэффициенте шероховатости льда 0,045 и параметре толщины льда 1 м; для средней высоты заторных повышений (тип 2) параметр толщины льда следует увеличить до 1,5 м. Мощные заторы с высотой заторного повышений уровня более 2,5 м и менее 3,5 м (тип 3) хорошо воспроизводятся при коэффициенте шероховатости льда 0,075 и параметре толщины льда 2 м [Krylenko et al., 2020]. Заторы такой мощности наблюдались в период калибровки в 1984, 1992 и 1998 гг.

С использованием полученного набора параметров было достигнуто удовлетворительное совпадение моделируемых и наблюдаемых суточных уровней воды для поста г. Великий Устюг за период калибровки (рисунок 2.14).

Для двух наиболее выдающихся наводнений 2013 г. и 2016 г., входящих в период верификации, величина заторного повышения уровней воды была более 3,5 м, и для этих лет для наиболее адекватного воспроизведения уровней воды в период ледовых заторов использовалась дополнительная шероховатость на участках заторообразования 0,1.

Для оценки качества моделирования уровней воды был использован критерий Нэша-Сатклифа (NSE) [Nash, Suttcliffe, 1970]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (H_{f(i)} - H_{s(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (H_{f(i)} - \bar{H}_f)^2} \quad (2.9)$$

где $H_{f(i)}$ и $H_{s(i)}$ – фактическое и рассчитанное значение уровня воды в i -е сутки соответственно, \bar{H}_f – среднее значение фактических уровней за период $i=1, 2, 3 \dots n$.

Сравнение производилось как для каждого из двух периодов, так и отдельно для дней с ледовыми заторами и дней, когда русло было свободно ото льда.

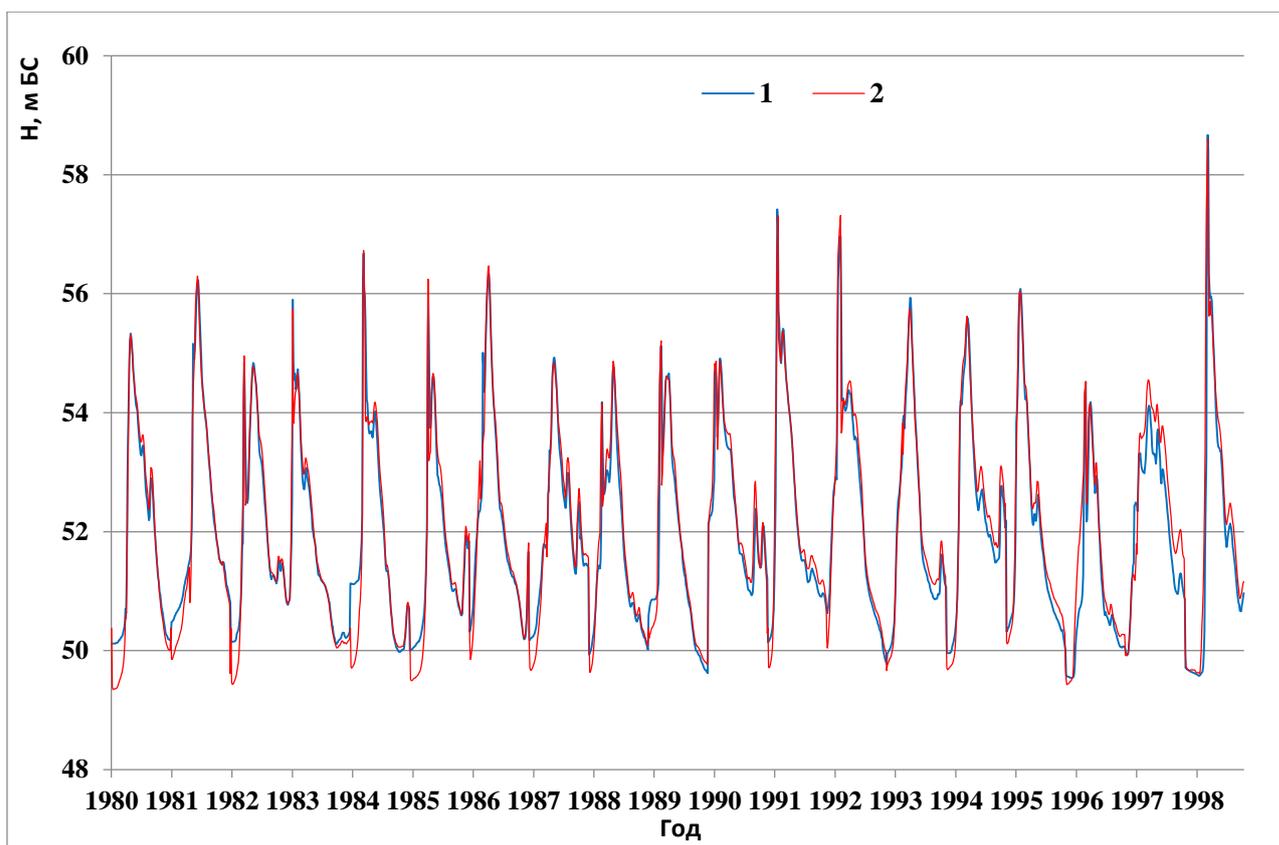


Рисунок 2.14. График изменения отметок уровня воды по гидрологическому посту г. Великий Устюг за период калибровки модели (1980–1999 гг.):
1 — фактические данные, 2 — смоделированные данные

Для калибровочного периода, для дней, когда наблюдался ледовый затор, было получено значение критерия Нэша-Сатклифа, равное 0,72, что можно считать удовлетворительным результатом, однако для всего калибровочного периода оно составило 0,94, таким образом в целом модель совпадение смоделированных и фактических уровней хорошее.

Для периода верификации (рисунок 2.15) критерий Нэша-Сатклифа для дней, когда наблюдался ледовый затор, составил 0,79, что является также удовлетворительным результатом, а в целом за период верификации он составил 0,91 (таблица 2.2).

Таблица 2.1. Итоговые параметры ледового блока модели STREAM_2D для разных градаций заторов

Мощность затора	Год	Величина заторного повышения уровней воды	Дополнительная шероховатость на участках заторообразования	Толщина льда, м
Небольшие заторы (заторное повышение уровней <1,5 м)	1988	1,21	0,045	1
	1990	1,14		
	1996	1,18		
	2004	1,40		
	2015	0,94		
Средние заторы (заторное повышение уровней 1,5 - 2,5 м)	1982	1,50	0,045	1,5
	1983	1,75		
	1989	1,54		
	1991	2,22		
	2002	2,05		
	2005	2,40		
	2010	2,32		
Мощные заторы (заторное повышение уровней 2,5 - 3,5 м)	1984	2,74	0,075	2
	1985	2,52		
	1992	3,48		
	1998	2,87		
	2001	2,50		
Катастрофические заторы (заторное повышение уровней >3,5 м)	2013	3,80	0,1	2
	2016	3,60		

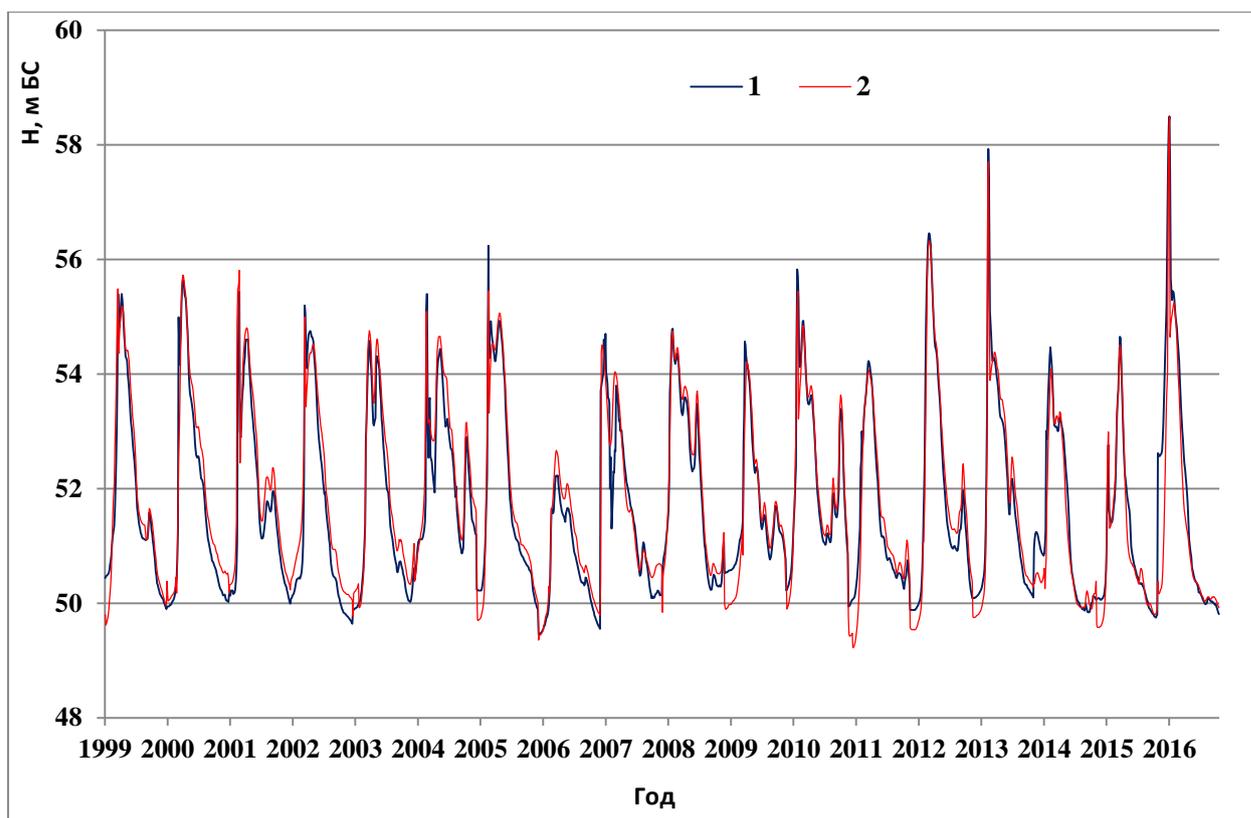


Рисунок 2.15. График сопоставления отметок уровня воды по г/п г. Великий Устюг за период верификации модели (1999–2016 гг.): 1 — фактические данные, 2 — смоделированные данные

Некоторое снижение значения критерия NSE для периода 1999–2016 гг. в целом связано с ухудшением качества данных о стоке для р. Юг в связи с закрытием гидрологического поста д. Гаврино.

Таблица 2.2. Результаты проверки качества работы модели STREAM_2D при воспроизведении уровней воды по г/п г. Великий Устюг с помощью статистического критерия Нэша-Сатклифа

Период	NSE для дней с ледовыми заторами	NSE за весь период
1980–1998 (калибровка)	0,72	0,94
1999–2016 (верификация)	0,79	0,91

Качество воспроизведения моделью среднесуточных максимальных уровней воды было проанализировано отдельно, поскольку они являются наиболее важной характеристикой для определения опасности наводнения. Модель воспроизводит их

достаточно хорошо; значение критерия Нэша-Сатклиффа для максимальных уровней воды за период 1980–2016 гг. равно 0,92, среднее значение абсолютных отклонений моделируемых максимальных уровней воды от фактических по данным г/п г. Великий Устюг составляет 0,18 м (рисунок 2.16).

Максимальные уровни воды в результате особо крупных наводнений (например, 1998 г.) обычно соответствуют значительным (более 2,5 м) заторным повышениям уровням воды и базовым стоковым уровням, превышающим средние значения. Недавнее наводнение 2016 г. характеризуется как повышенным стоковым уровнем, так и катастрофическим значением дополнительного заторного подъема уровня воды.

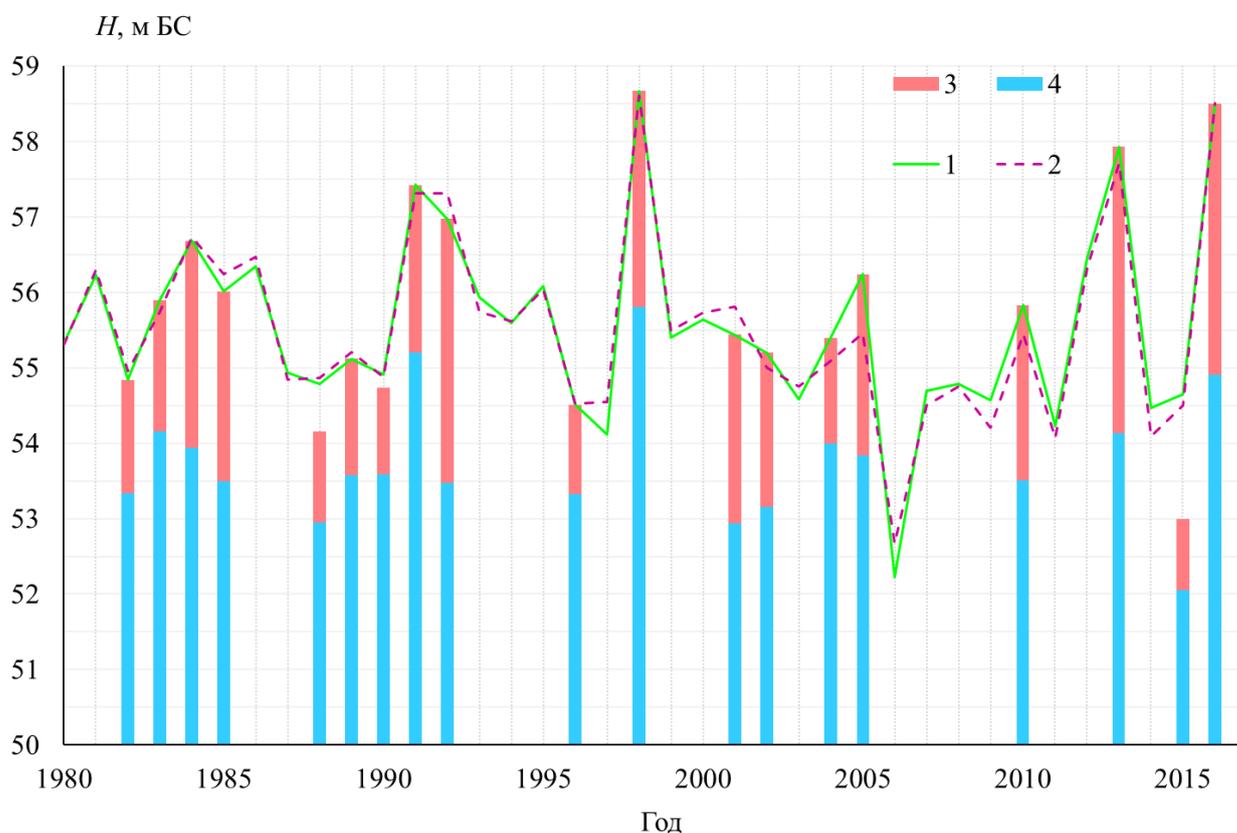


Рисунок 2.16. Сравнение фактических (1) и смоделированных (2) максимальных годовых уровней воды по г/п г. Великий Устюг за период 1980-2016 гг; полученные на основе сценарного моделирования величины заторного повышения уровней воды (3) и фоновые уровни воды, обусловленные стоком, в дни затороформирования (4)

Таким образом, предложенные значения коэффициентов шероховатости для каждого из трех возможных периодов половодья (период перед вскрытием, установление ледового затора и освобождение русла ото льда) позволяют с удовлетворительной точностью воспроизводить характеристики наводнений за многолетний период. Полученные значения параметров могут быть использованы в оперативной практике прогнозирования зоны

затопления, основанной на методах математического моделирования. Описанные результаты позволяют обосновать использование различных групп параметров модели, отражающих дополнительное увеличение коэффициента шероховатости и уменьшение поперечного сечения потока в зависимости от повышения уровня воды, обусловленного ледовым затором.

Глава 3. Использование динамико-стохастического моделирования для определения максимального расхода воды малой обеспеченности

Детальное описание процессов гидрологического цикла на речном водосборе с учетом пространственной изменчивости факторов формирования стока в гидрологической практике обычно связывается с использованием развитых физико-математических моделей с распределенными параметрами.

Эта группа моделей в наибольшей мере соответствует условиям формирования стока на речных водосборах, но их оперативное использование в гидрологических расчетах и прогнозах при слабой гидрометеорологической изученности территории связано с большими затруднениями. Кроме того, возникают проблемы с выделением частей водосбора с однородными условиями гидрологического режима, с численным решением уравнений в частных производных и трудностями при адаптации моделей для крупных речных бассейнов [Кучмент, 1972; Кучмент, Музылев, 1993; Кучмент и др, 1994; Кучмент, 2008].

Поэтому, в последнее время формируется класс упрощенных физически обоснованных моделей, где для описания стокоформирующих процессов используются более простые уравнения и эмпирические зависимости. Такие модели позволяют в значительной мере снизить трудоемкость практических расчетов при больших объемах входной информации и расширяют прикладные возможности для моделирования речного стока с крупных водосборов, что в свою очередь требует разработки автоматизированных систем обработки и анализа разнообразной пространственной и временной информации [Мотовилов, Гельфан, 2018; Виноградов, Виноградова, 2010].

В связи с этим, появился новый тип моделирующих речной сток структур - интегрированные информационно-моделирующие системы, включающие в себя собственно модель гидрологического цикла, географические информационные системы (ГИС), базы данных и системы управления ими. Эта группа моделей занимает промежуточное место между развитыми физико-математическими моделями гидрологического цикла и концептуальными моделями речного стока различного формата. Подобные модели учитывают пространственную изменчивость процессов формирования стока, т.е. сохраняют основные черты распределенных физико-математических моделей и в то же время они более эффективны для гидрологических расчетов и прогнозов при слабой изученности исследуемых водосборов.

В настоящей работе для расчетов речного стока по метеорологическим данным использован информационно-моделирующий комплекс ECOMAG (ECOLOGical Model for

Applied Geophysics), разработанный Ю.Г. Мотовиловым, [Motovilov et al., 1999; Мотовилов, 2004; Мотовилов, Гельфан, 2018].

Этот комплекс позволяет решать различные гидрологические и природоохранные задачи с учетом пространственно-временной изменчивости речного стока и развития гидроэкологических ситуаций на больших территориях, в том числе при возникновении чрезвычайной обстановки.

К настоящему времени накопился значительный опыт применения ИМК ЕСОМАГ для решения исследовательских и прикладных гидрологических задач для речных бассейнов у нас в стране и за рубежом [Gelfan et al., 2015; Krylenko, 2014; Gelfan et al., 2017; Motovilov, Fashchevskaya, 2019, Борщ и др., 2017; Григорьев и др., 2020]. С 2001 г. комплекс задействован для расчетов боковой приточности к водохранилищам Волжско-Камского каскада [Разработка и внедрение в практику..., 2002; Мотовилов и др., 2003]. Практически для всех крупных, зарегулированных рек РФ предпринимались попытки расчетов и краткосрочного прогнозирования притока воды к водохранилищам.

Комплекс ЕСОМАГ включает в себя математическую модель формирования речного стока, географическую информационную систему, базы данных с информацией о характеристиках территории и управляющую оболочку. Используемая в комплексе гидрологическая модель – версия пространственно-распределенной модели гидрологического цикла, переноса и трансформации загрязняющих веществ в речном бассейне. Она является базовой основой всего комплекса. Модель позволяет учитывать пространственную изменчивость условий формирования стока и описывает все основные процессы стокообразования на территории бассейна: поступление воды на поверхность, поверхностное задержание, испарение и транспирацию, инфильтрацию в грунты, промерзание и оттаивание почв, их водный режим, динамику накопления снежного покрова и его снеготаяние, формирование склонового грунтового и подземного стока, а также там описаны закономерности стекания воды по речной сети (рисунок 3.1).

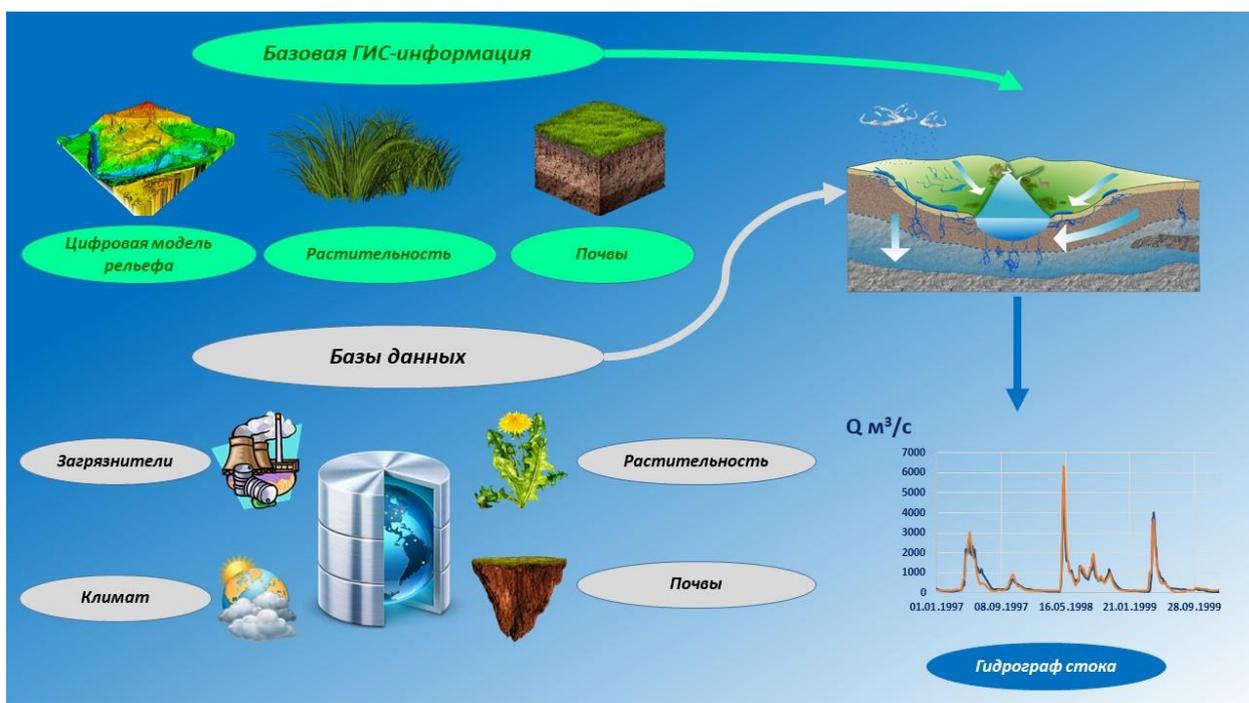


Рисунок 3.1. Общая структура программного комплекса

В отличие от сложных детальных физико-математических моделей гидрологического цикла речных бассейнов, в математической модели комплекса ECOMAG для описания стокоформирующих процессов используются упрощенные обыкновенные дифференциальные уравнения, полученные путем интегрирования детальных уравнений в частных производных.

Структуру модели, алгоритм и инструкцию пользователю автор модели изложил в целом ряде работ [Motovilov, 2013; Motovilov, Fashchevskaya, 2019; Motovilov, 2016; Motovilov, 2016] и в монографии [Мотовилов, Гельфан, 2018].

3.1 Краткое описание структуры ИМК ECOMAG ⁶

Основными исходными пространственными данными, с которыми работает специализированный ГИС модуль программного комплекса, являются грид-темы, каждая из них представляет собой географический слой, пространство которого условно разделено на квадратные ячейки (растровый эквивалент объекта). Каждая ячейка хранит числовое значение данных, передающее информацию о представляемом географическом слое.

В частности, исходными данными при моделировании сети водотоков являются грид поверхности (цифровая модель рельефа (ЦМР)) и электронная версия речной сети, снятой

⁶ Раздел написан на основе монографии [Мотовилов, Гельфан, 2018]

с топографической карты. Речная сеть моделируется по цифровой модели рельефа с помощью модуля ECOMAG в программе ArcView. Для этого выбирается некоторое пороговое значение для всех ячеек. Пороговое число определяет детализацию речной сети - ее густота напрямую зависит от его величины. При уменьшении порогового числа число рек вычисленной гидрологической сети сильно увеличивается. Важную роль при моделировании речной сети имеет также разрешение исходной цифровой модели рельефа. Разрешение ЦМР может служить причиной несовпадения реальной и модельной речных сетей. При значительном несовпадении реальной и вычисленной речной сети в комплексе предусмотрена корректировка рельефа. Цифровая модель рельефа выступает как средство, используемое для описания различных пространственно-распределенных данных на изучаемой территории, необходимых при моделировании стока с речного бассейна, особенно при значительных размерах площади его водосбора. Она является хорошей альтернативой ручной обработке топографических карт. Такие особенности как густота речной сети, уклоны склонов, длина русел, границы водосборов, их площади, могут быть достаточно просто и надежно определены даже для больших водосборов.

Для расчетов стока в речной сети используются базы данных: «Почва», «Землепользование» и «Бассейн».

В базе данных «Почва» ИМК «ECOMAG» собраны характеристики и свойства почв различных природных зон на территории бывшего СССР. К ним относятся: тип почвы, механический состав, объемная плотность, пористость, наименьшая полевая влагоемкость, влажность завядания, коэффициент фильтрации, содержание гумуса, а также некоторые гидрохимические характеристики. Гидрохимические характеристики почв используются при решении задач формирования качества воды. Источниками информации для создания базы данных «Почва» являлись региональные справочники агрогидрологических свойств почв. База данных содержит характеристики по 112 типам почв.

Характер подстилающей поверхности водосбора и тип землепользования на нем может оказывать заметное влияние на процессы формирования стока и поэтому программный комплекс включает и базу данных «Землепользование», в которую занесены параметры модели ECOMAG, меняющиеся в зависимости от типа землепользования (пашня, целина, лес, урбанизированная территория и т.п.).

Основной пространственной структурой модели ECOMAG является ландшафтная единица, которую автор называет “элементарным водосбором”. Элементарные водосборы выделяются для каждого сегмента речной сети и представляют собой небольшие территории, для которых в процентном соотношении учитывается рельеф, типы почв и виды землепользования. Множество элементов позволяет отразить пространственные

неоднородности рельефа, почв, землепользования, а также учесть пространственные особенности полей метеорологических характеристик, формирующих речной сток.

На каждом ландшафтном элементе моделирование гидрологических процессов выполняется для четырех уровней: зоны формирования склонового стока, для поверхностного слоя почвы, подстилающего его более глубокого слоя и емкости грунтовых вод. В холодный период учитывается динамика снежного покрова - накопление и таяние.

В качестве входной информации для формирования баз данных в программном комплексе используются следующие картографические материалы:

- цифровая модель рельефа с различным разрешением, в зависимости от размеров водосбора;
- серия электронных тематических карт (почвы, растительность, ландшафты), отражающие физико-географические особенности исследуемых территорий;
- карты-схемы бассейнов рек с сетью гидрологических и метеорологических пунктов наблюдений.

В качестве выходных данных на первом этапе расчетов программный модуль формирует три файла:

- структура речной сети;
- структура и области аккумуляции стока (элементарные водосборы);
- третий файл описывает сочетания типов почв и ландшафтов на расчетных ячейках области аккумуляции стока.

На втором этапе информация о характеристиках склоновых элементов (элементарных водосборов) и структуре речной сети передается в гидрологическую модель, где из баз данных, описанных выше, каждому элементу назначаются соответствующие модельные параметры (почв, растительности, характера землепользования и т.д.).

Эти три файла и являются результатом подготовки информации для моделирования стока водосборных территорий с использованием специализированной географической информационной системы по схематизации речной сети и речного бассейна, т.е. являются загрузочными файлами в модель формирования стока.

После этого начинается этап проведения расчетов - моделирование стока проводится для каждого из элементарных водосборов, причем при расчете поступления и потерь воды параметры почв и видов землепользования принимаются с учетом доли их площади в пределах элементарного водосбора, таким образом, учитывается их пространственная изменчивость.

Особенности использования гидрометеорологической информации при моделировании стока. В ИМК ECOMAG входными метеорологическими

характеристиками служат среднесуточная температура воздуха, суточные суммы осадков и дефицит влажности воздуха. Обычно, для расчета и моделирования стока рек используются ряды данных наблюдений метеорологических станций, расположенных в границах исследуемой области или в непосредственной близости от нее. Количество этих станций может меняться, в зависимости от имеющихся данных наблюдений. Сведения о расходах воды с водосбора используются для калибровки параметров модели и оценки эффективности моделирования стока.

Данные наблюдений на метеостанциях в процессе расчета автоматически интерполируются на выделенные элементарные участки водосбора с учетом рельефа на основе метода интерполяции обратно взвешенных расстояний (Inverse Distance Weighting – IDW) [Shepard, 1968; Di Piazza, 2011] по пяти ближайшим метеостанциям. В качестве весовых коэффициентов берется обратная величина квадрата расстояния от центра элементарного водосбора до каждой метеостанции., для осадков и температуры дополнительно учитываются высотные градиенты.

Таким образом, для каждого элементарного водосбора получают ряды данных метеорологических характеристик за расчетный период, которые могут быть выведены для анализа и сопоставления модельных данных с фактическими данными ближайшей к элементарному водосбору метеостанции.

В ходе модельных расчетов рассчитываются и могут быть использованы для анализа все компоненты водного баланса, такие как поля запасов воды в снежном покрове, поля увлажнения и промерзания почвы, интенсивности снеготаяния и водоотдачи, поля характеристик стока воды с водосбора и др..

Параметры модели и их оценка. В модели ЕСОМАГ, как и в любой другой математической модели формирования стока, присутствует целый ряд параметров, отражающих характеристики водосборов. Некоторые из них имеют конкретный физический смысл и могут быть определены по физико-географическим условиям территории, другие определяются из разных справочников, в том числе по базам данных характеристик почв, растительности, морфометрии речных бассейнов. Для некоторых проводится процедура их оптимизации по условию наилучшего соответствия фактических и рассчитанных гидрографов [Антохина, Жук, 2011].

Некоторые параметры отражают зональные факторы формирования стока и могут оставаться неизменными в пределах водосбора, расположенного в одной природной зоне, тогда как другие параметры могут существенно отличаться между собой даже в пределах одной небольшой территории. Такие параметры отражают локальные факторы формирования стока. Очевидно, что от адекватной оценки или калибровки параметров

модели зависит качество моделирования стока на водосборах рек. Идеальным вариантом при оптимизации параметров является возможность их калибровки по данным наблюдений процессов, в расчетные зависимости которых они входят: по данным снегомерных наблюдений, по измерениям глубины промерзания почвы, ее влажности, по стоку воды с малых водосборов и т.д. [Мотовилов, Гельфан, 2018; Антохина, 2012; Кучмент, 1972; Корень, 1991].

В модели ECOMAG неизвестные параметры в расчетных формулах основных процессов гидрологического цикла определяются из баз данных «Почва» и «Землепользование», из сведений о морфометрии речных бассейнов, а также на основе климатических характеристик. Подобная процедура имеется во всех моделях формирования стока с распределенными параметрами.

На выделенных при схематизации элементарных водосборах очень часто условие однородности формирования стока не выполняется и возникает необходимость некоторого весового осреднения параметров. Весовые коэффициенты при этом определяются по долям площадей разных ландшафтов и почв на элементарном водосборе. При необходимости параметры модели подвергаются калибровке. Если в моделях с сосредоточенными параметрами это достаточно простая процедура, то в моделях с распределенными параметрами ее осуществить не просто в связи с тем, что параметры индивидуальны для каждого типа почв и ландшафтов, что приводит к проблеме “эквививальности” (близости результатов моделирования при различных значениях модельных параметров) [Мотовилов, Гельфан, 2018].

Модель ECOMAG устроена таким образом, что калибровке подвергается коэффициент на определенный параметр, одновременно для всех элементарных водосборов. Например, увеличив в оболочке программы на 20% коэффициент, отвечающий за вертикальный коэффициент фильтрации в верхнем горизонте почвы, вертикальные коэффициенты фильтрации в нем всех типов почв, присутствующих в бассейне, увеличатся на 20%. Такая схема в программном комплексе реализована для всех калибровочных параметров [Антохина, Жук, 2011].

Операция подбора параметров основана на сравнении фактических и смоделированных гидрографов стока. Эффективность калибровки параметров модели оценивается совпадением гидрографов стока.

В качестве критерия соответствия рассчитанных и фактических гидрографов использовался критерий Нэша-Сатклифа (*NSE*) (формула аналогична формуле 2.9, применявшейся для оценки качества смоделирования уровней воды) и систематическая ошибка расчета *BIAS* [Morigasi et al., 2007]:

Относительная систематическая ошибка расчета (%) была рассчитана по формуле:

$$BIAS = \frac{\overline{Q}_f - \overline{Q}_s}{\overline{Q}_f} * 100\% \quad (3.1)$$

Согласно данным критериям результаты моделирования можно расценивать следующим образом:

1. $0.70 < NSE \leq 1$ и $|BIAS| < 10\%$ — хорошие,
2. $0.50 < NSE \leq 0.70$ и $10\% \leq |BIAS| < 15\%$ — удовлетворительные,
3. $NSE \leq 0.50$ или $|BIAS| \geq 15\%$ — неудовлетворительные.

3.2 Адаптация ИМК ЕСОМАГ для бассейна реки р. Северная Двина

Модельная схематизация водосборной площади и речной сети в бассейне Северной Двины выполнялась на основе ГИС-комплекса Ecomag Extension. Схематизация проводилась на основе ЦМР с разрешением 1x1 км и цифровых тематических карт масштаба 1:1000000 (рисунок 3.2). При схематизации выделялись водосборные площади притоков с площадью не менее 500 км². На рисунке 3.3а показаны фактическая речная сеть с карты миллионного масштаба и модельная речная сеть, полученная на основе ЦМР с использованием ГИС-комплекса, а на рисунке 3.3б показаны соответствующие модельной речной сети расчетные элементарные водосборы.

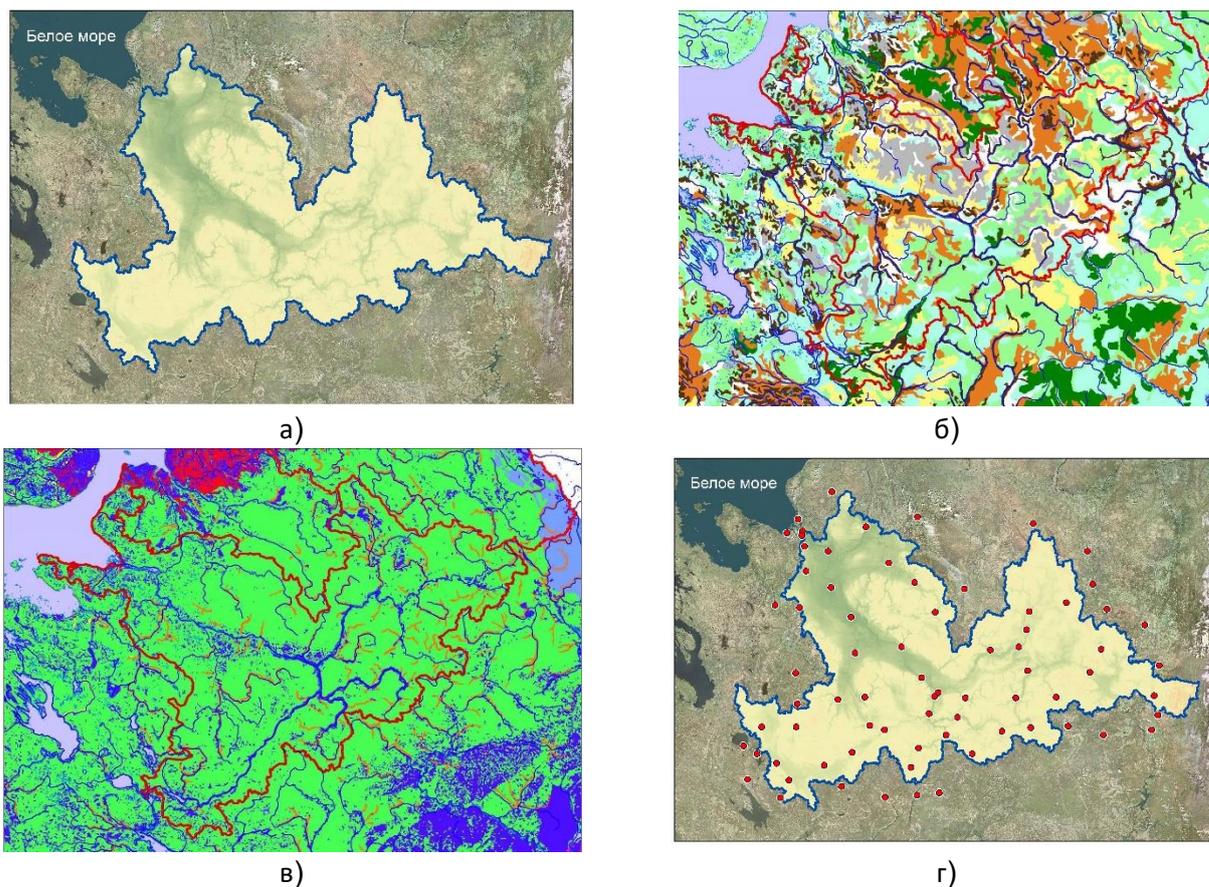


Рисунок 3.2. Базовая ГИС-информация, используемая в модели формирования стока р.Северной Двины: (а) цифровая модель рельефа, б) типы почв, в) ландшафты; г) расположение метеорологических станций

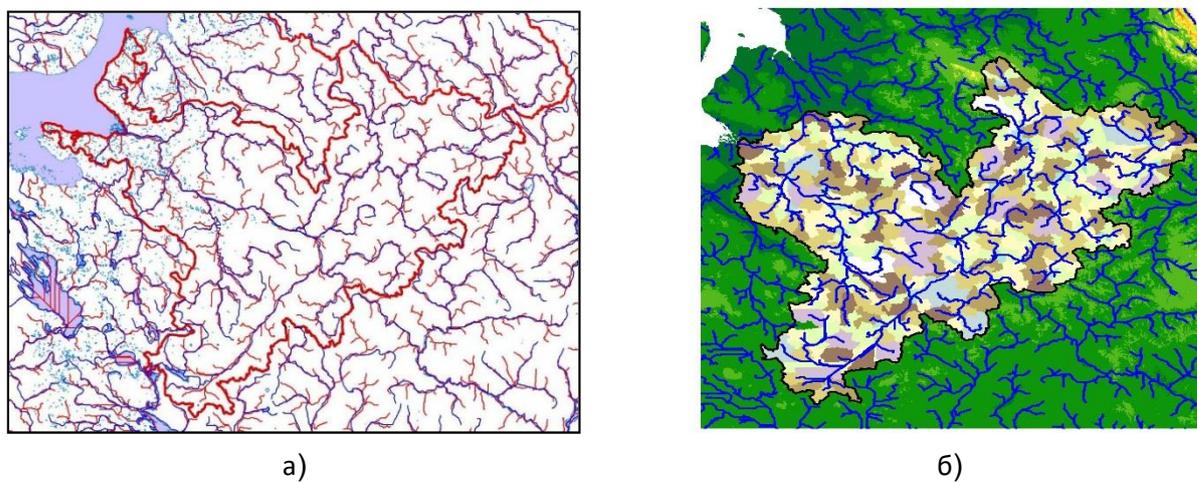


Рисунок 3.3. Фактическая и модельная речная сеть (а) и схематизация водосбора Северной Двины (элементарные водосборы) (б)

Для адаптации модели формирования стока р. Северная Двина в районе г. Великий Устюг использовались данные среднесуточных расходов воды по следующим постам: д. Каликино на р. Сухона; д. Гаврино, пос. Подосиновец на р. Юг; д. Абрамково на р. Северная Двина. Это гидрологические посты первого разряда, на которых проводят наблюдения за расходом воды. Большинство из них имеют полный ряд наблюдений с 1966 г. по настоящее время. Исключением является пост р. Юг – д. Гаврино, который был закрыт в 1989 г. Выбор постов для калибровки модели был обусловлен их расположением относительно г. Великий Устюг. Из них только пост р. Северная Двина – д. Абрамково находится ниже по течению г. Великий Устюг. Ближайшие к городу гидропосты д. Гаврино и д. Каликино расположены на р. Сухона и р. Юг соответственно.

Адаптация модели ЕСОМАГ заключалась в подборе параметров, при которых модель адекватно воспроизводит процесс формирования стока. Стоит отметить, что в процессе калибровки внимание уделялось не только соответствию фактического и смоделированного гидрографа, но и соответствию начала и окончания половодья. Всего в процессе калибровки было задействовано 10 параметров. К наиболее чувствительным характеристикам можно отнести коэффициент испарения в почвах, коэффициент на толщину горизонта А, коэффициент стаивания снежного покрова и коэффициент на критическую температуру таяния снежного покрова. Особенностью адаптации ИМК ЕСОМАГ для исследуемого участка заключается в том, что для створа г/п Великий Устюг были получены отличающиеся по сравнению со средними значениями для остальной части бассейна р. Северной Двины калибровочные параметры: множитель на коэффициент испарения и множитель на критическую температуру таяния. Данное изменение было связано с положением исследуемой территории в южной части бассейна, где снеготаяние наступает раньше, нежели в северной части.

Конечной целью данного этапа работы было получить гидрографы стока для р. Сухона и р. Юг в месте их слияния по метеорологическим характеристикам. Особенно важно, как было описано ранее, воспроизведение стока по р. Юг, так как в связи с закрытием поста, метод математического моделирования является одним из самых точных способов получения данных о стоке реки.

Для адаптации модели использовались архивные данные метеонаблюдений 65 станций, расположенных в пределах всего бассейна р. Северной Двины, а также расположенных в приграничной к бассейну территории. Однако, для моделирования формирования речного стока по модели ЕСОМАГ для бассейна р. Северной Двины в створе г. Великий Устюг и дальнейших статистических расчетов были отобраны 35 метеостанций (рисунок 3.2г) с общим непрерывным периодом наблюдений, с 1 января 1980

г. по 31 декабря 2014 г., за интенсивностью осадков, температурой и влажностью воздуха. Стоит отметить, что все данные были осреднены до среднесуточных значений. Параметры модели ECOMAG калибровались по наблюдениям за стоком в замыкающем створе г/п Абрамково (рисунок 3.4) за период 1980–1996 гг., другие 18 лет наблюдений (1997–2014 гг.) использовались для независимой проверки эффективности моделирования стока.



Рисунок 3.4. Схема расположения постов, используемых при работе в ИМК ECOMAG для района г. Великий Устюг

На рисунках 3.5–3.7 представлены фактические и рассчитанные суточные расходы воды р. Северной Двины у пос. Абрамково, в створе гидрологического поста Каликино на р. Сухона и в створах гидрологических постов Гаврино и Подосиновец на р. Юг.

Значения критерия соответствия гидрографов Нэша–Сатклифа *NSE* для периода расчета 1980 - 2014 гг. для створов, расположенных на р. Северная Двина, р. Сухона и р. Юг показаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Критерии эффективности расчетов гидрографов стока в различных створах речной сети в бассейне р. Северной Двины за период калибровки 1.01.1980–31.12.1996 гг. и за период верификации 1.01.1997–31.12.2014

№п/п	Река	Гидрометрический створ	Площадь водосбора	Критерий Нэша-Сатклифа по среднесуточным расходам воды за 1980–1996 гг./1997–2014	Относительная систематическая ошибка расчета (BIAS) (%)
1	Северная Двина	с. Абрамково	220 000	0.87 / 0.81	9,8
2	Сухона	д. Каликино	49 200	0.80 / 0.82	4,7
3	Юг	д. Гаврино	34 800	0.84 / -	8,7
4	Юг	пос. Подосиновец	15 200	0.81 / 0.82	9,5

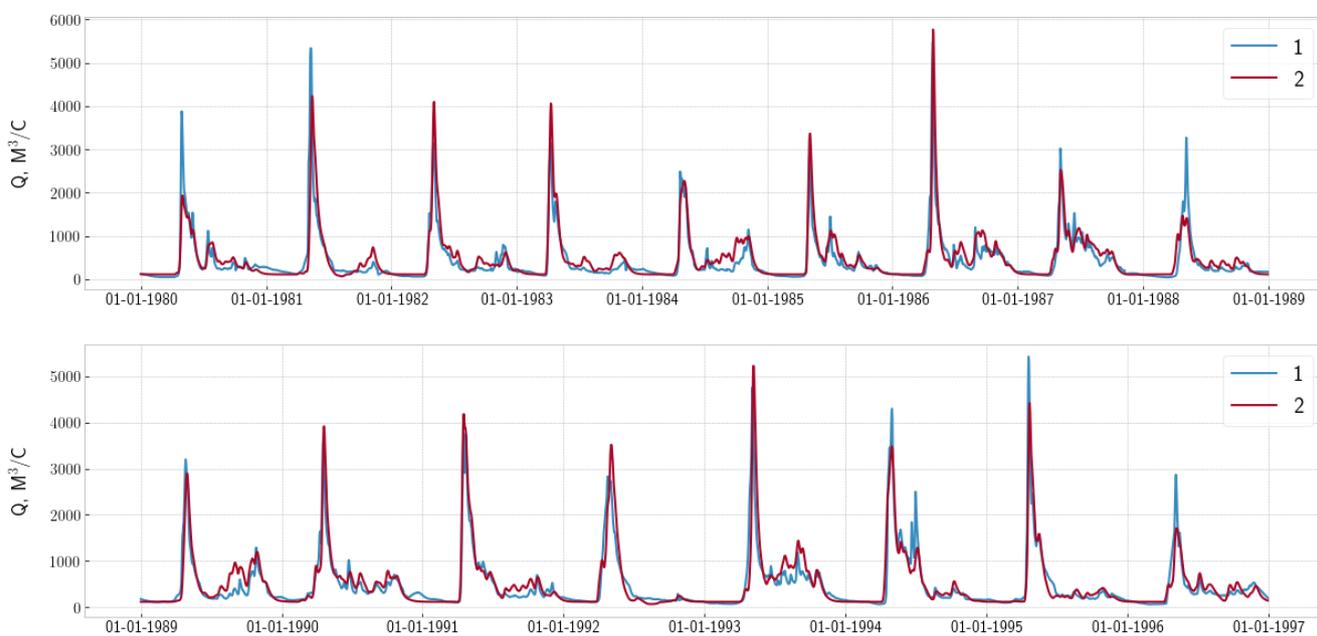
Согласно критерию соответствия Нэша–Сатклифа *NSE* качество моделирования 35-летних рядов среднесуточных расходов воды для всех гидропостов оценивается как хорошее (*NSE* для всех створов превышает 0,75). Расчет относительной систематической ошибки *BIAS* также показал хорошее соответствие между фактическими и смоделированными данными. Подчеркнем, что калибровка модели производилась только по данным о расходах воды в замыкающем створе за период 1980–1996 гг., т.е. приведенные результаты свидетельствуют о возможностях модели воспроизводить характеристики водного режима в различных створах рек бассейна р. Северной Двины с использованием пространственно распределенных метеорологических входов и единой для всего бассейна базы параметров модели, задаваемых по измеряемым характеристикам водосбора.

На этапе калибровки модель ECOMAG была настроена так, чтобы адекватно воспроизводить пики половодья, не сильно завышая при этом сток после прохождения пика и в меженный период. В отдельные годы, например, в 1981, 1988 и 1995 гг., наблюдается расхождение величины смоделированного и фактического расхода воды, однако эта ошибка не является систематической. Данная ошибка модели может быть связана с многофакторностью формирования стока, при которой многочисленные комбинации факторов и их связи между собой невозможно учесть [Евстигнеев, Магрицкий, 2016]. Несмотря на это, модель правильно воспроизвела максимальный расход для 1986 и 1993 гг., когда расход воды р. Сухоны превысил 5000 м³/с. В целом можно отметить, что модель

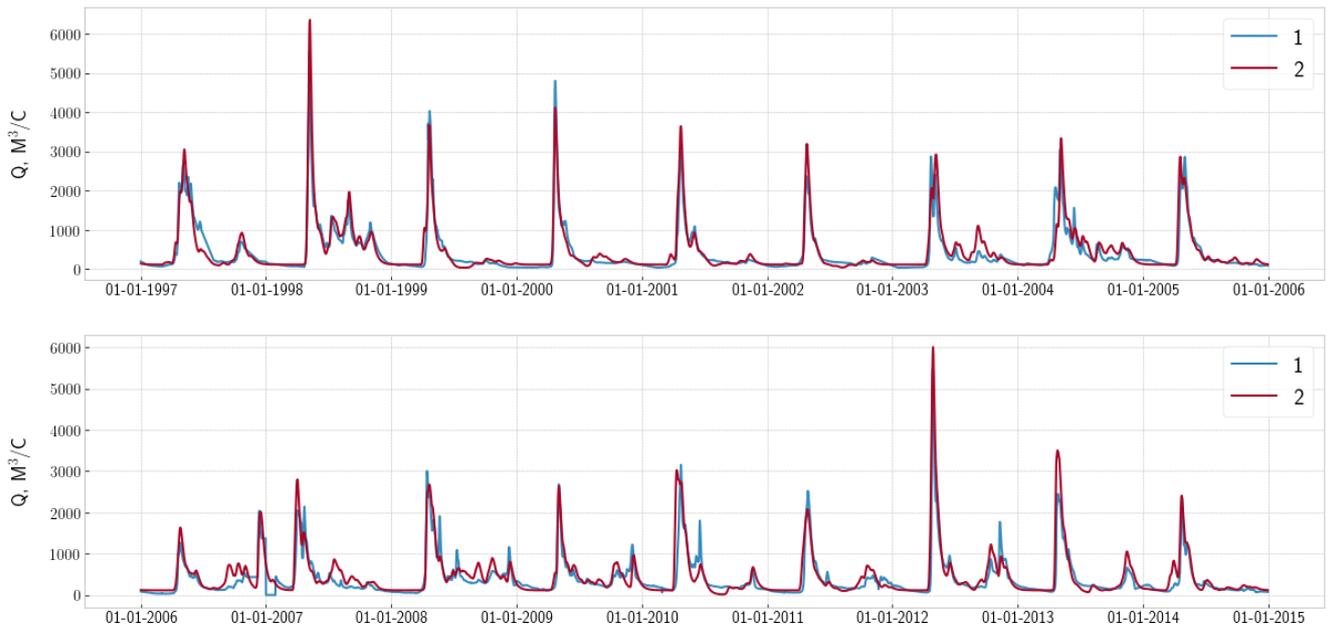
корректно воспроизводит время и начало различных фаз водного режима, в том числе и половодья.

На этапе верификации модель ЕСОМАГ корректно воспроизвела максимальный расход реки Сухоны во время катастрофического наводнения 1998 г. и наводнения 2013 г. (рисунок 3.5б) На графике можно отметить, что в целом модель достаточно точно воспроизводит величину максимального расхода во время весеннего половодья и завышает расходы воды во время летней межени. Кроме того, начиная с 2003 г., наблюдается увеличение разницы между смоделированными и фактическими данными для дождевых паводков. Это может быть связано с климатическими изменениями, влияющими на перераспределение стока в течение года, однако это требует дополнительного анализа, который не входит в рамки данного исследования.

В связи с закрытием поста Гаврино на р. Юг в 1989 г. сравнение фактического и смоделированного уровня производилось за 9 лет (рисунок 3.6а) Для четырех лет из рассматриваемого периода наблюдается занижение максимальных смоделированных расходов воды на пике половодья, однако для двух лет выявлена обратная ситуация. Для половодья 1986 г., когда максимальный расход превысил $4000 \text{ м}^3/\text{с}$, наблюдается хорошее соответствие фактических и смоделированных данных.

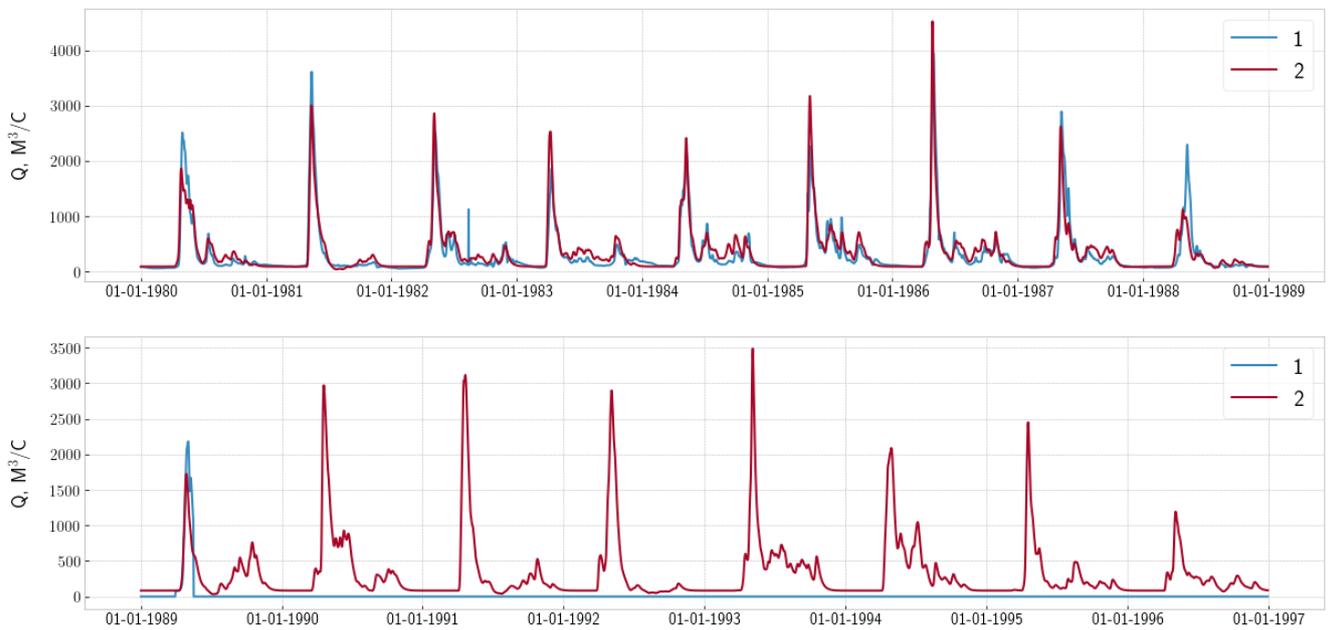


а)

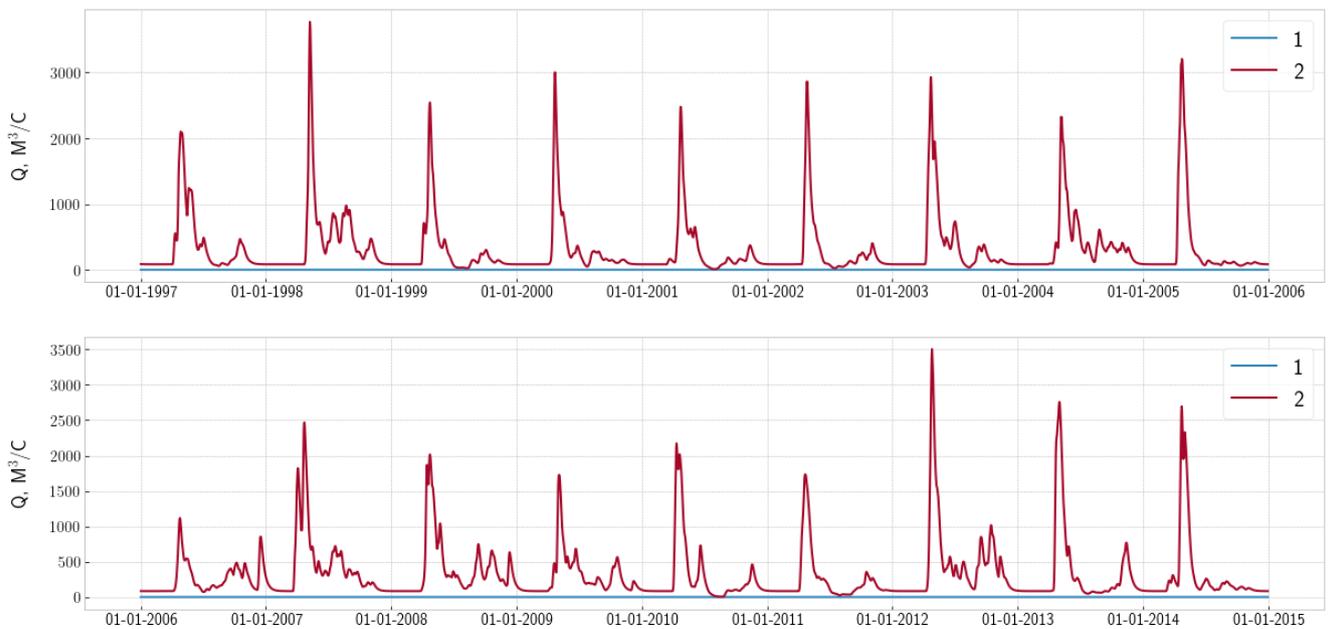


б)

Рисунок 3.5. Фактический (1) и рассчитанный (2) гидрографы стока в бассейне р. Северной Двины за период калибровки 1.01.1980–31.12.1996 гг. (а) и за период верификации 1.01.1997–31.12.2014 (б) (г/п Каликино – р. Сухона)



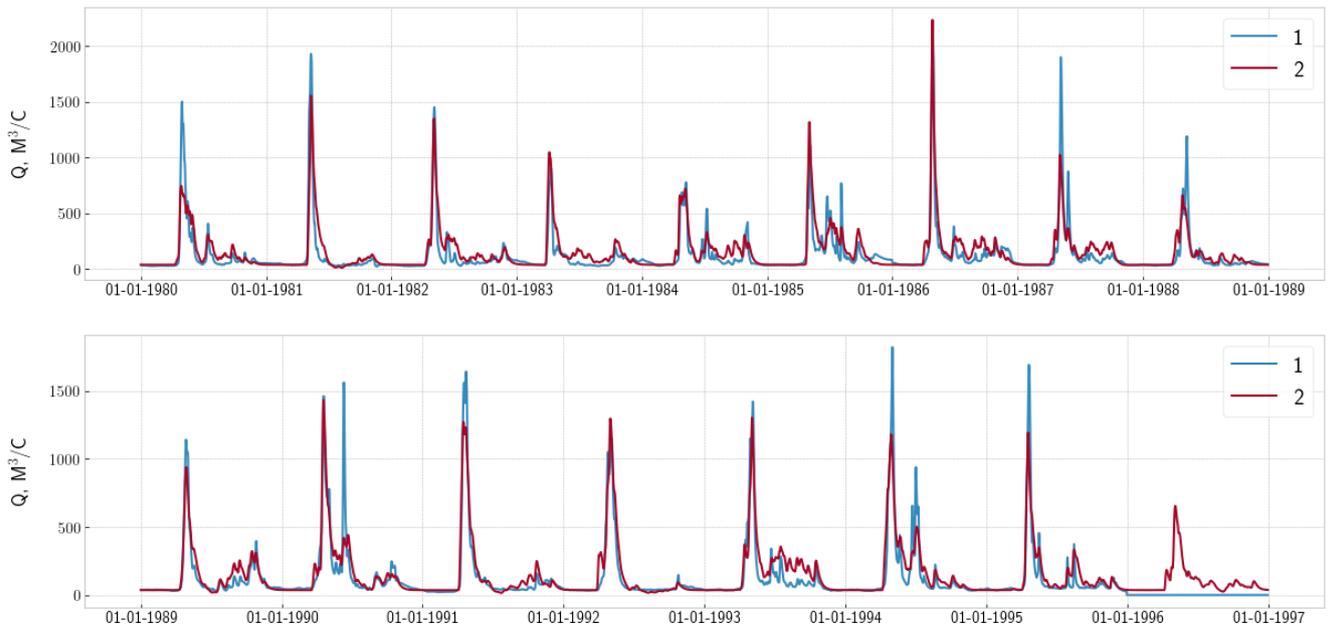
а)



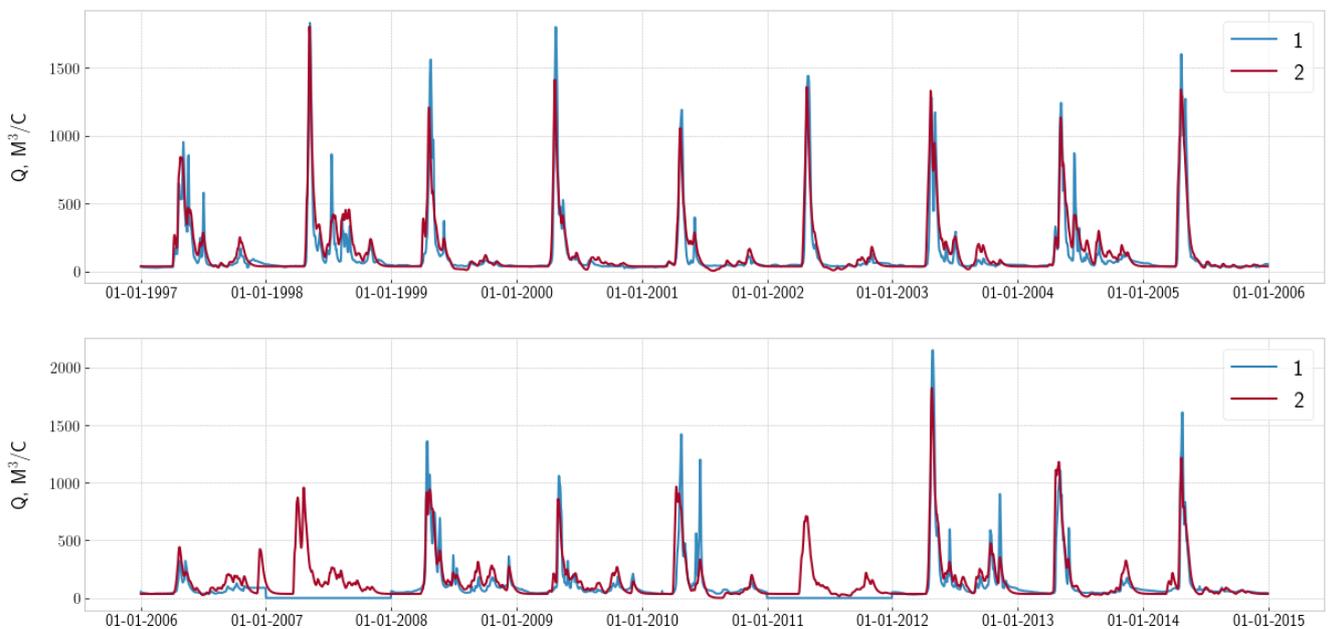
б)

Рисунок 3.6. Фактический (1) и рассчитанный (2) гидрографы стока в бассейне р. Северной Двины за период калибровки 1.01.1980–31.12.1996 гг. (а) и за период верификации 1.01.1997–31.12.2014 (б) (г/п Гаврино – р. Юг)

Так как 9 лет наблюдений недостаточно, чтобы утверждать о хорошем или плохом качестве воспроизведения процесса формирования стока моделью ЕСОМАГ р. Юг, были привлечены данные о стоке по посту, расположенному выше по течению в пос. Подосиновец (рисунок 3.7). На графике видно, что в большинстве случаев наблюдается занижение моделируемого стока относительно фактического, причем в отдельные годы, например, в 1987 г., эта разница может достигать 50%, но несмотря на это, выдающееся половодье 1998 г. было смоделировано верно. В целом с учетом сравнения гидрографов работу модели для р. Юг можно оценить, как удовлетворительную, несовпадение расчетных и фактических воды можно объяснить небольшим периодом калибровки модели для д. Гаврино.



а)



б)

Рисунок 3.7. Фактический (1) и рассчитанный (2) гидрографы стока в бассейне р. Северной Двины за период калибровки 1.01.1980–31.12.1996 гг. и за период верификации 1.01.1997–31.12.2014 (г/п Подосиновец– р. Юг)

3.3 Генератор погоды и использование модели ECOMAG для анализа сценариев прохождения половодья⁷

В данной работе предпринята попытка оценить максимально возможные расходы воды р. Северная Двина в районе слияния р. Суона и Юг у г. Великий Устюг для реализации сценария наихудшего прохождения половодья.

Применение комплекса моделей для изучения наводнений стокового генезиса обусловлено двумя факторами:

1. Наличие реальных случаев прохождения больших расходов воды по р. Северная Двина в районе г. Великий Устюг без непосредственного образования ледовых заторов. Так, во время знаменитого наводнения 1998 г. пик половодья наблюдался уже после разрушения ледового затора, для р. Сухона максимальное значение расхода воды составило $5560 \text{ м}^3/\text{с}$, для реки Юг точных данных о максимальном расходе воды нет, однако по некоторым оценкам он составлял $2700\text{-}2800 \text{ м}^3/\text{с}$.

2. При прохождении расходов воды 1% обеспеченности и менее ледовые заторы не образуются, однако затопление поймы уже значительно.

Проблема экстраполяции эмпирической кривой в область, находящейся за диапазоном, освещенным фактическими данными, возрастает по мере уменьшения процента обеспеченности. А.В. Христофоров в 1993 г. теоретически обосновал, что даже при идеальном соответствии аналитической и эмпирической кривой, погрешности в области редких повторяемостей могут достигать порядка нескольких десятков процентов [Христофоров, 1993].

Проблема расчета расходов редкой обеспеченности до сих пор полностью не решена в прикладной гидрологии, используемый в нашей работе подход делает упор на статистическое обоснование (формирование временных метеорологических рядов большой продолжительности), а не на перестраховку в намеренном завышении статистических параметров, например, установлении C_s/C_v равным 3-4.

Основой для получения продолжительных выборок данных о метеорологических элементах являлась стохастическая модель, «генератор погоды». Впервые термин «генератор погоды» упомянул в своей работе К.Ричардсон [Richardson, 1981], впоследствии он стал нарицательным, им стали называть класс стохастических моделей, основанных на моделировании псевдовременных рядов. Ричардсон описал модель, которая воспроизводила совместный ход максимальной и минимальной температуры, суточных

⁷ Раздел написан на основе статьи [Sazonov et al., 2019]

сумм осадков и суммарной солнечной радиации. По мере развития вычислительных ресурсов в 1990-е годы появились различные стохастические модели, основанные на принципах работы, заложенные К.Ричардсоном, например, модель WXGEN [Sharpley, Williams, 1990]. В 1991 г. в Великобритании была создана модель LARS-WG [Racsko et al., 1991], которая воспроизводила внутригодовой ход тех же величин, что и в модели К.Ричардсона: суточные осадки, суммарная солнечная радиация, суточные максимумы и минимумы температуры воздуха. Количество осадков в ней задавалось на основе эмпирических распределений, для описания температуры воздуха использовалась множественная модель авторегрессии 1-ого порядка, однако, в отличие от модели К.Ричардсона для задания сезонного хода параметров применялись ряды Фурье [Гельфан, 2007]. Модель CLIGEN [Arnold, Elliot, 1996] была разработана для нужд Министерства сельского хозяйства США, позднее она была дополнена [Stockle et al., 1999]. Помимо вышеописанных четырех параметров в модели CLINGEN воспроизводится среднесуточная скорость ветра, подчиняющаяся распределению вероятностей Вейбулла, а также минимальные и максимальные значения дефицита влажности, оцениваемые на основе данных о температуре с помощью уравнения линейной регрессии.

В монографии «Динамико-стохастическое моделирование талого стока» А.Н. Гельфан [Гельфан, 2007] отмечает, что подобные генераторы погоды хорошо воспроизводят основные климатические особенности изучаемого региона за счет использования большого числа параметров, задаваемых по фактическим данным, однако также отмечает два момента:

1. Наличие проблемы обеспечения генератора погоды исходной метеорологической информацией, которая позволяла бы получать устойчивые оценки статистических параметров.

2. Вторая проблема использования генератора погоды заключается в существовании локальных метеоусловий, которые не характерны для обширной площади, но тем не менее будут фиксироваться метеостанциями.

В данной работе для моделирования выборок метеорологических характеристик на территории бассейна р. Северная Двина использовалась стохастическая модель MSFR_WG (Multi-Site FRagment-based stochastic Weather Generator) (автор Гельфан А.Н.), представляющая собой «генератор погоды», содержащий в себе вложенные генераторы, которые описывают последовательности метеорологических переменных с временным осреднением год, месяц и сутки [Гельфан, Морейдо, 2014]. Этот генератор погоды предназначен для моделирования методом Монте-Карло многолетних временных рядов метеорологических характеристик - «входных» величин модели формирования стока

(среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, интенсивности осадков) с учетом взаимной временной и пространственной статистической связности между ними. Пространственная и временная изменчивость метеорологических характеристик учитывается в генераторе погоды использованием модифицированного метода фрагментов Г.Г. Сванидзе [Сванидзе, 1964, 1977].

Ниже коротко изложены основные этапы применения генератора MSFR_WG для исследуемой территории [Морейдо, 2015; Гельфан, Морейдо, 2015].

На первом этапе рассчитывались нормализованные поля (пространственные фрагменты) среднесуточных значений метеорологических переменных по данным наблюдений на 35 станциях за 43 года (1971-2012 гг.). Для каждого года наблюдений, нормированным относительно среднего по пространству в рассматриваемом году значениям рассматриваемых метеорологических характеристик, были построены пространственные фрагменты.

На следующем этапе выполнялось моделирование многолетних искусственных последовательностей средних по пространству среднегодовых значений искомым метеорологических переменных с учетом их взаимной корреляции методом Монте-Карло.

Заключительный шаг алгоритма – расчет полей среднесуточных значений метеорологических переменных по соответствующим пространственным фрагментам и с использованием смоделированных среднегодовых, средних по площади значений каждой метеорологической переменной. Фрагменты выбирались случайным образом методом латинского гиперкуба из созданного ранее набора фрагментов.

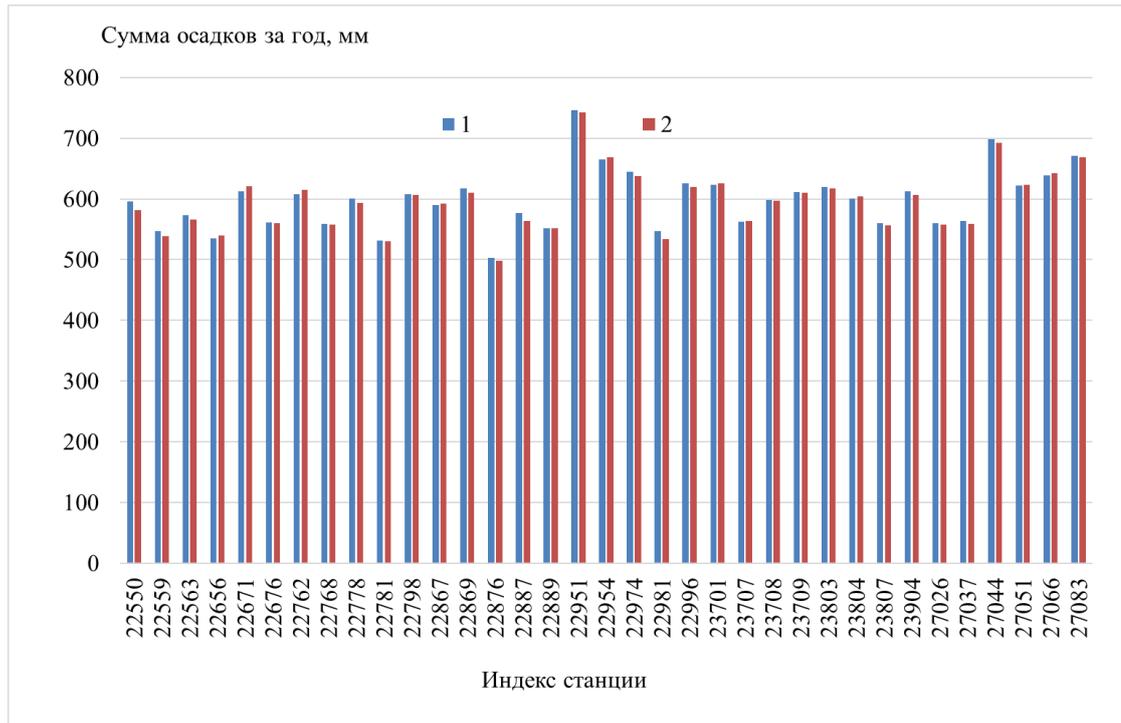
Используемый в работе метод пространственных фрагментов – малопараметрический по сравнению с методами, обычно применяемыми в подобных генераторах погоды и основанными на использовании аналитических пространственных корреляционных функций [Морейдо, 2015; Гельфан, Морейдо, 2015]. Этот генератор погоды имеет всего 9 параметров, перечисленных в таблице 3.2. Здесь же даны выборочные оценки параметров, вычисленные по данным многолетних метеорологических наблюдений в рассматриваемом бассейне за 1971-2012 гг.

С помощью модели MSFR_WG были смоделированы соответствующие современному климату (так как использовались параметры, определенные за 1971-2012 гг.) искусственные ряды среднесуточных значений метеорологических характеристик: интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха длиной 1000 лет для каждой станции на рассматриваемой территории. Для проверки качества разработанного генератора погоды сравнивались статистические характеристики, определенные по фактическим и искусственным рядам метеорологических переменных: средние

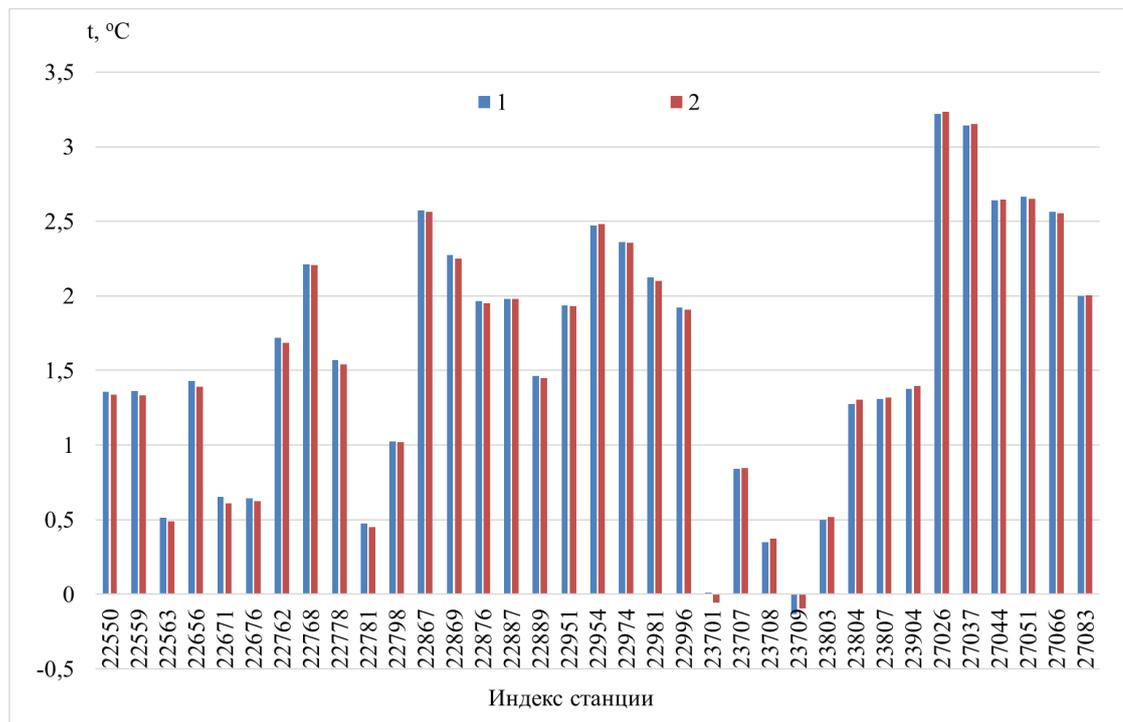
многолетние величины за год, месяц и сутки; стандартные отклонения среднегодовых и среднемесячных величин; коэффициенты корреляции между среднегодовыми (среднемесячными) значениями на отдельной станции и соответствующими значениями на других станциях; пространственные корреляционные функции значений осадков, температуры и влажности воздуха, осредненных за разные временные интервалы (год, месяц, сутки) (рисунок 3.8).

Таблица 3.2 - Список параметров модели MSFR_WG и их значения для водосбора
р. Северная Двина

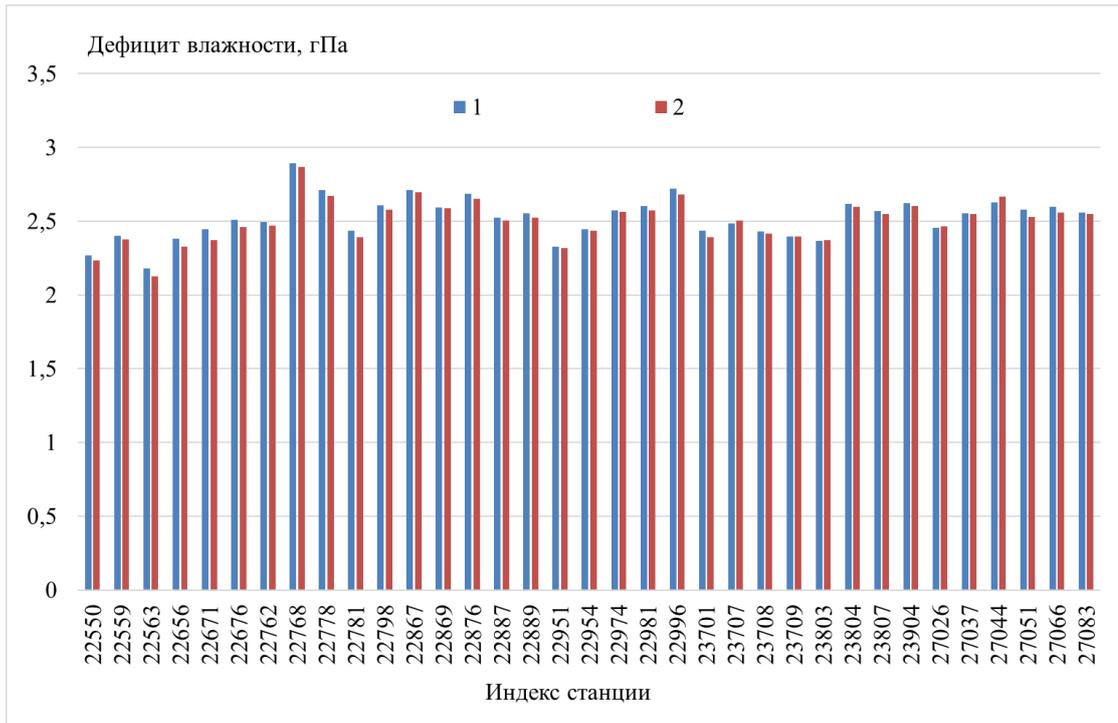
№ п/п	Название параметра	Значение для рассматриваемой территории
1	среднесуточная интенсивность осадков, мм/сут (средняя по площади за 1971-2012гг)	1.63
2	среднесуточная температура воздуха, °С (средняя по площади за 1971-2012гг)	1.55
3	среднесуточный дефицит влажности воздуха, мб (средний по площади за 1971-2012гг)	2.52
4	стандартное отклонение средней по площади среднегодовой интенсивности осадков, мм/сут	0.15
5	стандартное отклонение средней по площади среднегодовой температуры воздуха, °С	1.05
6	стандартное отклонение среднего по площади среднегодового дефицита влажности воздуха, мб	0.30
7	коэффициент корреляции среднегодовых, средних по площади осадков и температуры воздуха	Статистически незначим
8	коэффициент корреляции среднегодовых, средних по площади осадков и дефицита влажности воздуха	- 0.32
9	коэффициент корреляции среднегодовых, средних по площади температуры и дефицита влажности воздуха	Статистически незначим



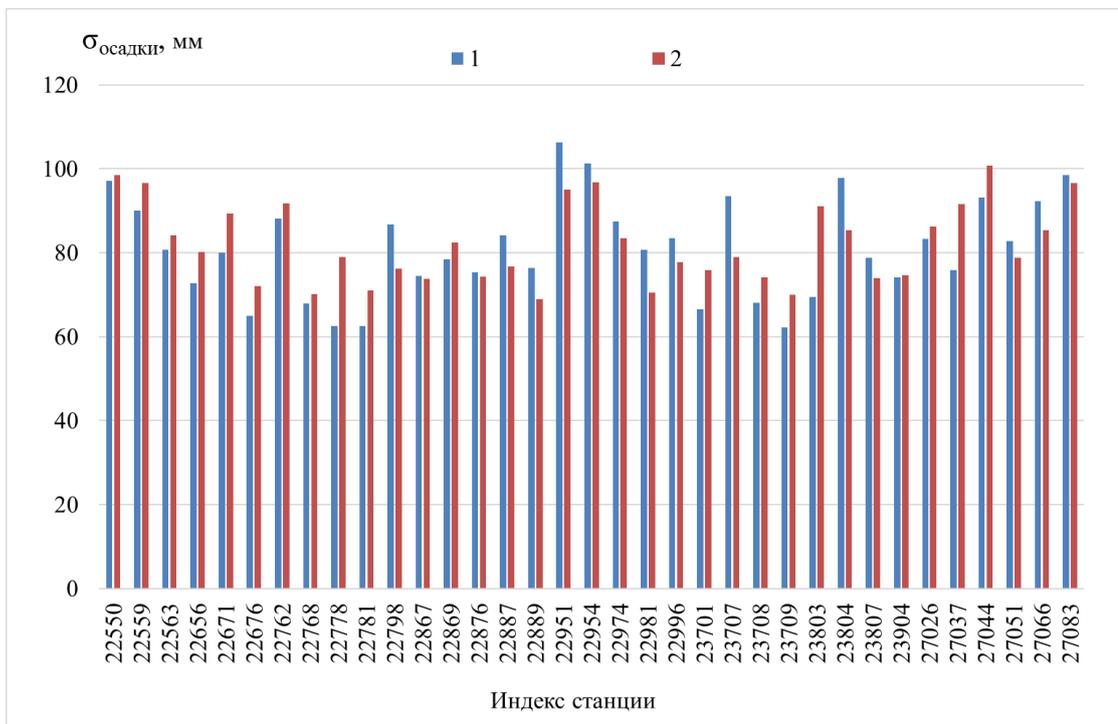
а)



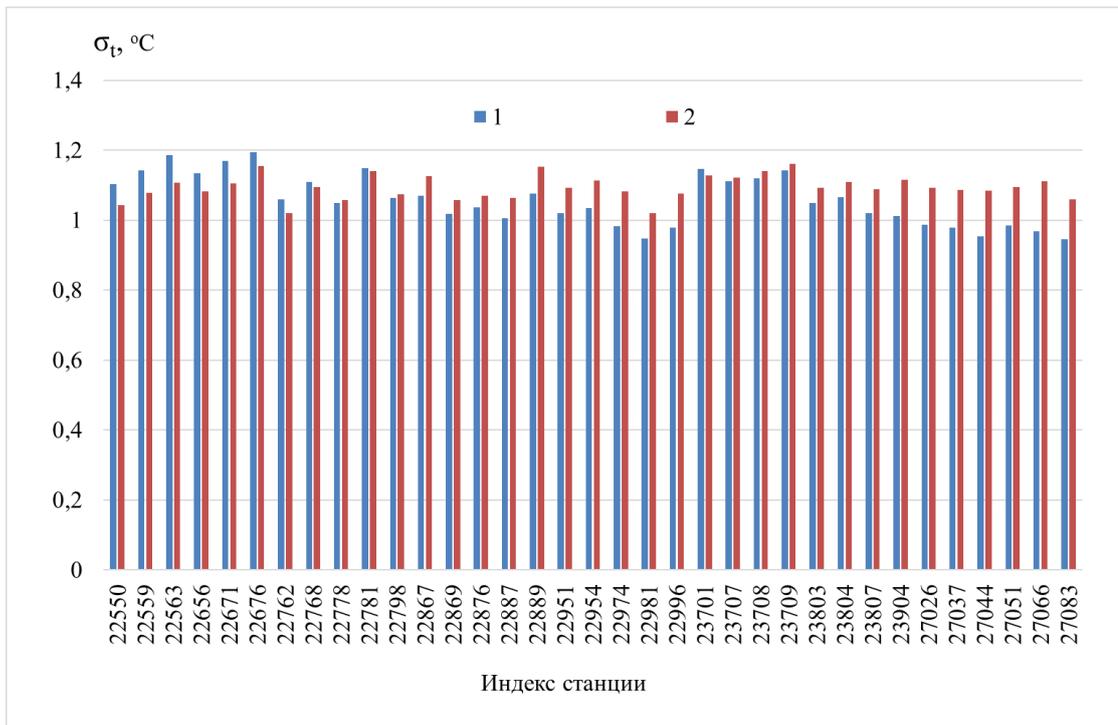
б)



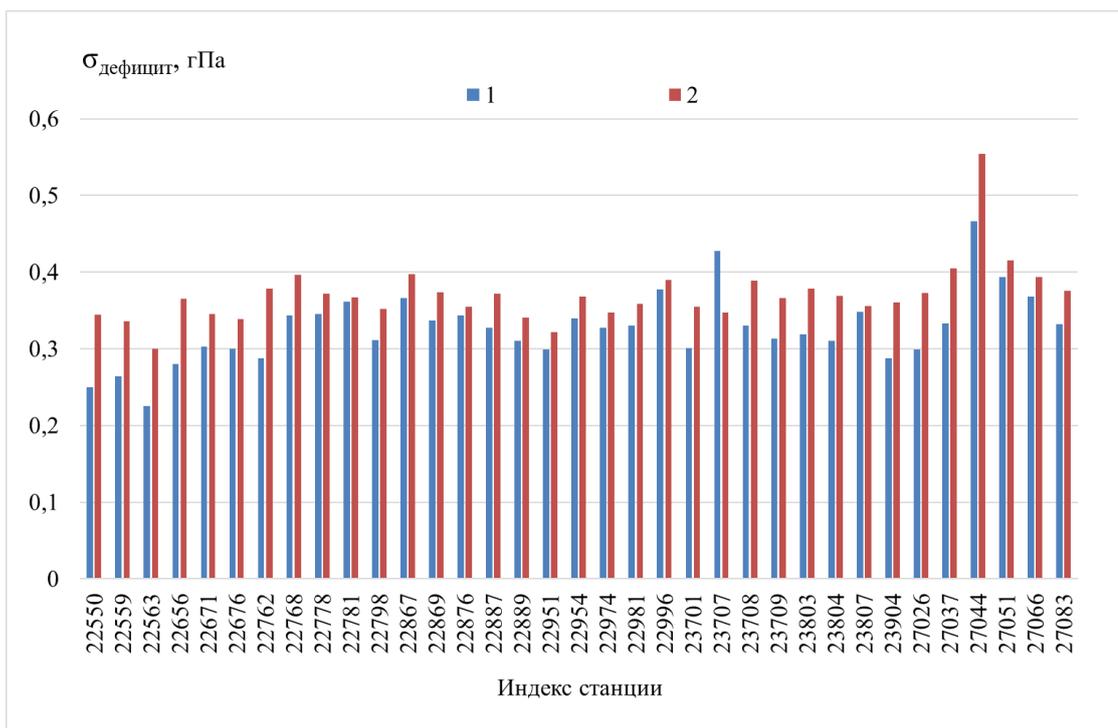
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.8. Норма среднегодовых величин суммы осадков (а), температуры (б) и влажности воздуха (в) и среднеквадратичное отклонение среднегодовых величин суммы осадков (г), температуры и влажности воздуха, оцененные по фактическим (1) и смоделированным данным (2)

Расчеты показали, что статистики искусственных рядов искомым метеорологических переменных оказались в пределах стандартного отклонения оценок соответствующих характеристик по рядам наблюдений за этими метеорологическими переменными на сети станций. Этот вывод оказался справедлив для разных временных осреднений искомым переменных – от суток до года.

Удовлетворительные результаты проверки стохастического генератора погоды MSFR_WG позволяют использовать смоделированные временные ряды метеорологических характеристик для задания пространственно распределенных случайных входов в описанную выше детерминистическую гидрологическую модель ECOMAG. Такое сочетание генератора погоды и модели формирования стока позволяет результаты их совместной работы как результаты динамико-стохастического моделирования речного стока.

3.4. Результаты стохастического моделирования половодья 0.1% обеспеченности с помощью комплекса моделей

Разработанная динамико-стохастическая модель формирования речного стока р. Северная Двина проверялась при сравнении с данными о фактических расходах воды в замыкающих створах р. Сухона и р. Юг, в узле слияния которых находится город Великий Устюг. Далее полученные в результате динамико-стохастического моделирования расходы воды использовались как исходные данные для гидродинамической модели (рисунок 3.9).

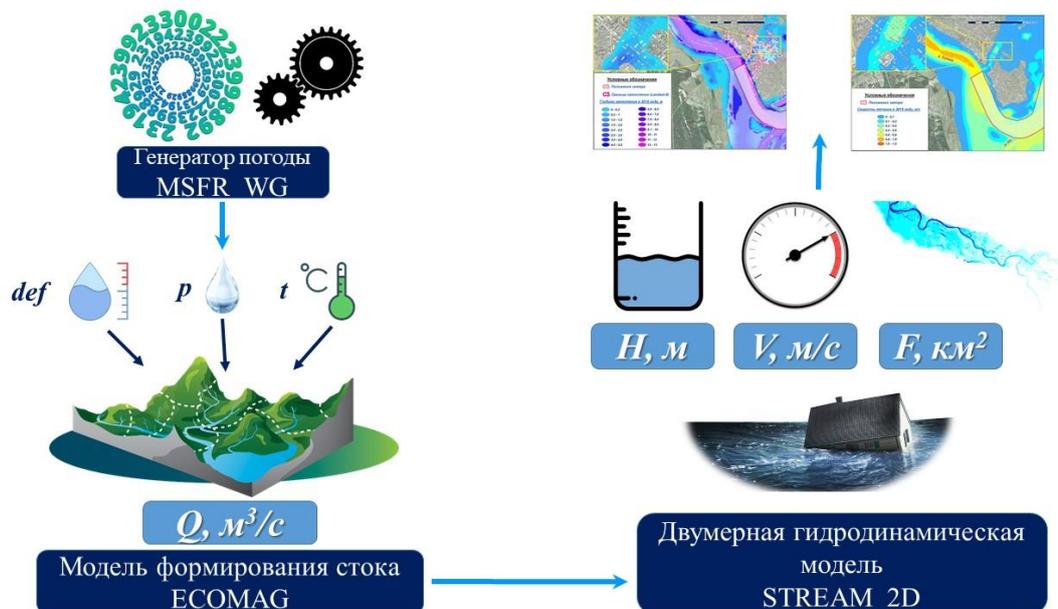


Рисунок 3.9. Схема совместного последовательного использования динамико-стохастической модели MSFR_WG, модели формирования стока ECOMAG и

гидродинамической модели STREAM_2D для расчета возможных характеристик затопления в створе г. Великий Устюг

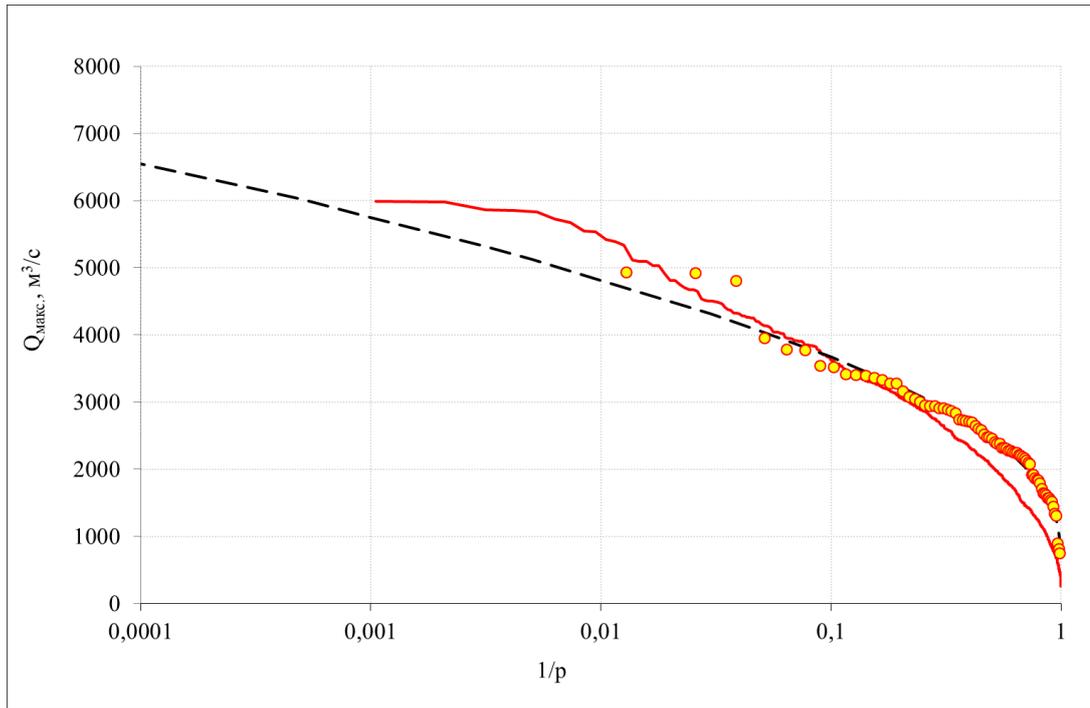
Численные эксперименты были организованы следующим образом:

1. С помощью генератора погоды были смоделированы искусственные последовательности среднесуточных метеорологических характеристик длиной 1000 лет, которые являются входной информацией в модель ECOMAG. Затем по гидрологической модели рассчитан 1000-летний временной ряд ежедневных расходов воды в замыкающих створах р. Сухона и р. Юг, по которому получены 1000 значений максимальных за год расходов воды. По полученным выборкам оценены статистические характеристики максимальных расходов и построены кривые вероятности превышения, которые сравнивались с кривыми, построенными по наблюдаемым рядам максимальных расходов в рассматриваемых створах рек.

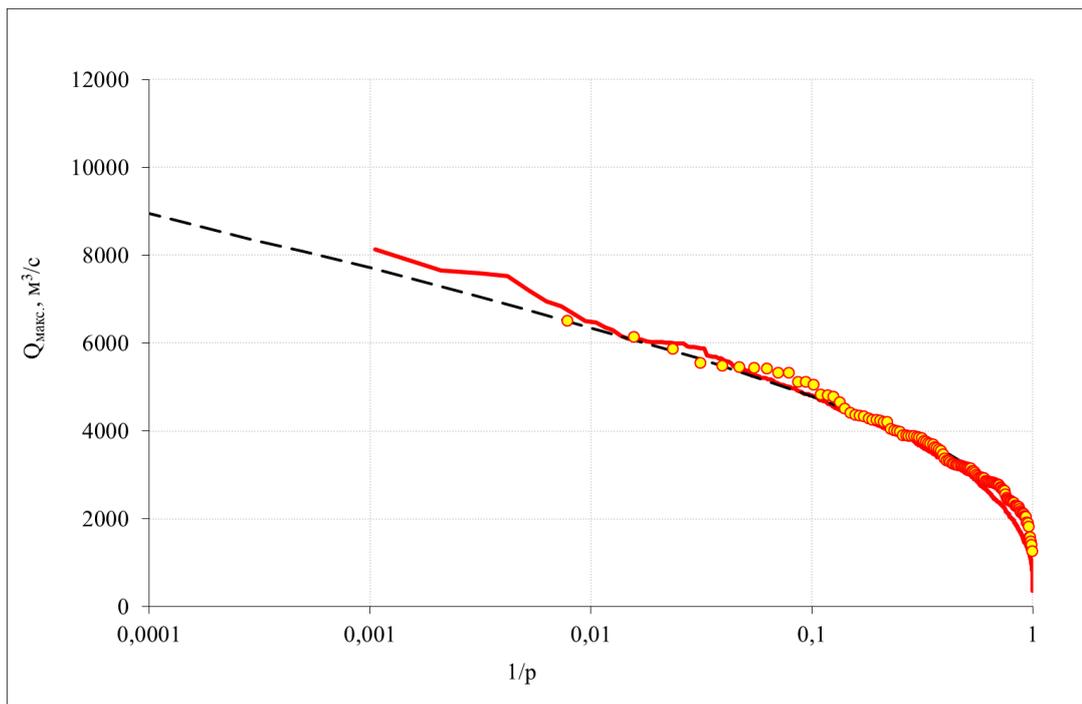
2. Из смоделированных искусственных гидрографов стока в замыкающих створах рр. Сухона и р. Юг выбирались такие сочетания, которые формировали максимальный, со средней повторяемостью 1 раз в 1000 лет, гидрограф стока в узле слияния указанных рек.

3. С помощью двумерной гидродинамической модели STREAM_2D [Belikov et al., 2015], в качестве граничного условия в которой задавался рассчитанный по динамико-стохастической модели гидрограф максимального стока, рассчитывался ход уровня воды и динамика затопления поймы в створе г. Великий Устюг. Ниже изложены результаты численных экспериментов.

На рисунке 3.10 сравниваются кривые распределения максимальных расходов воды в замыкающих створах р. Юг и р. Сухона, построенные по выборкам фактических величин максимального стока и величин, рассчитанных с помощью динамико-стохастической модели. Использовались фактические данные о максимальных расходах воды р. Юг за 58 лет (с 1931 по 1989 годы) и по р. Сухоне за 127 лет (с 1881 по 2007 годы). В таблице 3.4 приведены статистические характеристики максимального стока, оцененные по фактическим и рассчитанным рядам.



а)



б)

Рисунок 3.10. Вероятности превышения максимальных за год расходов воды р. Юг (а) и р. Сухона (б), оцененные по ряду фактических значений (желтые точки), по 1000-летнему ряду, рассчитанному с помощью динамико-стохастической модели (красная линия).

Черным пунктиром показана кривая трехпараметрического гамма-распределения, построенная по фактическим данным

Таблица 3.2. Статистические характеристики максимальных расходов стока р. Юг и р. Сухона, оцененные по фактическим и рассчитанным с помощью динамико-стохастической модели рядам стока

	р. Юг (г/п Гаврино)		р. Сухона (г/п Каликино)	
	Фактические данные	Модель	Фактические данные	Модель
Среднее	2531	2181	3352	3130
Стандартное отклонение	852	1321	1078	1246
C_v	0.33	0.60	0.32	0.39
C_s	0.54	0.73	0.62	0.58

Расчеты показали, что динамико-стохастическая модель позволила с удовлетворительной точностью воспроизвести средние значения стока на обеих реках, а также стандартное отклонение максимального стока р. Сухона: для перечисленных статистик отклонения фактических и рассчитанных значений не выходят за пределы 95%-го интервала выборочной погрешности оценок по фактическому ряду стока. Однако стандартные отклонения рассчитанных величин максимального стока р. Юг статистически значимо превышают стандартные отклонения соответствующих фактических величин (см. таблицу 3.2). Анализ результатов показал, что для р. Юг оказались занижены максимальные расходы высокой обеспеченности (т.е. максимальные расходы низких половодий; см. также верхний рисунок 3.10), в то время как максимальные расходы малой обеспеченности (наиболее высоких половодий) получились близкими к наблюдаемым, что позволяет использовать результаты расчетов в области малых обеспеченностей максимальных расходов для гидродинамического моделирования максимального затопления в створе г. Великий Устюг (в узле слияния р. Сухона и р. Юг). Анализ смоделированных рядов показал, что наиболее критический сценарий прохождения половодья – это одновременное прохождение пиков по р. Сухона и р. Юг (рисунок 3.11).

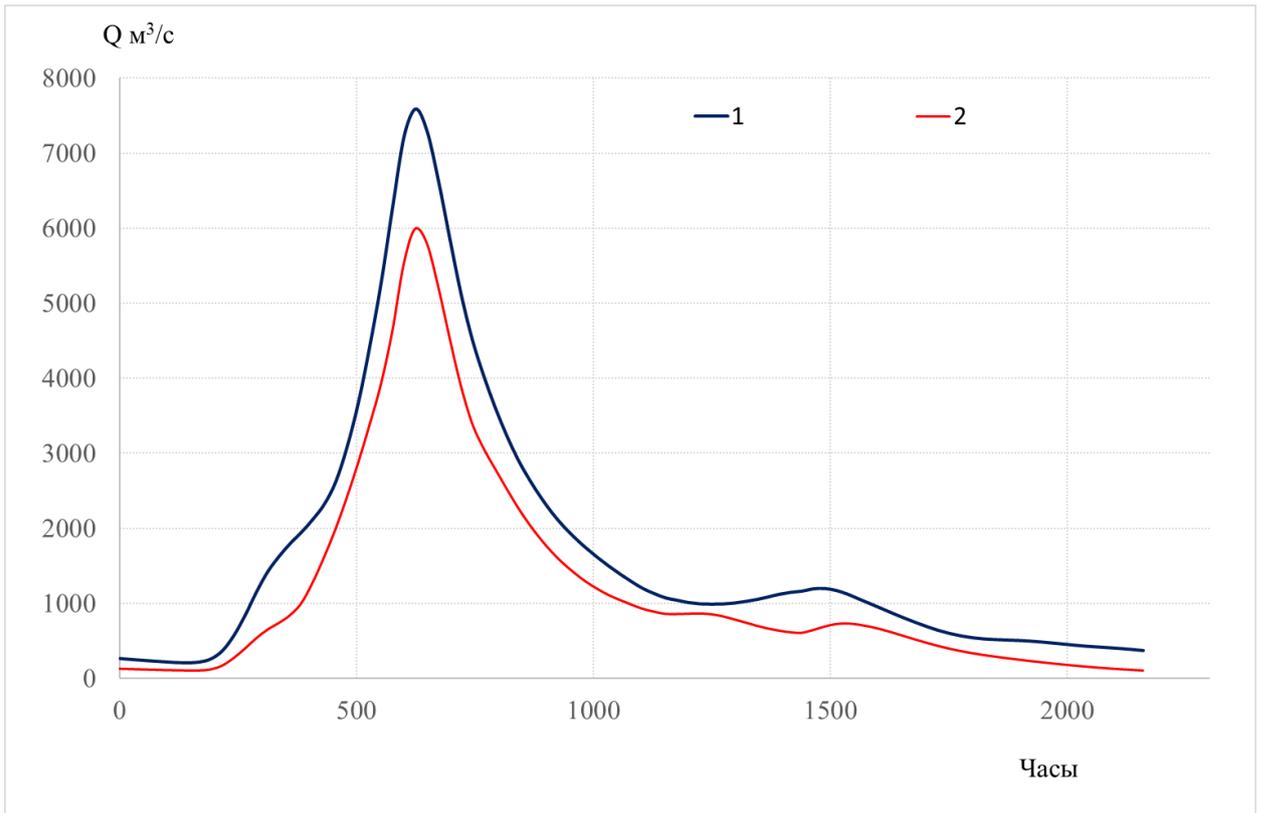


Рисунок 3.11. Гидрограф р. Сухона — пост д. Каликино (1) и гидрограф р. Юг — пост д. Гаврино (2) во время половодья 0,1% обеспеченности

Максимальный расход р. Северная Двина составил $13585 \text{ м}^3/\text{с}$ ($7591 \text{ м}^3/\text{с}$ по р. Сухона и $5994 \text{ м}^3/\text{с}$ по р. Юг), при этом стоит отметить, что максимальный рассчитанный расход воды по р. Сухона, не совпадающий с максимумом по р. Юг был выше, и составил $8141 \text{ м}^3/\text{с}$. Соответствующие гидрографы стока задавались в качестве граничных условий гидродинамической модели STREAM_2D, с помощью которой рассчитывались поля глубин затопления (рисунок 3.13) и скоростей потока. Показано, что при рассмотренном сценарии прохождения максимальных расходов воды на р. Сухона и р. Юг глубина затопления в черте города будет составлять 0.5 м. Среднее значение скорости течения в пределах моделируемой области составит 0.8 м/с, средняя глубина затопления составит 4.5 м, площадь затопления в пределах области моделирования составит 300 км^2 . Площадь затопления увеличивается при расходах воды 0.1% обеспеченности по сравнению с расходами воды 1% обеспеченности для всей модельной области незначительно, в пределах городской застройки – на 16%, а интенсивность потока или как ее еще называют удельная энергия потока, характеризующая опасность затопления, более чем на 30% (рисунок 3.12). Удельная энергия потока величина, объединяющая в себе скорость потока и его глубину: она рассчитывается по формуле:

$$P = 0,5 \rho H V^2, \quad (3.3)$$

где P – удельная энергия потока (кг/с^2), H – глубина потока, м; V – скорость течения, м/с; ρ – плотность воды, кг/м^3 .

Стоит отметить, что для наглядности на кривой зависимости удельной энергии потока от расхода воды была добавлена промежуточная точка, обозначенная как $Q_{1\%*1,05}$, она соответствует расходу воды 1% обеспеченности, увеличенного на 5%. Она показывает, что даже при незначительном увеличении расхода воды удельная энергия возрастает.

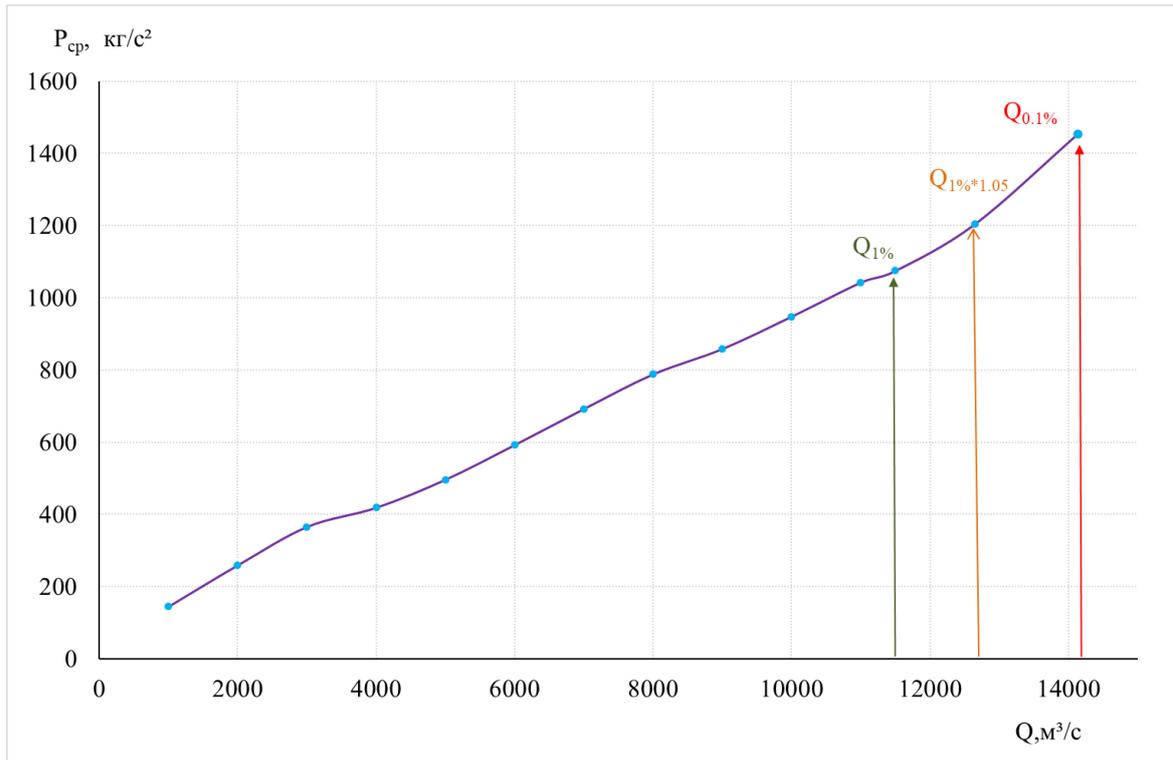


Рисунок 3.12. Зависимость удельной энергии потока воды от расхода воды

Максимальная отметка поверхности уровня воды по посту г. Великий Устюг будет составлять 57,36 м; для сравнения исторический максимум уровня воды, отмечавшийся в 1998г. при наличии ледового затора на 1.8 м больше и составляет 59.14 м БС (980 см над нулем графика поста). Сценарии с наводнениями стоково-заторного генезиса будут рассмотрены в следующей главе.

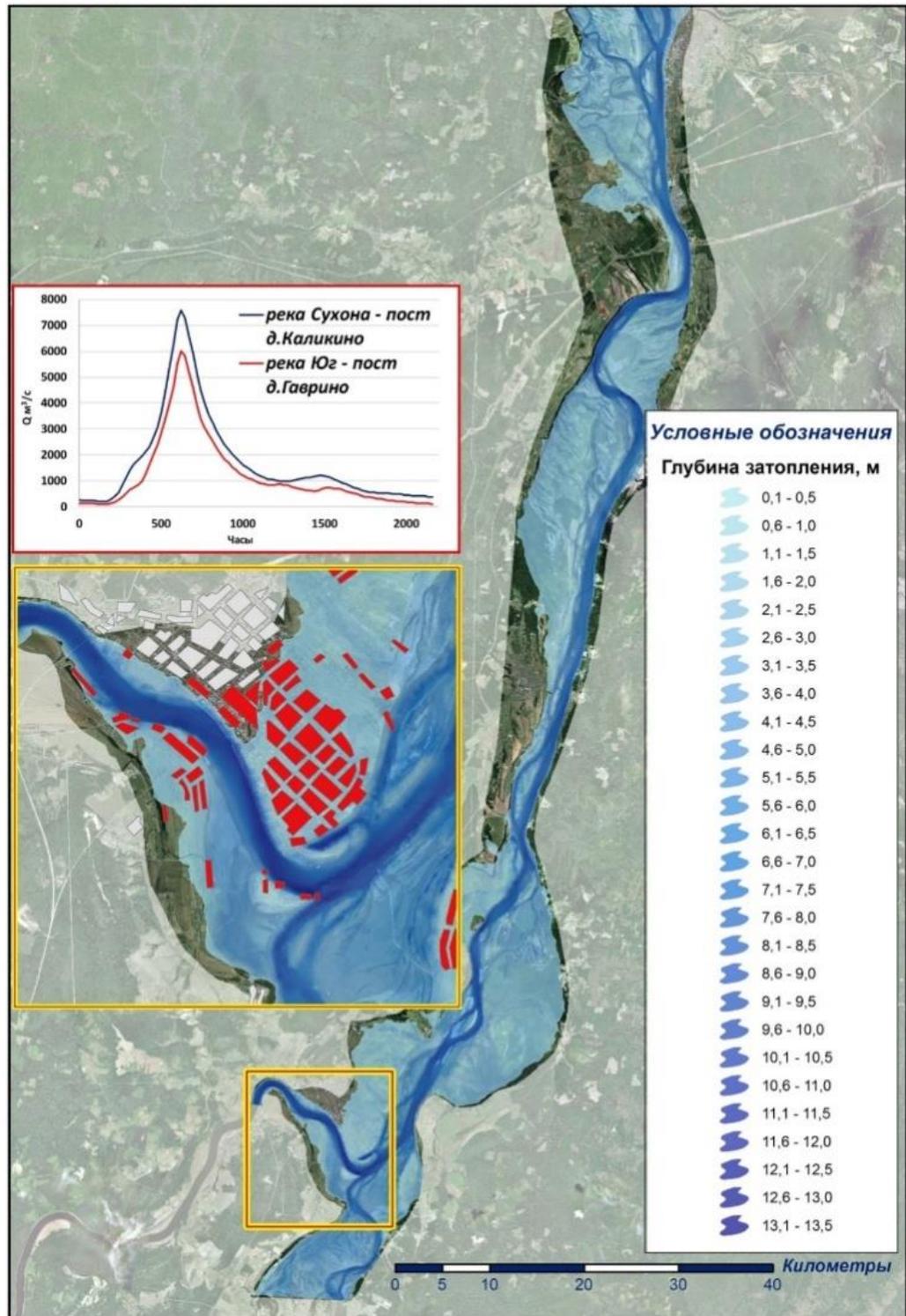


Рисунок 3.13. Карта глубины затопления г. Великий Устюг, рассчитанной по граничным условиям, задаваемым по результатам динамико-стохастического моделирования максимального стока 0.1% обеспеченности в узле слияния р. Сухона и р. Юг

Глава 4. Характеристики затопления поймы Северной Двины (на примере ключевого участка) для различных сценариев

4.1 Анализ выдающихся исторических наводнений

Прежде чем перейти к вероятным сценариям затопления, рассмотрим недавние наводнения 1998 и 2016 г., приведшие к наибольшим ущербам в последние годы.

4.1.1 Анализ наводнения 1998 г.

Для построения карты скорости течения в половодье 1998 г. (рисунок 4.1) были взяты максимальные значения скоростей течения в расчетных ячейках, полученные при моделировании. На карте видно, что скорость меняется в пределах от 0 до 2 м/с, при этом скорости течения на пойме значительно увеличиваются по сравнению с беззаторными условиями. Наибольшие скорости наблюдаются у д. Коромыслово, там они достигают 2,5 м/с. Такие скорости являются критическими для бескаркасных зданий и могут приводить к средним разрушениям кирпичных домов средней этажности. Также высокие значения скорости наблюдаются у д. Дымково, там скорость колеблется в интервале от 1 до 1,5 м/с, а локально до 2 м/с. При таких скоростях течения возможны средние разрушения одноэтажных и двухэтажных деревянных домов. В центральной части г. Великий Устюг, согласно карте, скорость течения колеблется в интервале от 0,01 до 0,50 м/с. Однако в случае наводнения критической характеристикой наводнения для города будет уже не скорость течения, а глубина и продолжительность затопления.

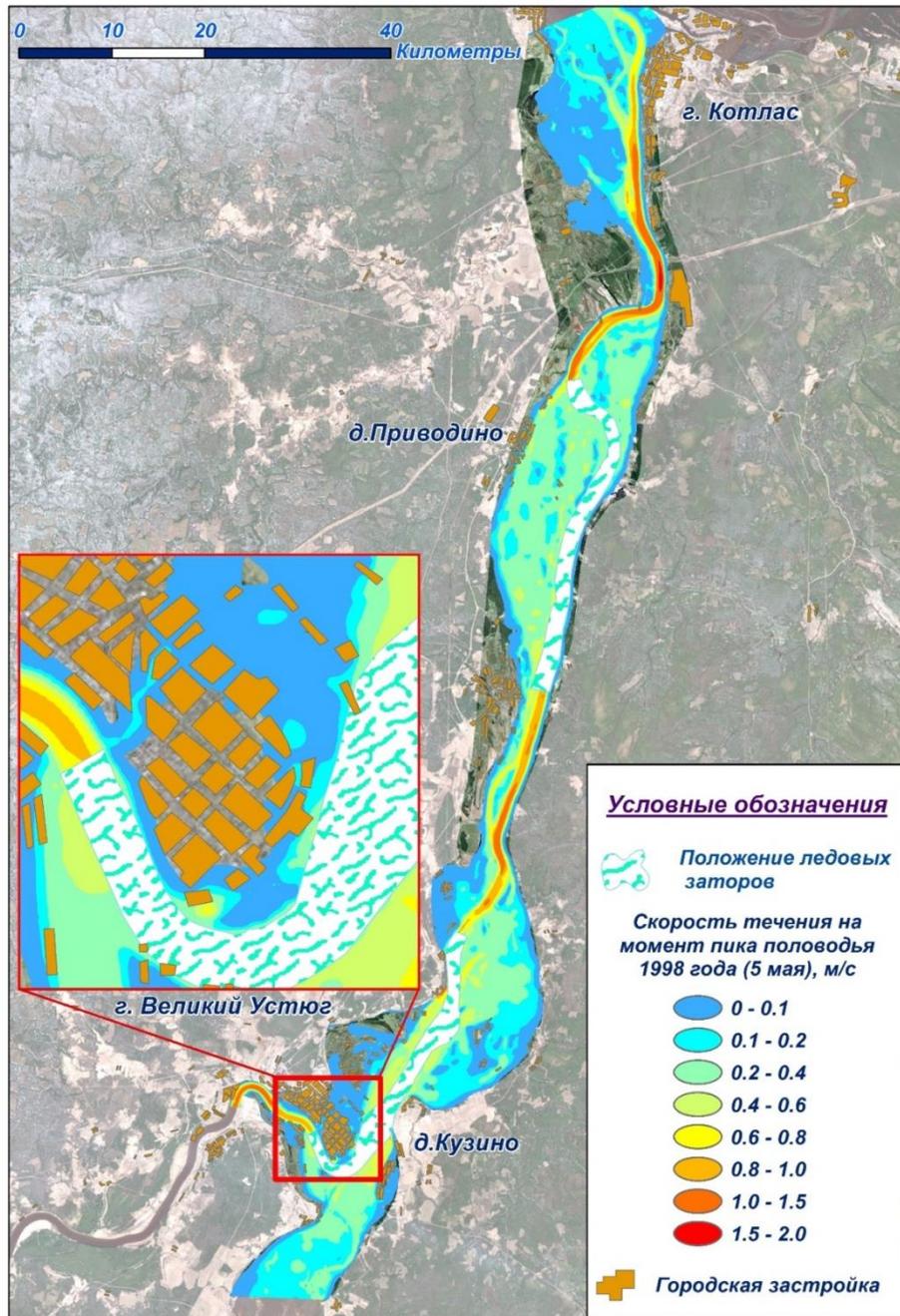


Рисунок 4.1. Карта скоростей течения при наводнении в районе г. Великий Устюг, 1998 г.

Карта глубин была построена на основании максимальных глубин, которые наблюдались при наводнении в г. Великом Устюге 3–6 мая 1998 г. (рисунок 4.2). По данной карте можно оценить, насколько были затоплены населенные пункты, расположенные близ района заторов. Максимальная глубина затопления наблюдается в районе д. Дымково и д. Коромыслово. Согласно полученным результатам моделирования, наибольшая глубина достигала 9,5–10 м. Центральная часть г. Великого Устюга была затоплена не так сильно, там глубина в основном не превышала 0,5 м, однако в южной части города, в непосредственной близости от узла слияния рек Сухоны и Юг, отметки глубин достигают

З м. Пос. Кузино и д. Морозовица, за счет своего относительно возвышенного расположения, сильно затоплены не были – там глубина, согласно карте, не превышала 0,5 м.

Произведенное сравнение с описанием очевидцев и результатами съемки спутника «Ресурс-ДК1» показало, что карта правдоподобно отображает как границы затопленной территории, так отметки глубин (рисунок 4.2). Расхождение площади смоделированной зоны затопления с полученной в ходе дешифрирования составило 7,9 %.

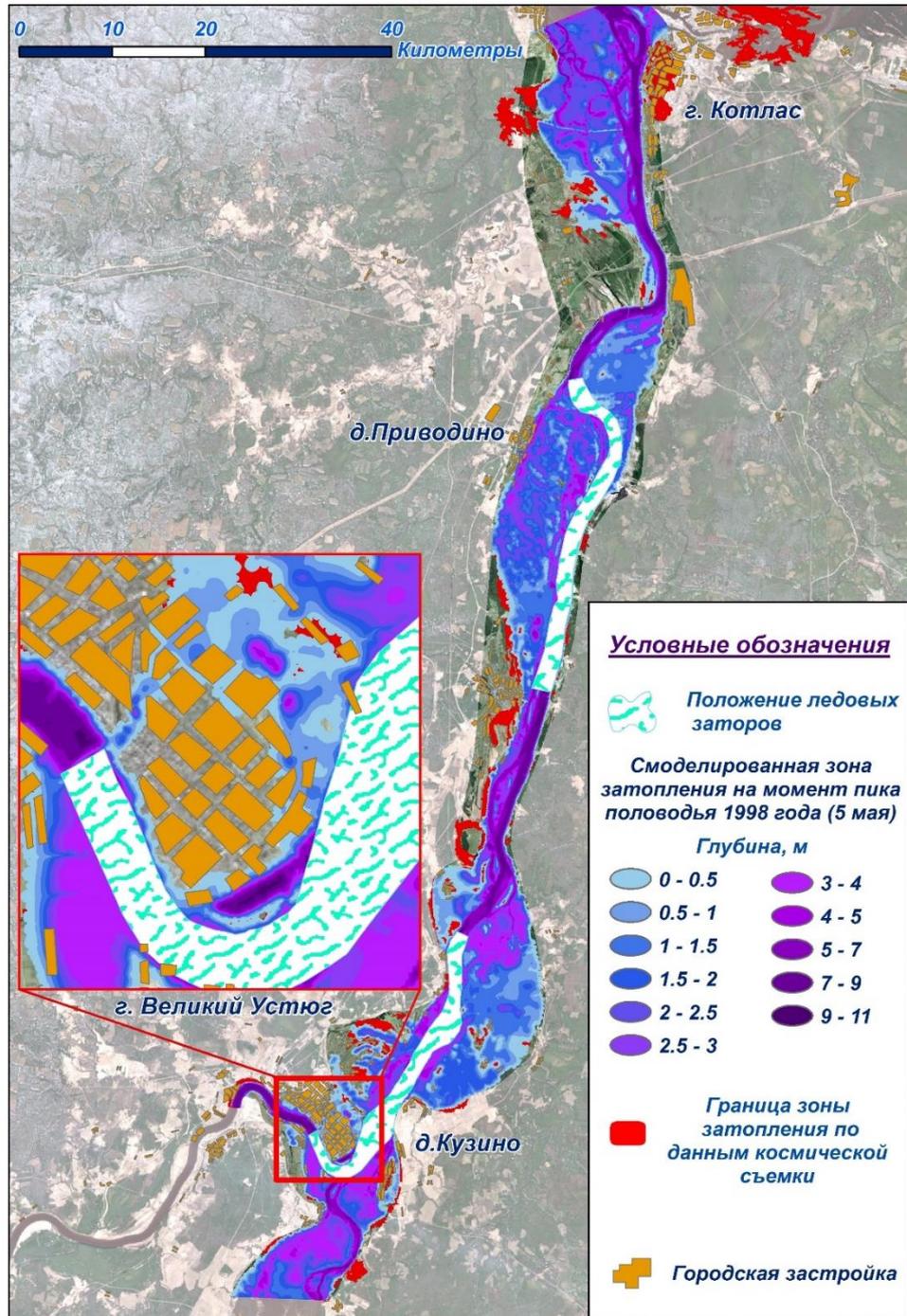


Рисунок 4.2. Сравнение, смоделированные границы затопления и границы затопления, полученные с помощью космической съемки при наводнении 1998 г.



Рисунок 4.3. Результат размыва берега в д. Коромыслово (фото автора)

4.1.2 Анализ выдающегося половодья 2016 г.

Для моделирования наводнения 2016 г. была использована как обычная модель (от слияния р. Сухона и р. Юг до г. Котлас), так и модель с детальной сеткой на территорию г. Великий Устюг. Максимальный суммарный расход р. Сухона и р. Юг в 2016 г. за период половодья составил более $9000 \text{ м}^3/\text{с}$ (27 апреля).

На рисунке 4.4 видно, что было достигнуто хорошее соответствие смоделированных и фактических уровней воды на период стояния ледового затора. Несмотря на то, что по посту д. Медведки смоделированный уровень превышает фактический, данная ситуация допустима, так как при составлении прогноза уровня воды для планирования спасательных операций лучше завысить отметку воды, нежели занижить.

По результатам расчетов по модели STREAM_2D были построены карты глубин и скоростей течения на пике половодья (рисунок 4.5). На карте глубин видно, что затоплению подверглась юго-восточная часть города, в отдельных местах глубина потока достигала 2–2,5 м. Анализ скоростей течения показал, что на затопленной территории скорость течения не превышает $0,4 \text{ м/с}$, а в некоторых районах и вовсе близка к нулю. Наибольшие скорости на исследуемой территории наблюдаются в районе г. Красавино, в месте сужения русла, то есть в месте сжатия потока.

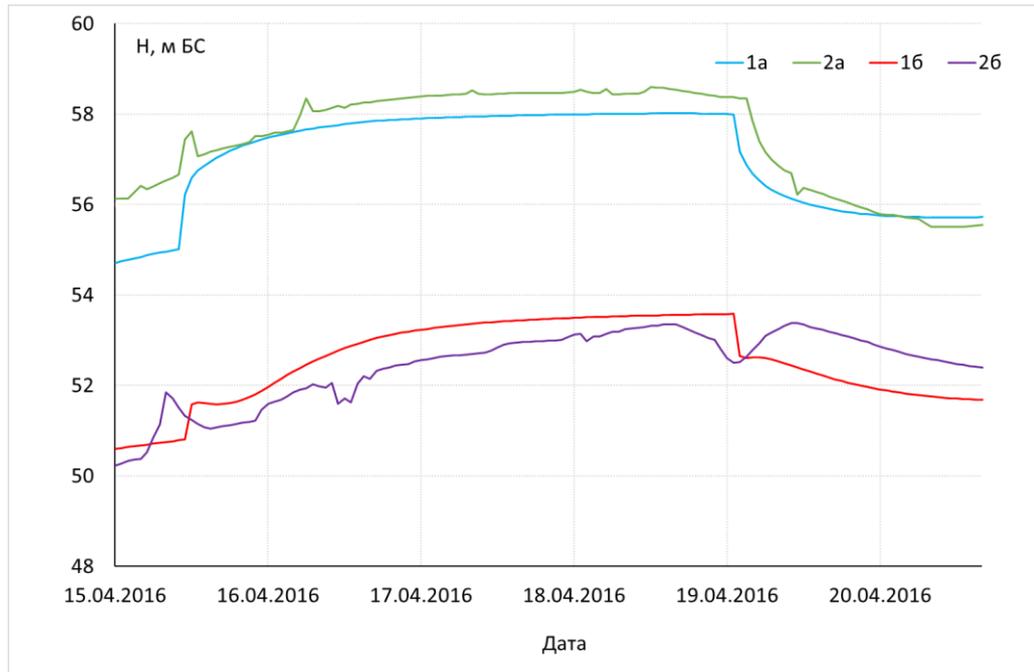


Рисунок 4.4. Сравнение смоделированного уровня водной поверхности (1) и фактического уровня водной поверхности (2) по гидрологическому посту р. Сухона – г. Великий Устюг (а) и гидрологическому посту р. Северная Двина – д. Медведки (б)

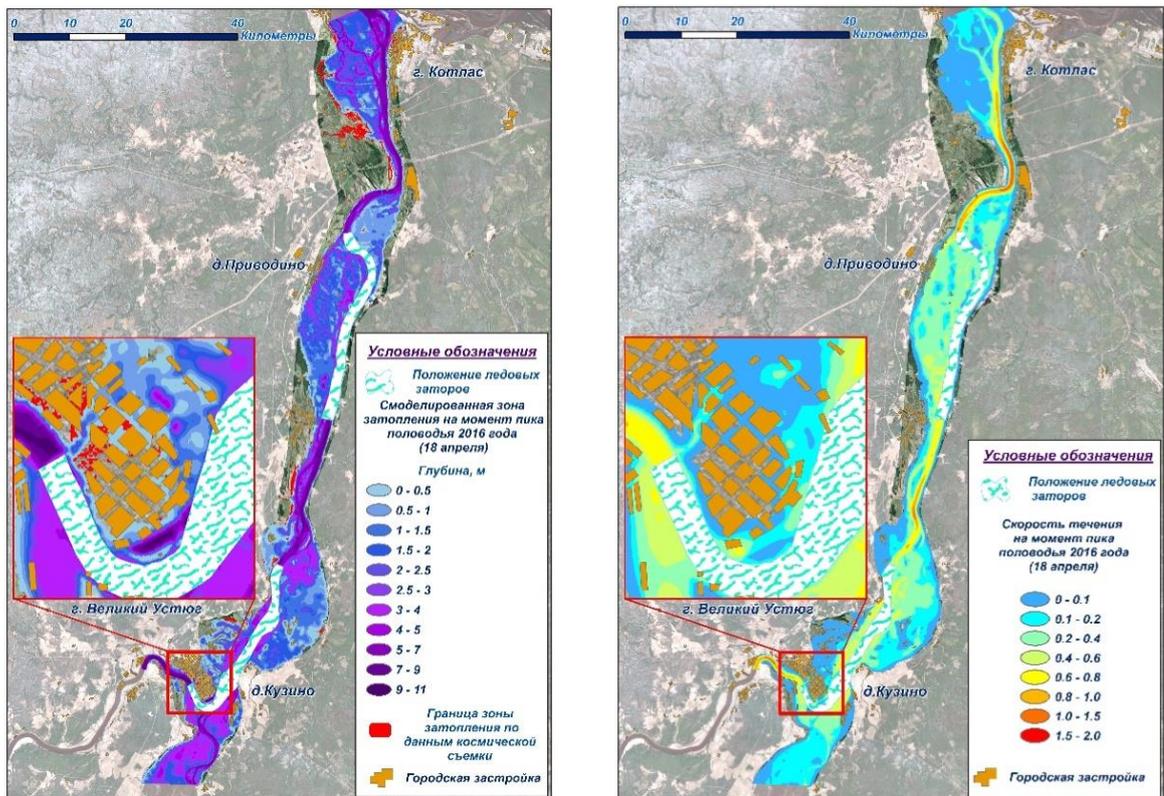


Рисунок 4.5. Карта глубины затопления (м) и границы затопления, определенной с помощью космического снимка Landsat 8 (слева), и скорости течения (м/с) (справа) во время пика половодья 2016 г.

Для момента прохождения пика половодья проведено сравнение границ затопления, определенных по модели STREAM_2D, и фактических значений на основе космического снимка Landsat-8 (рисунок 4.6). Метод автоматической классификации K-means использован для определения маски затопленной территории.

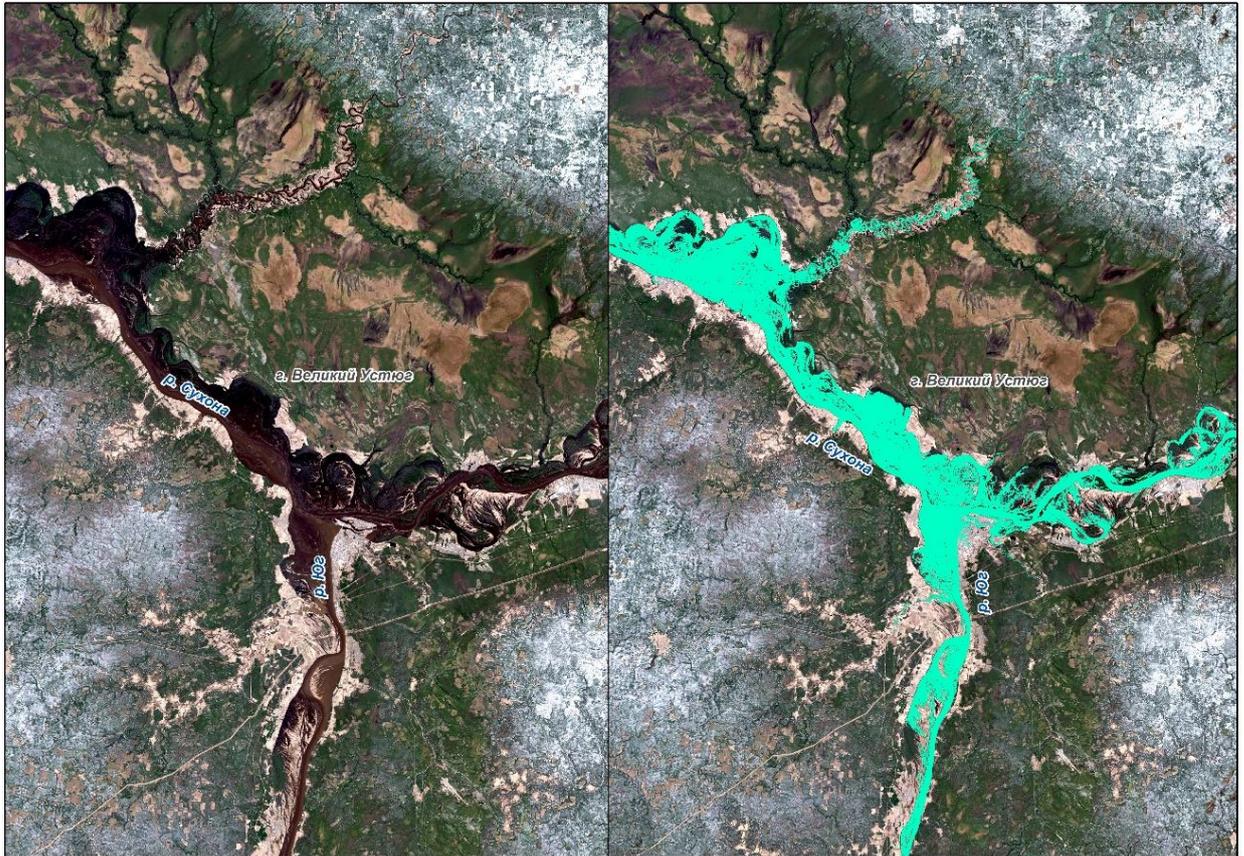


Рисунок 4.6. Космический снимок Landsat-8 затопленной территории (слева) и зона затопления, определенная по снимку (справа)

Площадь затопления по результатам моделирования затопления всего исследуемого участка соответствует имеющимся данным, полученным с помощью космических снимков Landsat 8 (рисунок 4.6).

Для детального изучения динамики потока в черте г. Великий Устюг был проведен расчет пика половодья на детальной расчетной сетке. В качестве временного отрезка для моделирования наводнения были выбраны три дня, когда наблюдались наибольшие уровни воды, а именно 16, 17 и 18 апреля (рисунок 4.7).

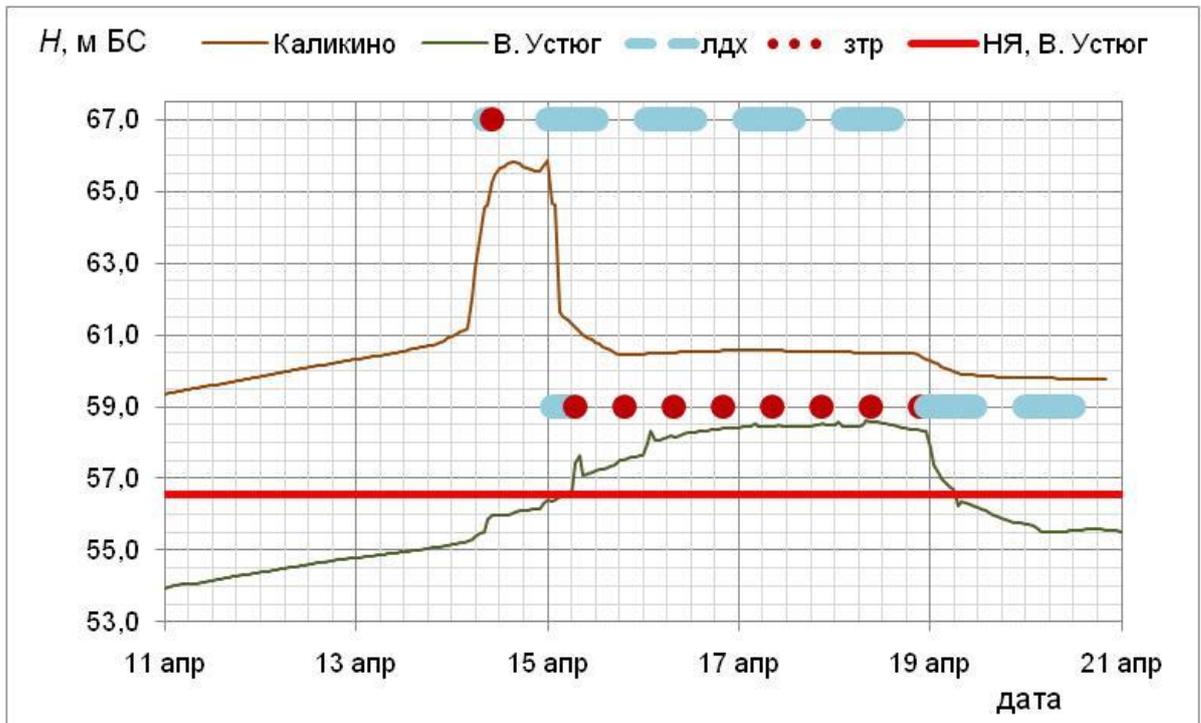


Рисунок 4.7. Ход уровней воды и ледовой обстановки на р. Сухона, г/п Каликино и г/п Великий Устюг

На момент пика половодья, то есть 18 апреля, по результатам проведенного моделирования была построена карта глубин (рисунок 4.8).

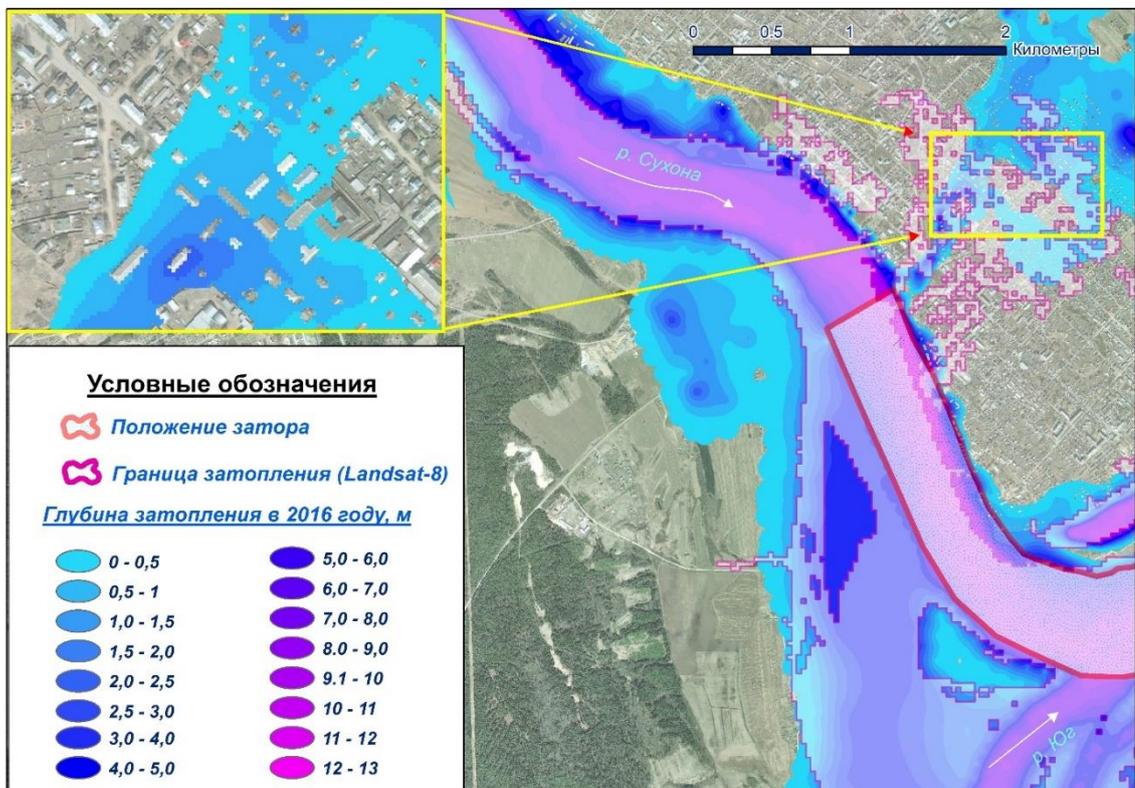


Рисунок 4.8. Карта глубин в районе г. Великий Устюг на момент пика половодья 2016 г. (18 апреля)

На карте глубин видно, что затоплению подвергся пригород г. Великого Устюга, а именно д. Юдино, расположенная на северо-восточной окраине города, причем в центральной части деревни, например, на ул. Парковая и Тихая, глубина достигала 6 м, то есть были полностью затоплены двухэтажные здания. В самом г. Великий Устюг затоплению подверглась относительно низкая центральная часть (рисунок 4.9). По данным моделирования здесь глубина затопления составляла 1,5–2 м. Однако для большей части глубина затопления составила 0,5 м. Следует отметить, что во время наводнения 2016 г. юго-восточная часть города оказалась отрезанной от остальной части.



Рисунок 4.9. Фото затопленной территории г. Великий Устюг) (фото Н.Фроловой)

Из-за установления ледового затора затоплению подверглись населенные пункты на правом берегу - д. Ивашево, Коромыслово, Дымково, Барсуково, Добрынино. В районе д. Барсуково и Ивашево наибольшая глубина затопления достигала 5 м. Глубина в районе д. Коромыслово, находящейся в месте слияния р. Сухона и р. Юг, составила около 0,5 м.

Относительная ошибка определения границ затопления по космическому снимку (площадь затопления равна 2 км²) и результатам моделирования (1,85 км²) составила 7%.

Помимо космической съемки были использован фотоматериал, сделанный очевидцами наводнения (рисунок 4.10).



Рисунок 4.10. Дом на ул. Щелкунова города Великий Устюг, находящийся в зоне подтопления (фото Н.Фроловой)

По результатам моделирования была построена карта скоростей течения (рисунок 4.11).

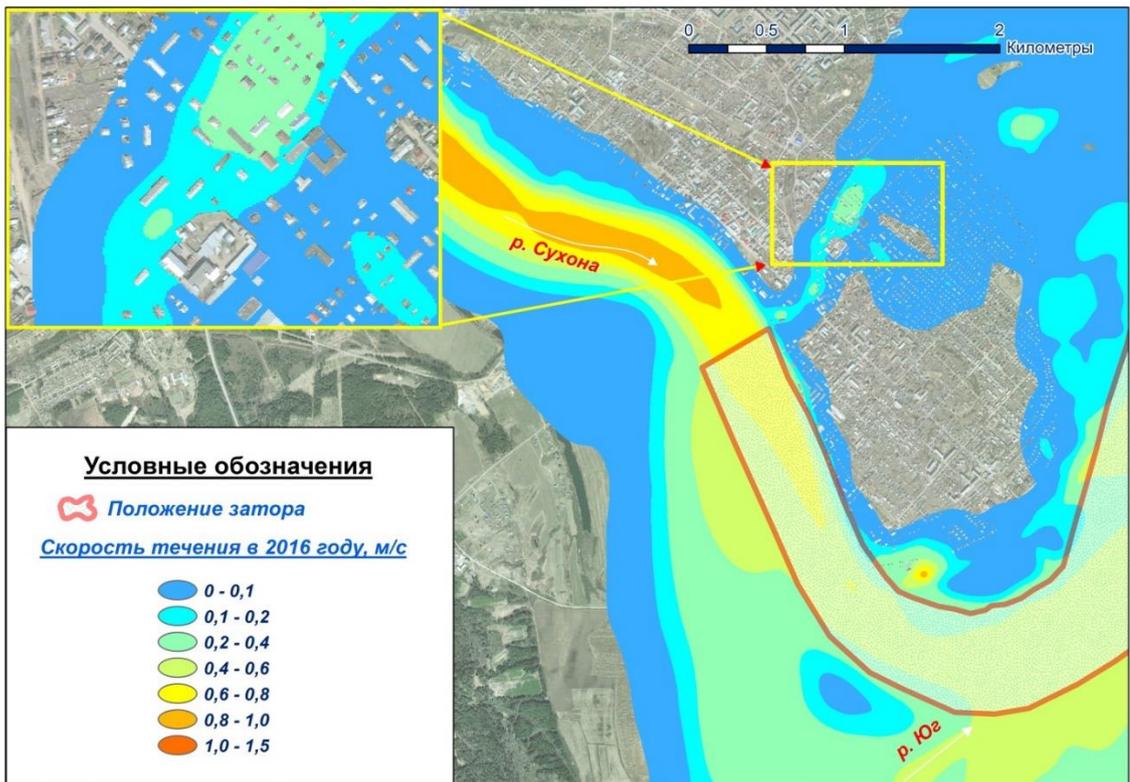


Рисунок 4.11. Карта скоростей течения в районе г. Великий Устюг на момент пика половодья 18 апреля 2016 г.

Максимальная скорость течения уменьшается от стрежня реки, где она равна 1 м/с, практически до нуля в жилых районах. В центральной части города, в районе ложбины, наблюдается движение воды, скорость течения здесь равна около 0,4 м/с.

Чтобы понять, как движется поток воды, и оценить, с какой стороны вода будет проникать в жилые районы, была построена карта скоростей течения в совокупности с векторами направления течения. Фрагмент такой карты представлен на рисунке 4.12.

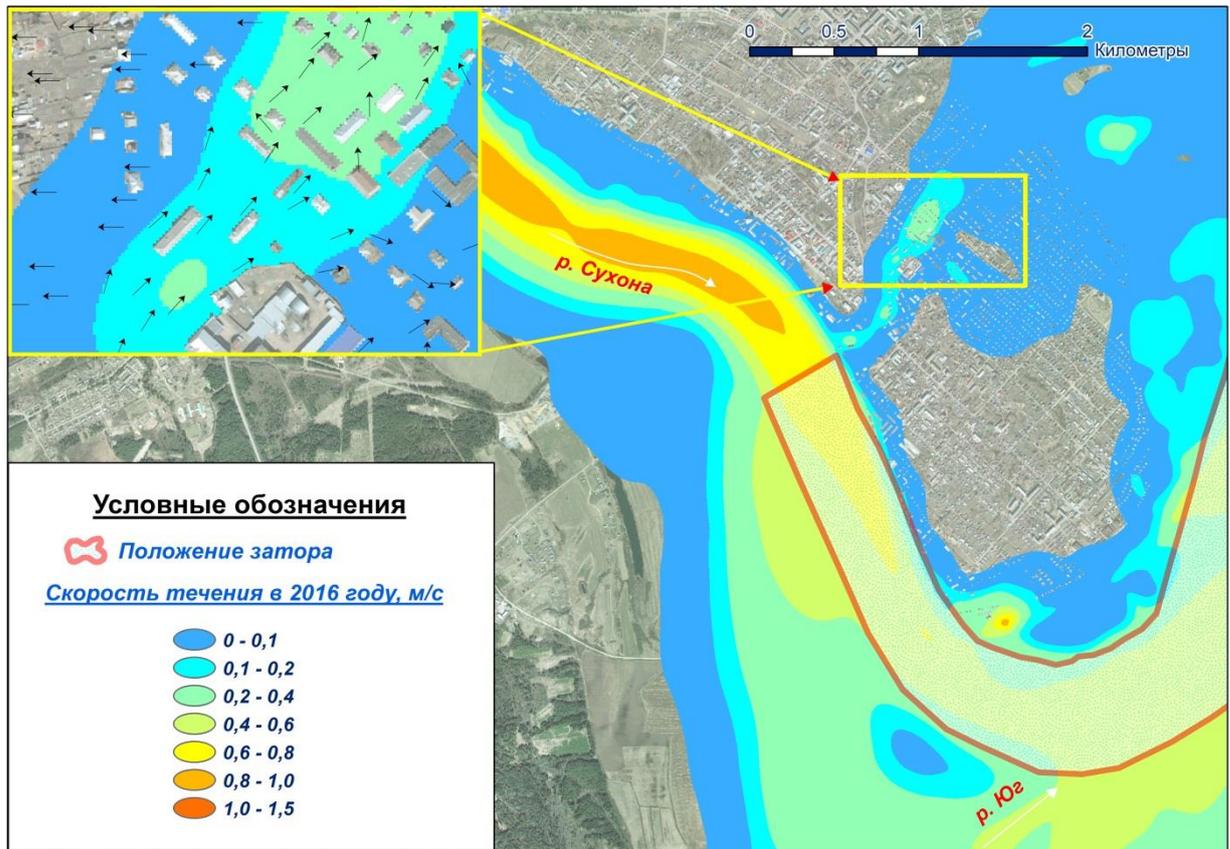


Рисунок 4.12. Карта скоростей течения в районе г. Великий Устюг на момент пика половодья 18 апреля 2016 г. с наложением векторов направления течения

На карте видно, что вода в центральную часть города проникает со стороны р. Сухоны, причем по мере продвижения в город вода постепенно распространяется на северо-восток и на юго-запад, вглубь жилого квартала.

4.1.3 Оценка ущерба от негативного воздействия вод по шкале балльности разрушений

Для оценки ущерба, наносимого прохождением половодья, в данной работе использовалась методика, разработанная В.В. Беликовым [Беликов и др., 2003] и применяемая в настоящее время в МЧС. Одна из положительных сторон данной методики — это использование карты ущерба в балльной шкале. Такая карта крайне информативна не только для оценки уже произошедших разрушений, но и при составлении прогноза. Кроме того, используя разновременные карты ущерба, можно оценивать эффективность противопаводковых мероприятий и масштаб разрушений. Для рассматриваемого участка

подобная карта особенно актуальна, так как не только за чертой города, но и в самом городе есть много жилых и хозяйственных построек из дерева.

Разрушения при затоплении связаны с глубиной затопления, скоростью потока и продолжительностью стояния воды. Сочетание этих трех характеристик затопления используется в различных работах, посвященных районированию территории по степени опасности [Fiebigler, 1997; García et al., 2003].

Основа методики оценки наносимого ущерба — это использование формулы удельной энергии потока, которая была описана ранее [Приказ МЧС РФ и Минэнерго РФ от 29 декабря 2003 г. № 776/508].

Для перехода от удельной энергии потока, посчитанной в узлах сетки гидродинамической модели В.В. Беликовым [Беликов и др., 2003], была получена логарифмическая функция (4.1) следующего вида:

$$B = 2Lg(P) \quad (4.1)$$

где B — балл разрушения.

Всего было выделено 12 градаций разрушений, от 1 балла, когда разрушений не происходит ($P \leq 4$), до 12 баллов, когда происходит тотальное разрушение ($P > 1\,300\,000$) (таблица 4.1).

Таблица 4.1. Шкала балльности разрушений [Приказ ..., 2003; Об утверждении Методики..., 2003; 2016; Беликов, 2005]

Баллы	Разрушения
1	Не приводит к каким-либо разрушениям, ($P \leq 4$)
2	Возможен размыв пашни, сложенной легкими грунтами. ($P \leq 14$)
3	Размыв пашни, сложенной легкими грунтами. ($P \leq 40$)
4	Незначительные разрушения особо плохо построенных и ветхих зданий. Размыв пашни, сложенной средними грунтами ($P \leq 130$)
5	Перемещение слабо закрепленных предметов, разрушение легких объектов большой парусности (копен сена, палаток, разрушения плохо построенных и ветхих зданий и т.п.). Размыв пашни на значительную глубину. Подмыв корневой системы кустарников со слабой корневой системой. ($P = 400$)
6	Разрушение сплошных деревянных изгородей, ветхих деревянных зданий. Подмыв корневой системы кустарников. ($P = 1300$)
7	Достигаются критические параметры потока, могущие повлечь гибель незащищенных людей. Жители покидают дома или спасаются на верхних этажах. Разрушение легких деревянных строений, затопление и перемещение потоком легковых автомашин. В руслах разрушение деревянных мостов,

	паромных переправ, средние повреждения находящихся на незащищенных стоянках плавсредств (нанос на берег). (P=4000).
8	Полное разрушение деревянных домов, ветхих кирпичных и глинобитных строений, средние разрушения кирпичных и блочных домов малой этажности. Разрушение железобетонных и металлических мостов, автодорожных и железнодорожных насыпей, защитных дамб обвалования, подвижного железнодорожного состава. В руслах средние повреждения находящихся в плавании, на якорной стоянке или на берегу и вовремя не убранных в затоны судов. (P=13500)
9	Разрушаются кирпичные и панельные дома средней этажности, водокачки, ЛЭПОС. Поток несет вырванные с корнем деревья. В руслах сильные повреждения (оверкили и затопление) незащищенных среднетоннажных и малотоннажных судов, средние разрушения стенков, набережных и пирсов, разрушение стапелей судоремонтных мастерских. (P=40000)
10	Разрушаются промышленные здания с тяжелым металлическим и железобетонным каркасом, порталные краны. Поток сильной мутности несет много различных предметов. Массовая гибель не эвакуированных людей. В руслах разрушение стенок, набережных, молов, выполненных из кладки массивов. (P=125000)
11	Разрушаются бетонные и железобетонные здания антисейсмической и особо прочной конструкции, мостовые перегружатели. Почти полное разрушение всех строений. Поток несет строительные материалы, ворожит бетонные и каменные глыбы. Поголовная гибель не эвакуированных людей. (P=400000)
12	Тотальные разрушения. (P>1300000)

На примере двух крупнейших наводнений, произошедших в районе г. Великий Устюг, был произведен детальный анализ разрушений с последующим сравнением между собой.

Для построения карты ущерба наводнения для каждой точки был подсчитан балл разрушений и впоследствии их значения проинтерполированы для получения единой картины (рисунок 4.13).

На карте видно, что наибольшей опасности подвержены жилые и хозяйственные постройки, расположенные в непосредственной близости от реки. Так, для д. Коромыслово в 1998 г. (рисунок 4.13 - слева) ущерб достигает 5 баллов, что согласно классификации, приводит к разрушению деревянных построек. В д. Дымково, расположенной на правом берегу р. Сухона, ущерб составил от 2 до 5 баллов, что означает разрушение непрочных домов и размыв грунтовых дорог.

Также значительные разрушения наблюдались в пос. Приводино, где согласно карте ущерба, разрушение для прибрежных построек достигало 6 баллов, то есть разрушение непрочных деревянных зданий.

В самом г. Великий Устюг затоплению была подвержена восточная (ул. Михайловская, Щелкунова и Советский проспект), северо-восточная (ул. Молодежная и Парковская) и центральная часть города (ул. Красноармейская), в отдельных местах ущерб достигал 5 баллов.

Аналогичная карта была построена для 2016 г. (рисунок 4.13 - справа) на момент пика половодья (18 апреля). В зону подтопления попали те же населенные пункты, что и в 1998 г., однако масштаб разрушений оказался больше. Для д. Коромыслово балл ущерба не изменился, однако для остальных населенных пунктов он увеличился на единицу. Для д. Дымково, согласно карте, ущерб оценивается в 3–4 балла. По сравнению с наводнением 1998 г., когда значение в 3–5 баллов наблюдалось только для окраины деревни, в 2016 г. на большей части территории деревни наблюдалось затопление и разрушение деревянных построек. Для пос. Кузино в 2016 г. наблюдалось затопление окраинной части, оцененное в 2 балла, что означает затопление подвальных помещений и огородов. Кроме того, если в 1998 г. в восточной части деревни оставался незатопленный участок, по которому могла осуществляться связь с деревней, то в 2016 г. вода отрезала деревню со всех сторон. Разрушение построек в д. Коробово, Сереброво и Шатрово, расположенных на левом берегу р. Малой Северной Двины, в 2016 г. также оказалось более сильным, причем это выражается как в балле ущерба, который для данного участка преимущественно составляет от 2 до 4, что означает затопление первых этажей зданий, бой стекол и невозможность передвигаться без плавсредств. Пос. Приводино во время наводнения 2016 г. оказался затоплен более чем на 70%, причем согласно карте ущерба, балл разрушения колеблется от 1 на западной окраине до 6 в прибрежной части.

В черте г. Великий Устюг, как и в 1998 г., затоплению была подвержена, в первую очередь, восточная часть города, там ущерб был оценен в 5–6 баллов (улицы Щелкунова, Краснофлотская и Северная), на ней наблюдалось затопление вплоть до вторых этажей зданий. В северной части города (ул. Красноармейская, Цветочная и Луначарского) ущерб был оценен 2–3 балла, что означает затопление подвальных помещений и подтопление первых этажей зданий.

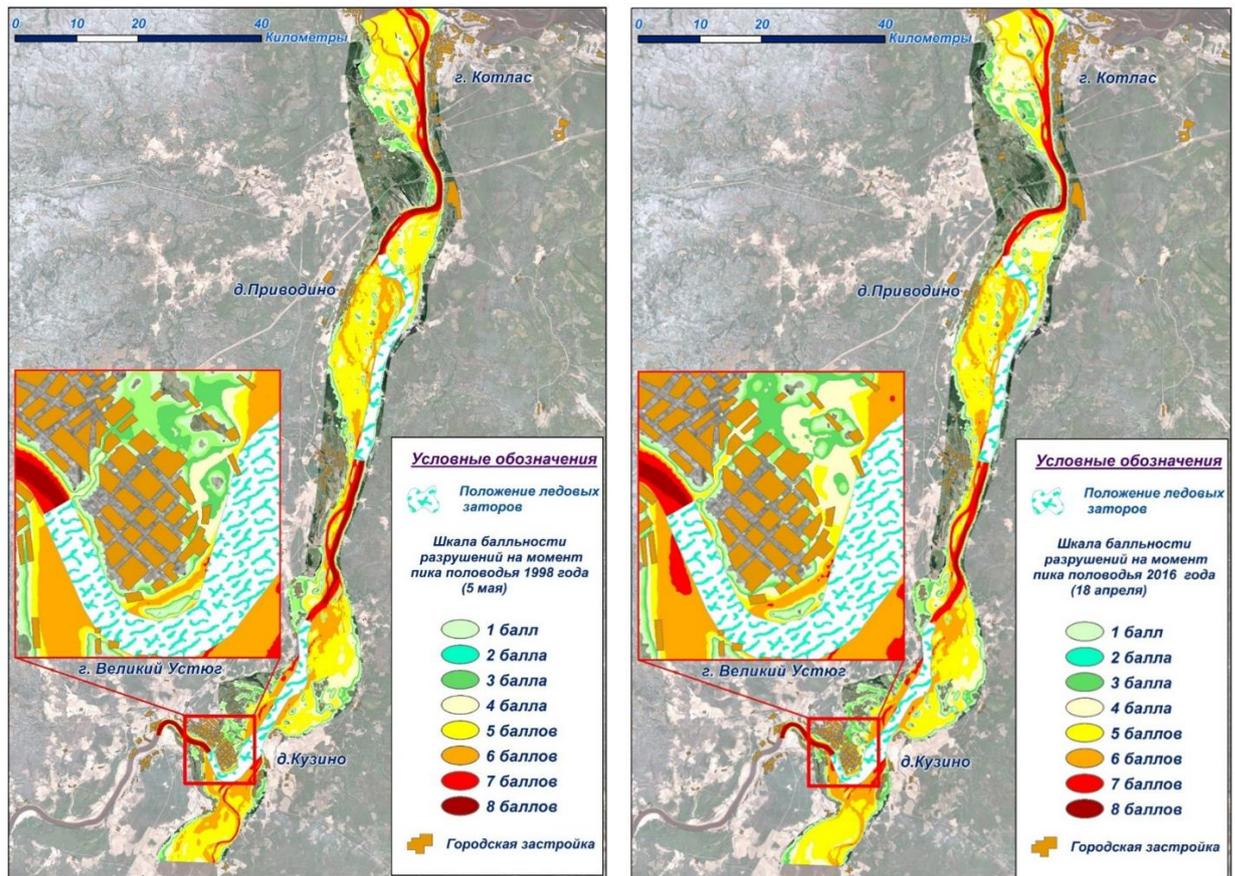


Рисунок 4.13. Карта ущерба наводнения 1998 г. (слева) и карта ущерба наводнения 2016 г. (справа)

4.2 Затопление при уровнях воды различной вероятности

Общепринятый в гидрологической практике метод оценки характеристик затопления – это моделирование затопления определенной обеспеченности. В практике гидрологических изысканий при проведении расчета зоны затопления в качестве нормативного документа используются СНиП 2.06.15-85 «Инженерная защита территории от затопления и подтопления», свод правил «Гидротехнические сооружения. Основные положения» [СП 58.13330.2012] и свод правил «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений» [СП 42.13330.2016] в зависимости от объекта исследования. Однако во всех трех случаях используется понятие обеспеченности затопления, то есть вероятности того, что рассматриваемое значение отметки водной поверхности может быть превышено среди совокупности всех его возможных значений.

Так, например, в СП 42.13330.2016 в пункте 13.6 прописано:

«Территории поселений, расположенных на прибрежных участках, должны быть защищены от затопления паводковыми водами, ветровым нагоном воды; от подтопления

грунтовыми водами – подсыпкой (намывом) или обвалованием... За расчетный горизонт высоких вод следует принимать отметку наивысшего уровня воды повторяемостью: один раз в 100 лет – для территорий, застроенных или подлежащих застройке жилыми и общественными зданиями; один раз в 10 лет – для территорий парков и плоскостных спортивных сооружений».

Превышение расчетного уровня один раз в 100 лет соответствует 1% обеспеченности. Таким образом при переходе к построению карт затопления для разных сценариев мы переходим от расходов воды различной обеспеченности к уровням воды.

Для рассматриваемого участка было рассмотрено два сценария наводнения с уровнем воды 1% обеспеченности в районе г. Великий Устюг: стокового и заторного генезиса. Данные значения уровней были получены на основании различных кривых обеспеченностей: в первом случае уровни получены на основании заданных расходов воды 1% обеспеченности при отсутствии ледового затора, а во втором случае задается значение расхода воды, наблюдаемого во время установления затора, а также учитываются параметры самого ледового затора.

В каждой точке плана расчетной области были определены отметки водной поверхности, глубины и скорости течения. Карты-схемы распределения рассчитанных характеристик были построены в программном комплексе ArcGis 10.2 при помощи интерполяции значений методом *Topo To Raster*. Данный алгоритм был разработан для интерполяции по точкам специально для гидрологических задач. Его принцип основан на программе ANUDEM, разработанной Майклом Хатчинсоном [Hutchinson, Dowling, 1991; Hutchinson, Gallant, 2000; Hutchinson et al., 2011]. Его преимуществом является то, что он объединяет в себе вычислительную эффективность локальных методов интерполяции, таких как метод обратно взвешенного расстояния [Watson, Philip, 1985], в то же обеспечивает непрерывность получаемой поверхности, как в случае метода кригинга [Burrough et al., 1986] или метода сплайна [Бабенко, 1986; Завьялов и др., 1980].

4.2.1 Оценка затопления территории при расчете уровня 1% обеспеченности стокового генезиса

Данный сценарий отражает ситуацию прохождения 1% половодья при условиях современного рельефа поймы. Уровень воды стокового генезиса 1% обеспеченности обусловлены прохождением расхода воды р. Северной Двины 1%, подобный расход воды формируется за счет одновременного прохождения расхода 6500 м³/с по р. Сухона и 5000 м³/с по р. Юг. На карте (рисунок 4.14) видно, что в восточной половине г. Великий Устюг

будут наблюдаться глубины затопления от 0,5 м (городская застройка) до 6–6,5 м в понижениях. Южная часть города за счет своего высокого расположения пострадает гораздо меньше, глубина затопления не будет превышать 0,5–1 м. Следует отметить, что пойма р. Сухоны имеет большие высотные отметки по сравнению с р. Юг.

Русло р. Северная Двина на данном участке является адаптированным, то есть с одного берега преобладает широкая пойма, шириной до 5 км, подвергающаяся затоплению, а с другой стороны, где русло врезается в берег, высотные отметки достаточно большие, и даже при формировании половодья 1% обеспеченности берега здесь остаются незатопленными. К сожалению, исторически сложилось так, что на этом участке реки населенные пункты располагаются как на берегах, не подвергающихся негативному воздействию реки, так и на территориях, подвергающихся затоплению.

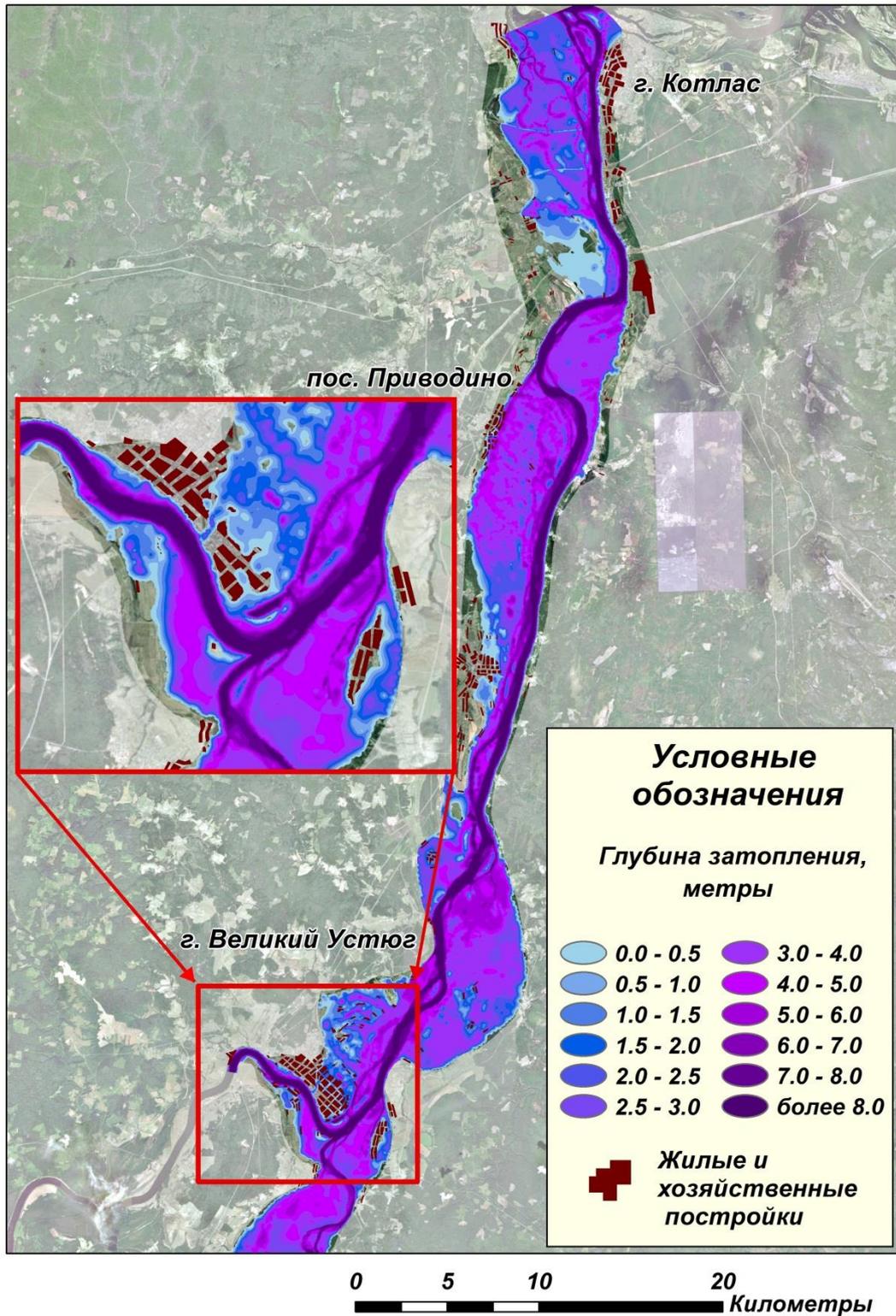


Рисунок 4.14. Карта глубин затопления моделируемого участка р. Северная Двина при прохождении половодья 1% обеспеченности стокового генезиса

В результате анализа карты затопления можно отметить, что из крупных населенных пунктов наибольшему затоплению подвергается г. Великий Устюг. При наводнении вода

проникает в город с восточной окраины. В районе Михайловской улицы и ул. Щелкунова глубина затопления будет достигать 1,5–2 м, это значит, что первые этажи будут полностью затоплены. Затоплению будет подвержена не только восточная часть города, но и понижения в центральной части. Преимущественно глубина затопления будет составлять 1,5–2 м, однако в локальных понижениях она будет достигать 4 м. В случае прохождения половодья 1% обеспеченности стокового генезиса при отсутствии защитной дамбы затоплению будет подвержено 40% города, однако следует отметить, что половина этой территории не застроена.

Остальные крупные населенные пункты не подвергаются затоплению, причем большинство деревень и поселений расположены либо на высоком берегу, либо на достаточном удалении от воды. Наибольший ущерб от затопления в случае прохождения половодья 1% обеспеченности получают населенные пункты, расположенные на левом берегу. Г. Котлас почти не подвержен затоплению за счет своего удачного расположения.

При прохождении паводка 1% обеспеченности затоплению подвергается правый берег реки, расположенный ниже по течению г. Великий Устюг.

Пос. Кузино, сообщение с которым в зимний период осуществляется с помощью ледовой переправы, во время подобного половодья становится полностью окружен со всех сторон водой, однако затоплению подвергаются лишь дома, расположенные в северо-восточной части поселка. Глубина затопления жилых и хозяйственных построек не превышает 0,5 м. При таких глубинах возможно затопление подвальных помещений и огородов.

В районе д. Бобровниково русло реки становится широкопойменным, и затоплению подвергаются оба берега. При этом глубина затопления составляет 0,5–4 м для левого берега и 1–5,5 м для правого. Согласно классификации МЧС, при глубине 4 м и более наблюдается затопление вторых этажей зданий, трансформаторных подстанций, разрушение (всплытие) деревянных строений. Однако на данном участке правый берег мало заселен, а в д. Бобровниково, несмотря на то, что такие участки имеются, преимущественно преобладают глубины 1–1,5 м. При таких значениях глубины, по данным МЧС, наблюдаются следующие негативные явления: частичное затопление первых этажей зданий, порча мебели, бой стекол, затопление автотранспорта. Жители вынуждены покидать первые этажи домов, невозможно передвигаться без плавсредств, возможны массовые короткие замыкания электропроводки, травмы электротоком [Приказ ..., 2003; Об утверждении Методики..., 2003; 2016; Беликов, 2005].

Далее ниже по течению на протяжении 10 км наблюдается обширное затопление левобережной поймы. Однако этот берег мало заселен, на нем расположены лишь

небольшие населенные пункты, такие как Бухинино и Алексино. Наиболее значимый пункт данного участка – пос. Приводино – расположен на достаточном удалении от реки и сильному затоплению не подвержен. Вода доходит лишь до восточной окраины, и глубина затопления не превышает 0,5–1 м. При таких глубинах наблюдается существенное подтопление цокольных и первых этажей зданий, затопление сельскохозяйственных угодий, происходит остановка транспорта.

Ниже по течению от этого участка расположена излучина реки, с внутренней стороны которой пойма подвергается затоплению, глубина которого составляет 3–4 м. Однако несмотря на значительную глубину затопления, это не приводит к значительному ущербу, так как все населенные пункты в данном районе предусмотрительно расположены за границей зоны затопления.

Ниже по течению, в районе города Котлас, река разливается на широкую левобережную пойму. При этом затопливается множество небольших населенных пунктов, таких как Варнавино, Вогдокурье, Стрекалово и другие. Сам г. Котлас остается неповрежденным, так как расположен достаточно высоко.

Кроме карты глубины затопления, была построена и проанализирована карта скоростей течения (рисунок 4.15.).

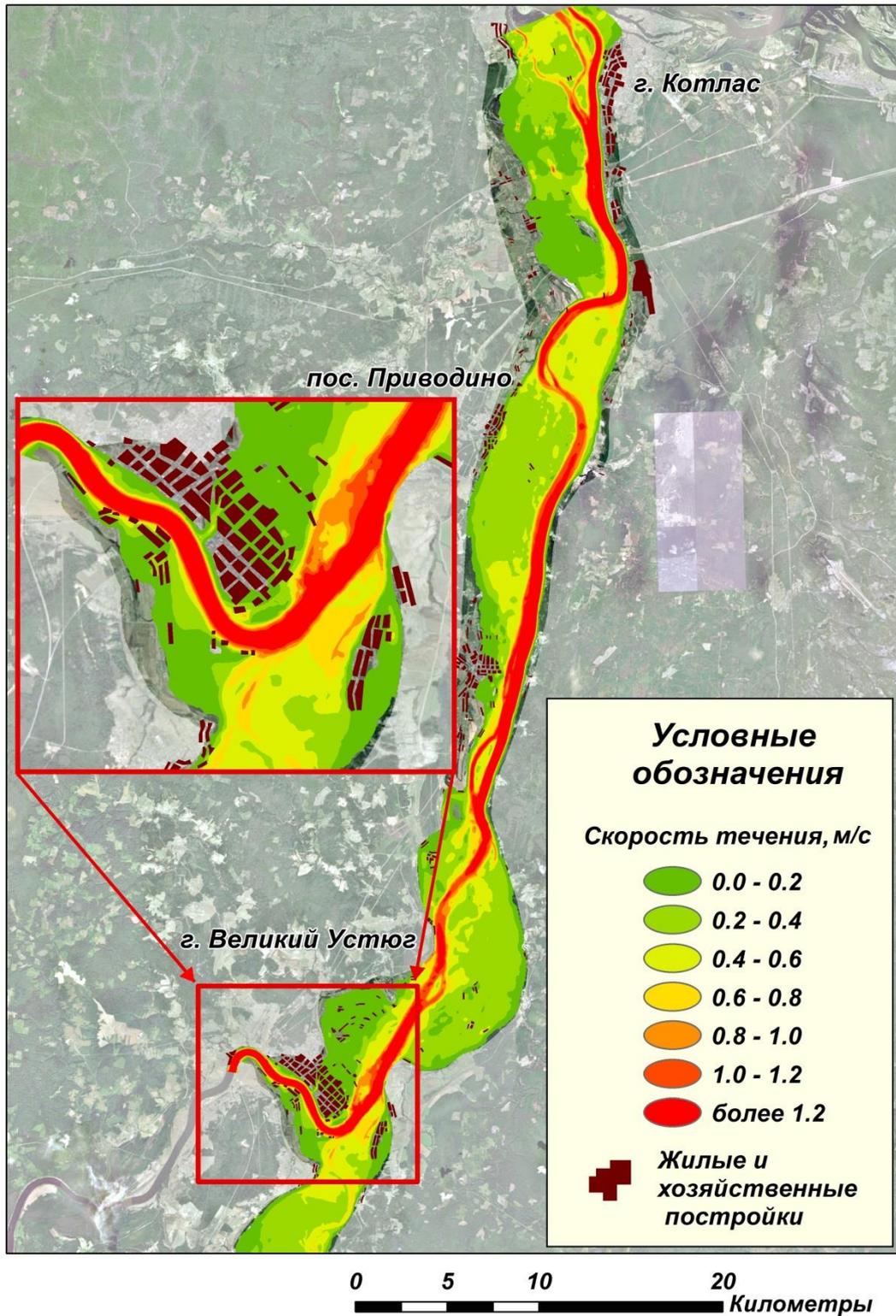


Рисунок 4.15. Карта распределения скоростей течения на моделируемом участке р. Северная Двина при прохождении половодья 1% обеспеченности стокового генезиса

Чтобы наиболее точно описать распределение скоростей потока на урбанизированной территории, весь диапазон скоростей был разбит на 7 интервалов, через каждые 0,2 м/с.

В районе г. Великий Устюг наибольшая скорость течения наблюдается на р. Сухона. Распределение скоростей на ней вполне логичное: максимальные значения скорости – более 1,2 м/с – наблюдаются на стрежне, по мере приближения к берегу скорость течения падает. На затопленной городской территории скорость течения преимущественно не превышает 0,2 м/с, за исключением центральной части города, где расположена вышеупомянутая ложбина, которая в случае наводнения выполняет роль русла с присущим ему распределением скоростей. В наиболее узкой ее части скорость течения достигает 0,6 м/с.

На р. Юг скорость течения невелика: ее значения изменяются в диапазоне от 0,4 до 0,8 м/с. Такая разница связана с двумя факторами: меньшим расходом воды и шириной поймы. Расход воды р. Юг 1% обеспеченности составляет 5000 м³/с – на 23 % меньше, чем на р. Сухоне, где он составляет 6500 м³/с, но приоритетным фактором является ширина поймы, которая на участке выше слияния рек составляет 5–6 км. При выходе воды на пойму поток теряет кинетическую энергию, что приводит к снижению скорости течения до 0,2–0,4 м/с.

Этот же факт объясняет то, что при слиянии рек расход воды увеличивается, но скорость течения все же остается меньшей по сравнению со скоростями течения на р. Сухона.

Интересно отметить, что для всего рассматриваемого участка наибольшие скорости будут зависеть от совокупности двух факторов – рельефа и глубины. Максимальные скорости течения приурочены к межнным границам русла, так как там наблюдаются наибольшие глубины, однако в отличие от затона, расположенного в юго-восточной части г. Великий Устюг, где глубина тоже достаточно велика, в руслах и протоках наблюдается больший уклон, который позволяет водному потоку набирать значительную скорость.

На участке от г. Великий Устюг до г. Котлас скорость течения в пределах затопленной поймы снижается до 0,2–0,6 м/с, а на отдельных участках до нуля, то есть возникает застойный режим. Ниже по течению, у деревни Кисляково, характер рельефа изменяется, исчезает широкая пойма.

На правом берегу, ниже слияния р. Сухона и р. Юг, в районе пос. Кузино, скорость течения достигает наибольшего значения для пойменной территории, около 0,8 м/с.

Интересно отметить распределение скоростей течения р. Малой Северной Двины в районе г. Красавино. Правый берег реки высокий и достаточно крутой, поэтому даже около берега наблюдаются большие глубины и, как следствие, большие скорости течения. На левом берегу наблюдается ряд прирусловых валов, поэтому на месте, где они находятся, картина распределения скоростей повторяет очертания валов. Скорость течения чередуется

по мере удаления от реки: сначала наблюдается диапазон скоростей 1,0–1,2 м/с, затем в понижении между валами наблюдается увеличение скорости, вызванное сжатием потока, а в месте, где наблюдается второй вал, скорость вновь становится 1,0–1,2 м/с. Далее скорость начинает снижаться вплоть до нуля в районе границы населенного пункта.

Ниже по течению от г. Красавино русло вновь становится широкопойменным, и скорость течения по мере продвижения вниз по течению, вплоть до следующего сужения в районе д. Пускино, постепенно уменьшается. На затопленной пойме скорость течения меняется от 0,2 до 0,6 м/с.

На месте затопленных населенных пунктов, на левом берегу, напротив г. Котлас, скорость течения не превышает 0,2–0,6 м/с.

4.2.2 Оценка затопления территории при расчете уровня 1% обеспеченности заторного генезиса

Данный сценарий на настоящий момент наиболее реалистичный, так как противопаводковые дамбы до конца еще не возведены, а ледовые заторы формируются регулярно. В модель было введено два затора: первый начинается в узле слияния р. Сухона и р. Юг и заканчивается ниже по течению пос. Демьяново, а второй начинается от д. Красавино и заканчивается ниже по течению пос. Приводино (рисунок 4.16). Учет ледового затора крайне важен при моделировании затопления, так как он создает подпор, что вызывает резкое повышение уровня.

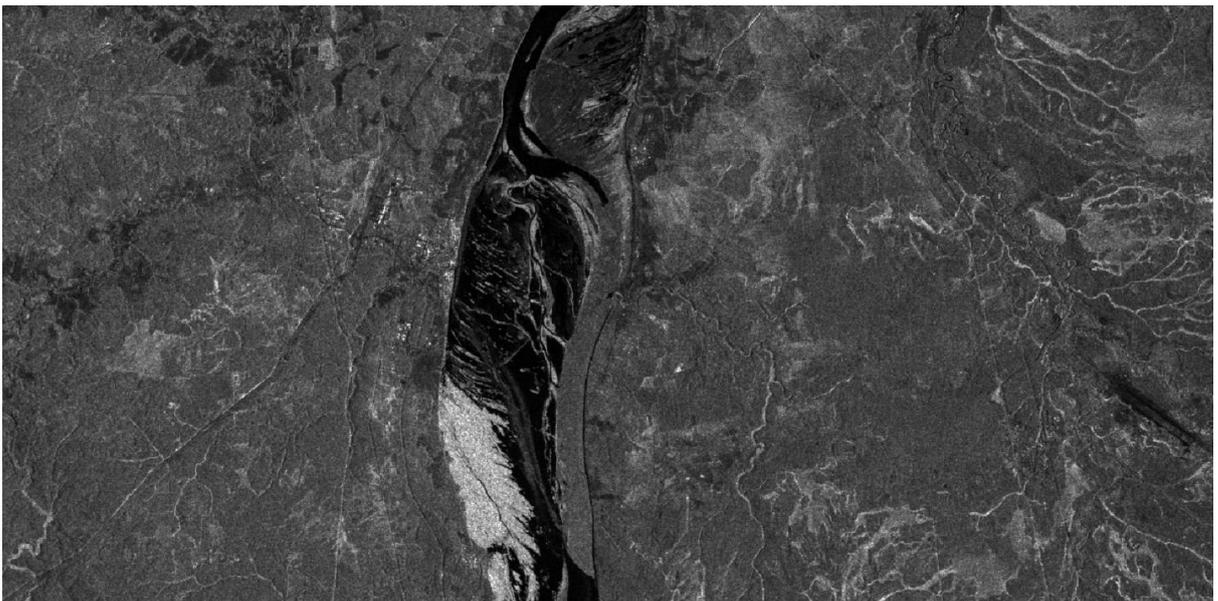


Рисунок 4.16. Радарный космический снимок ледового затора близ пос. Приводино

На основе проведенного моделирования была построена карта глубин затопления и карта распределения скоростей течения (рисунки 4.17–4.18).

Наибольшие значения глубин логично наблюдаются в пределах меженной границы русла, однако их распределение при изучении затопления урбанизированной территории не столь интересно, поэтому подробно рассмотрено не будет.

Несмотря на своё высокое положение, г. Великий Устюг подвергается значительному подтоплению: вся восточная, юго-восточная и центральная части города в случае возникновения наводнения 1% обеспеченности в совокупности с возникновением ледового затора оказываются под водой. Глубина в прибрежной черте города достигает 2–3 м. При таких отметках происходит затопление первого этажа жилых строений. Согласно результатам расчетов, наибольшие отметки глубин будут наблюдаться в центральной части города, там они достигают 5 м.

Кроме того, тотальному затоплению будут подвержены расположенные на правом берегу р. Сухона д. Дымково и Добрынино. Максимальные отметки глубин будут составлять 3,5 м, местами вода будет доходить до уровня второго этажа. Столь высокие отметки глубин обусловлены более низкими высотными отметками правого берега и одновременным поступлением воды и со стороны р. Сухона, и со стороны р. Юг.

В случае возникновения ледового затора в районе г. Великий Устюг р. Юг оказывается перекрытой льдом, что приводит к разливу и затоплению поймы. На большей ее части глубина затопления составит до 4–6 м, однако в локальных понижениях глубина может достигать 7–8 м.

Ниже по течению от г. Великий Устюг затоплению подвергается широкая правобережная пойма. Пос. Кузино оказывается почти полностью затоплена, за исключением лишь ее центральной части, причем максимальные глубины затопления достигают 2 м.

Максимальная ширина зоны затопления поймы ниже места слияния р. Сухона и р. Юг составляет около 4 км. В ходе разлива затопленными оказываются около 10 населенных пунктов, среди которых такие деревни как Павшино, Вепрево, Пайкино и др. Глубина затопления каждого населенного пункта зависит от его высотного положения и от удаленности от реки. В среднем глубина затопления составляет около 2 м. При этом частично затапливаются первые этажи зданий, портится мебель, жители вынуждены покидать первые этажи домов, невозможно передвигаться без плавсредств, затапливается автотранспорт. Возможны массовые короткие замыкания электропроводки, травмы электротоком [Приказ ..., 2003; Об утверждении Методики..., 2003; 2016; Беликов, 2005].

На участке, расположенном между двумя заторами, глубина затопления поймы достигает 6 м. На левом берегу оказываются полностью затопленными д. Первомайское, Алексино, Подосокорье. Пос. Приводино затоплению подвергается незначительно, подтопленной оказывается окраина поселка, полоса шириной около 100 м. Глубина затопления колеблется от 0,5 до 2 метров. При таких глубинах наблюдаются затопления сельхозугодий и огородов, происходит остановка транспорта, люди покидают первые этажи своих домов.

Город Котлас за счет своего удачного расположения не подвержен затоплению, однако вся левобережная пойма с расположенными на ней небольшими населенными пунктами оказывается в зоне подтопления, причем часть населенных пунктов превращаются в острова, окруженные водой со всех сторон. Глубина затопления вышеописанной территории составляет около 2 м. Несмотря на столь чрезвычайные условия прохождения половодья, главные пути сообщения на рассматриваемом участке остаются незатопленными.

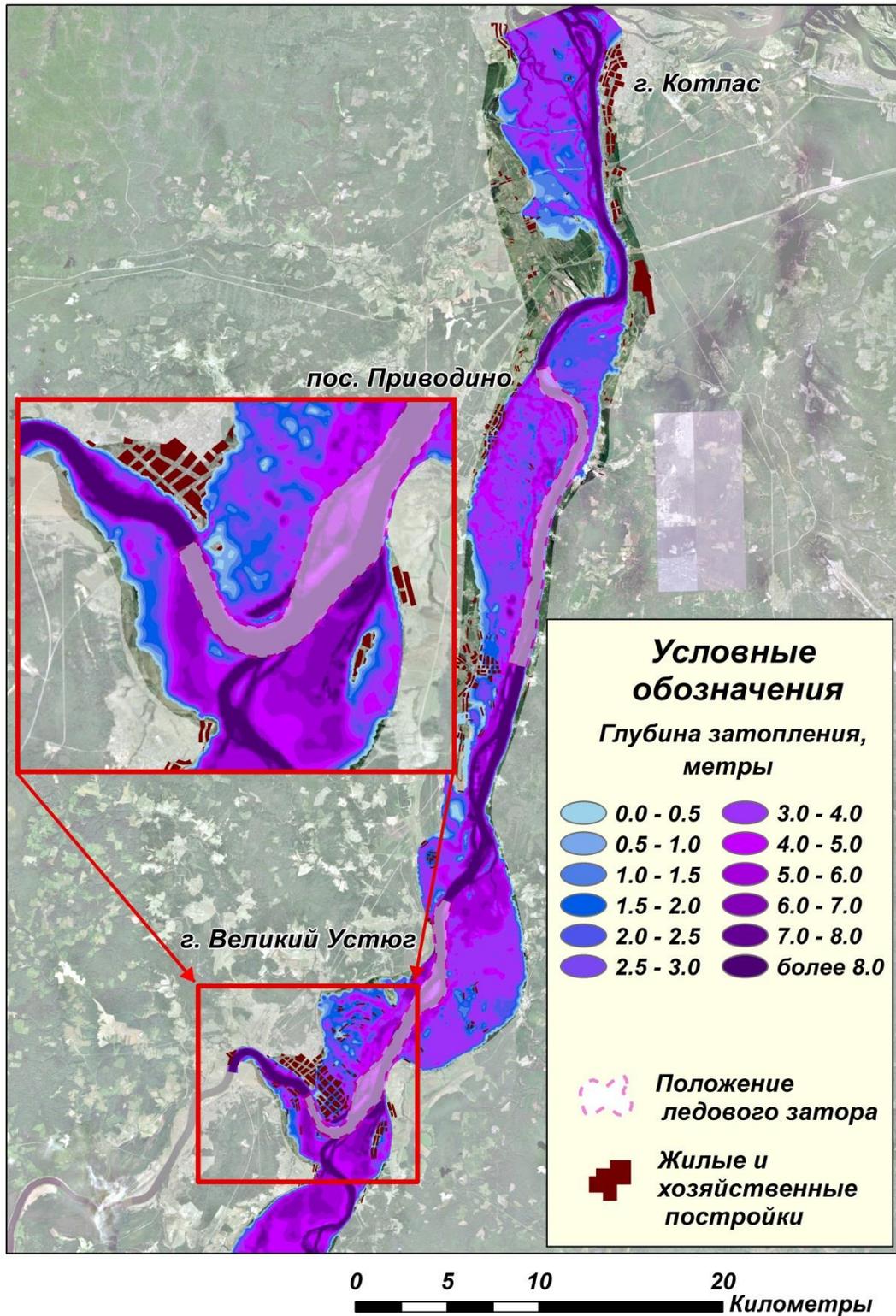


Рисунок 4.17. Карта глубины затопления моделируемого участка реки Северная Двина при прохождении половодья 1% обеспеченности заторного генезиса

По результатам проведенного моделирования была построена карта распределения скоростей течения (рисунок 4.18).

На построенной карте распределения скоростей течения видно, что на р. Сухона скорость течения достигает 1,2 м/с, после чего постепенно снижается в три раза из-за ледового затора, который является препятствием для потока. Непосредственно на границе со льдом скорость течения составляет 0,4 м/с.

В черте г. Великий Устюг наблюдается не застойный режим воды, а слабое течение. Скорость течения в районе затопления составляет 0,2–0,6 м/с, а в центральной части, в ложбине, скорость течения увеличивается до 1 м/с.

На р. Юг скорость течения как в пределах меженной границы русла, так и в пределах затопленной поймы не превышает 0,2 м/с.

На правобережной пойме р. Северная Двина скорость течения составляет 0,2–0,4 м/с. После ледового затора, расположенного в месте слияния р. Сухона и р. Юг, водный поток постепенно увеличивает скорость течения и в районе сужения русла, расположенного ниже пос. Демьяново, достигает своего максимального значения, около 1,2 м/с.

В случае остановки льда в районе г. Красавино и возникновения ледового затора вода начинает затапливать левобережную пойму. При этом поток, упираясь в голову затора в районе пос. Приводино, постепенно снижает скорость с 1 до 0,2 м/с.

Ниже заторного участка скорость течения резко возрастает. В районе г. Котлас наблюдается выход воды на левобережную пойму, в связи с этим скорость течения снижается, так как, выходя на пойму, поток теряет свою кинетическую энергию. По мере расширения поймы поток снижает свою скорость течения с 0,6 м/с до застойного режима.

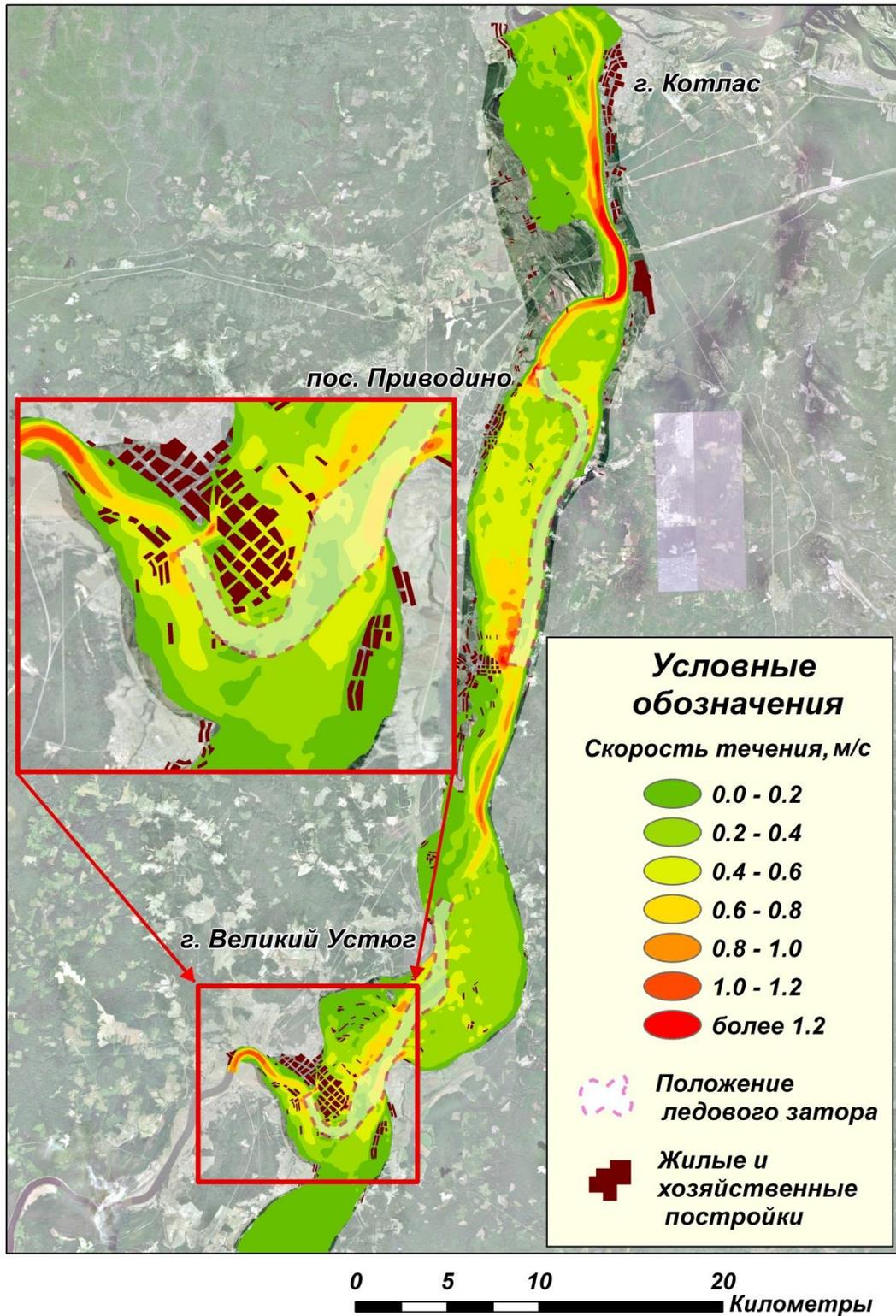


Рисунок 4.18. Карта распределения скоростей течения моделируемого участка реки Северная Двина при прохождении половодья 1% обеспеченности заторного генезиса

Подводя итог, полученные при разных сценариях отметки водной поверхности были рассмотрены при сопоставлении с поперечным профилем, проходящим через центральную часть г. Великий Устюг и через р. Сухона (рисунок 4.19).

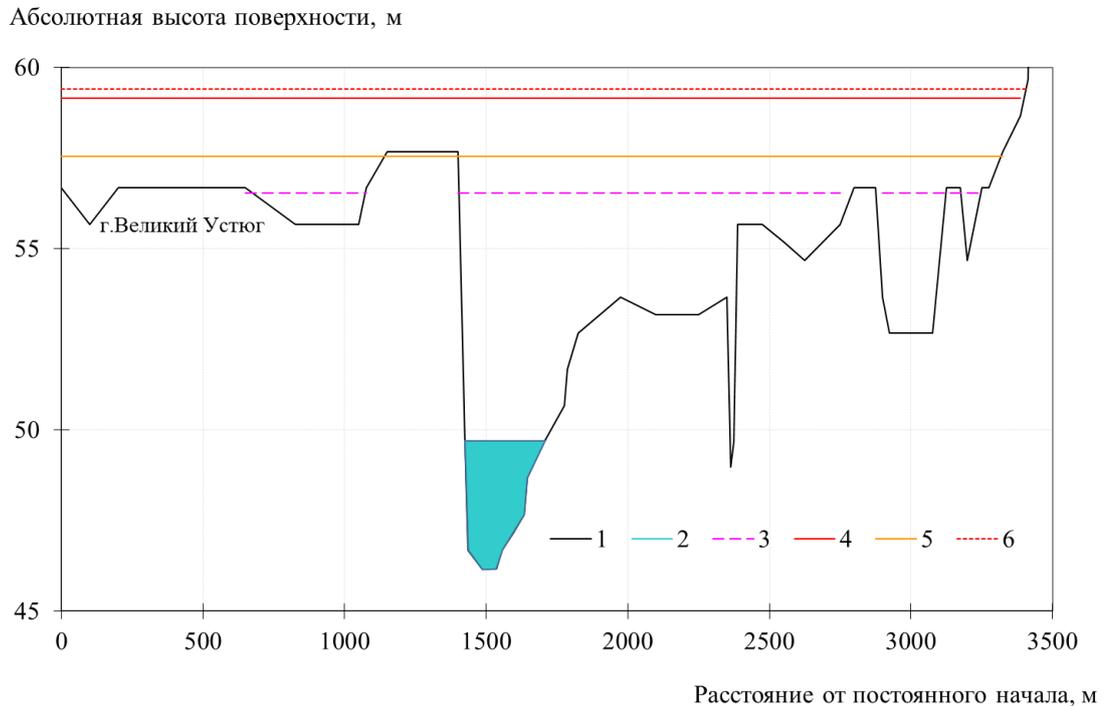


Рисунок 4.19. Продольный профиль через долину р. Сухоны у г. Великий Устюг и уровни затопления различного генезиса, где 1 – профиль долины, 2 – меженный уровень реки Сухона, 3 – неблагоприятная отметка явления, 4 – уровень отметки исторического максимума, 5 – уровень 0,1% обеспеченности стокового генезиса, 6 – уровень 1% обеспеченности заторного генезиса

На построенном профиле отчетливо видно, что затоплению город подвергается в случае образования ледового затора, например, в случае исторического максимума уровня или в случае уровня 1% обеспеченности заторного генезиса. Во время прохождения расхода воды 0,1% обеспеченности (по результатам стохастического моделирования) уровень воды превысит отметку неблагоприятного опасного явления на 1 м. Уровень исторического максимума, который наблюдался во время наводнений 1998 года и 2016 г. близок по значению к уровню 1% обеспеченности заторного генезиса (максимальный уровень 1998 г. составил 980 см. или 59,14м.). Таким образом, именно заторные наводнения представляют наибольшую опасность по сравнению с наводнениями стокового генезиса, даже столь малой обеспеченности, как 0,1%.

4.2.3 Оценка затопления территории при расчете уровня 0,001% обеспеченности заторного генезиса

Используя данные, полученные в ходе стохастического моделирования была предпринята попытка смоделировать наиболее катастрофический вариант затопления — прохождение наводнения заторного генезиса 0,001% обеспеченности. Проведенный ранее анализ ледовых явлений и данных наблюдений за расходом и уровнем воды показал, что установление ледового затора происходит на подъеме уровня воды, а не при прохождении максимальных расходов воды. Поэтому такая обеспеченность уровня была присвоена максимальному расходу воды 0,1% обеспеченности в совокупности с установлением мощного ледового затора. Для оценки уровня воды столь малой обеспеченности была использована методика В.В. Беликова [Беликов, 2005; Румянцев и др., 2019]. Суть ее заключается в том, что на основании расчетов модели строится кривая обеспеченности уровня воды в полулогарифмических координатах.

Проведенный анализ результатов показал, что в случае прохождения такого наводнения уровень воды будет составлять 61 м, тем самым превысив максимально наблюдаемый уровень почти на 2 м (рисунок 4.20).

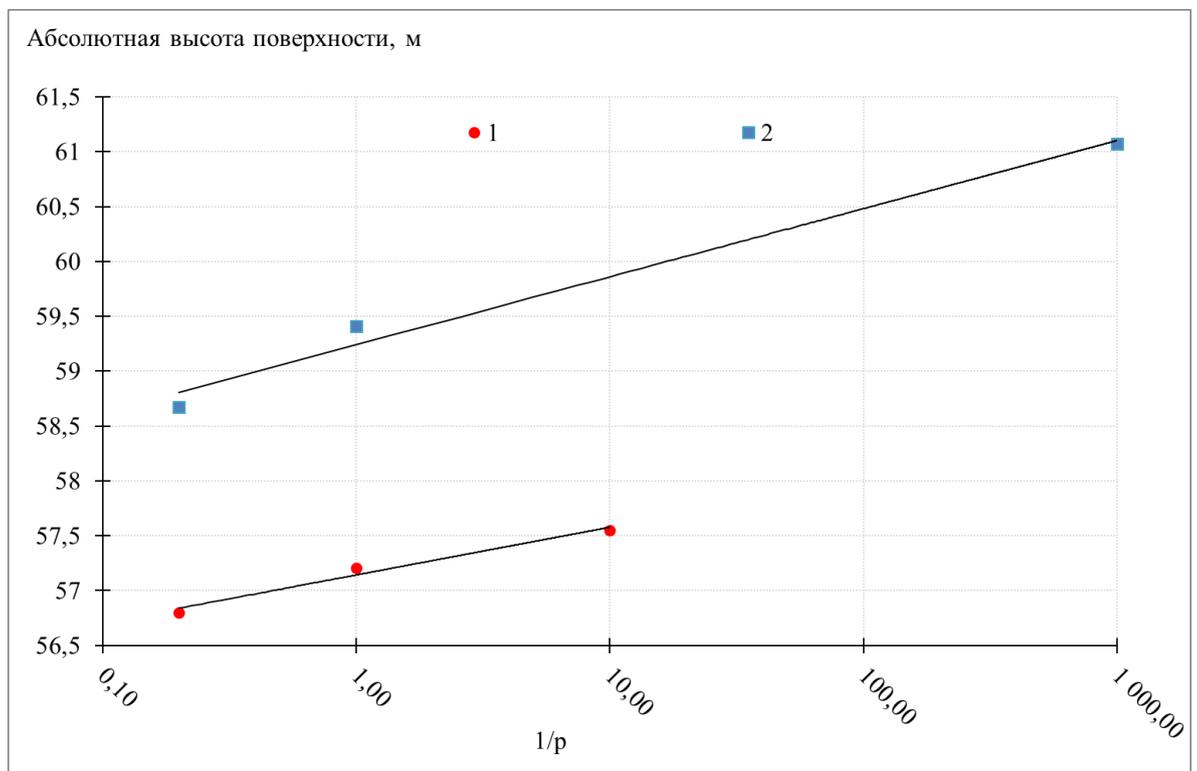


Рисунок 4.20. Смоделированные на основе модели STREAM_2D уровни воды стокового (1) и заторного (2) генезиса у г. Великий Устюг

Для проведения пространственного анализа наводнения 0,001 % обеспеченности на основании проведенного моделирования была построена карта глубин (рисунок 4.21) и карта скоростей течения (рисунок 4.22).

На карте глубин (рисунок 4.21) видно, что затоплению подвергается почти вся рассматриваемая территория подвержена затоплению, в том числе 80% г. Великий Устюг.

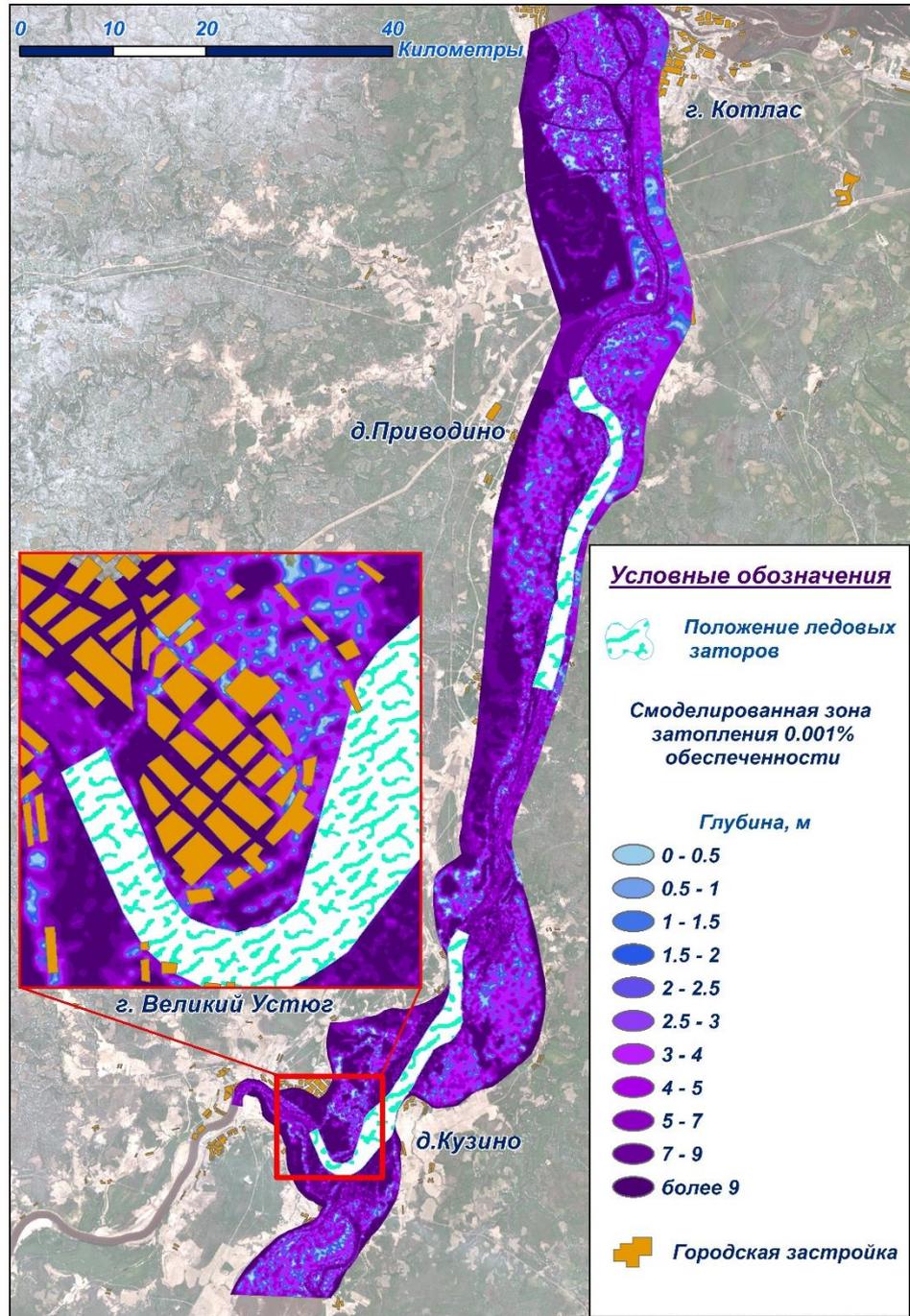


Рисунок 4.21. Карта глубины затопления моделируемого участка р. Северная Двина (половодье 0,001% обеспеченности заторного генезиса)

На северо-востоке города глубина затопления составляет 3-5 метров, происходит затопление первых этажей зданий и частично вторых. В южной части города глубина затопления значительно выше и в отдельных районах достигает 9 м. При рассмотрении такого сценария незатопленной остается только северо-западная часть города, расположенная на возвышении. Помимо города затоплению будут подвержены все деревни, расположенные вблизи реки, например, д. Добрынино, Дымково, Кузино, Демьяново и др.

Для анализа скоростного поля течения была построена карта скоростей на исследуемую территорию (рисунок 4.22).

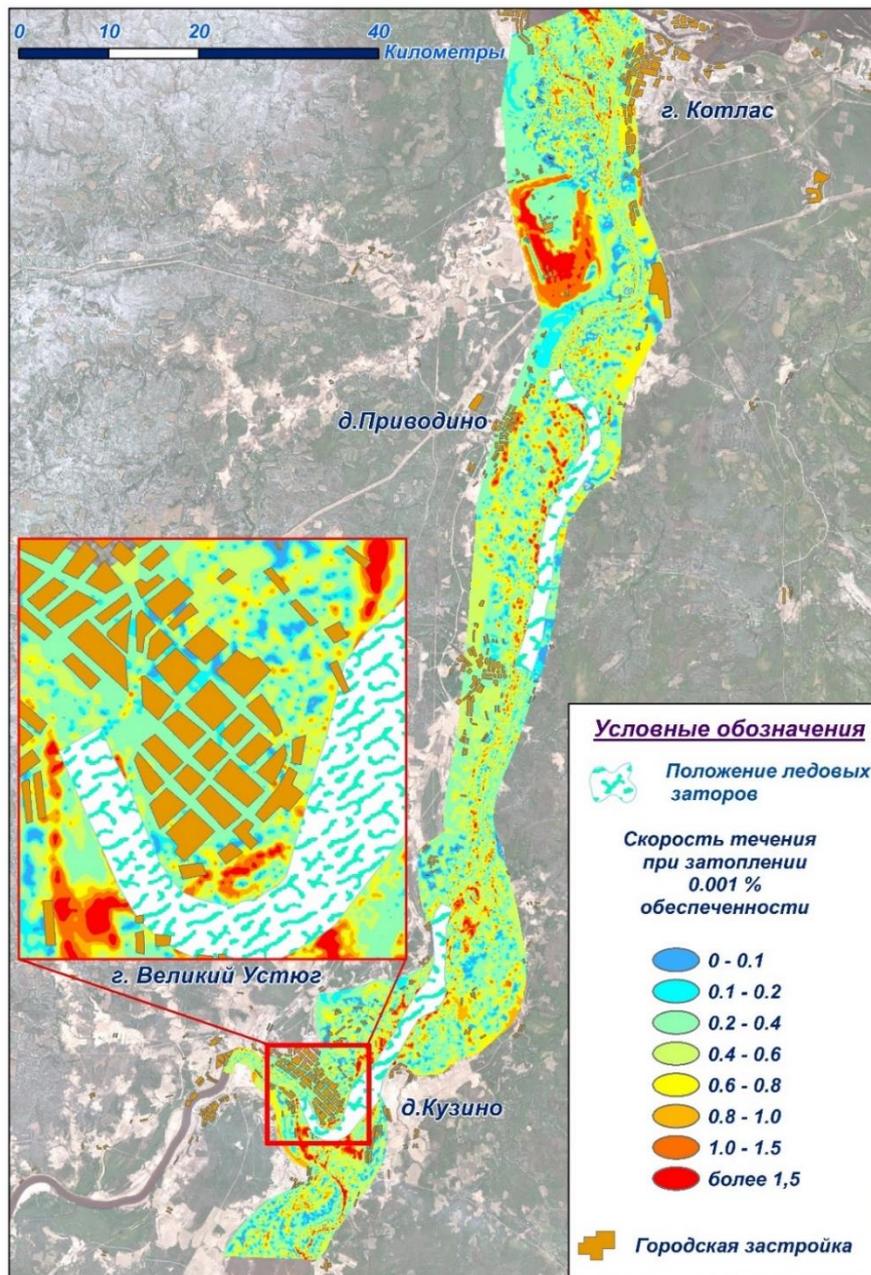


Рисунок 4.22. Карта распределения скоростей течения моделируемого участка р. Северная Двина (половодье 0,001% обеспеченности заторного генезиса)

В черте г. Великий Устюг скорость течения составит 0,2 – 0,4 м/с, однако в отдельных участках она может увеличиваться до 0,8 м/с. Заметное увеличение скорости будет наблюдаться в ложбинах, за счет гидравлического сжатия потока, так, например, на левом берегу р. Северная Двина выше по течению г. Котлас наблюдается локальное увеличение скорости до 1,5 м/с и более.

Глава 5. Анализ возможных мероприятий по обеспечению гидрологической безопасности г. Великий Устюг

5.1 Оценка эффективности противопаводковых дамб

При проектировании гидротехнических сооружений выбор обеспеченности при проведении гидрологических расчетов определяется классом сооружения. Соответствие класса и обеспеченности максимального расхода воды регламентируется СП 58.13330.2012 (п. 8.24) [СП 58.13330.2012]:

«При проектировании постоянных речных гидротехнических сооружений расчетные максимальные расходы воды надлежит принимать, исходя из ежегодной вероятности превышения (обеспеченности), устанавливаемой в зависимости от класса сооружений для двух расчетных случаев – основного и поверочного».

Ежегодная вероятность превышения расчетных максимальных расходов воды в зависимости от класса сооружения приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Ежегодные вероятности превышения расчетных максимальных расходов воды, P %

Расчетные случаи	Классы сооружений			
	I	II	III	IV
Основной	0,1	1,0	3,0	5,0
Поверочный	0,01*	0,1	0,5	1,0

Одной из востребованных прикладных задач, связанных с гидродинамическим моделированием, является оценка эффективности проектируемых инженерных сооружений в русле и на пойме [Сазонов и др., 2015; Дебольская, 2010].

В рамках Государственной программы Вологодской области «Охрана окружающей среды, воспроизводство и рациональное использование природных ресурсов на 2013–2020 годы» было принято решение о строительстве противопаводковой дамбы на р. Северная Двина вокруг г. Великий Устюг. При проведении изысканий, выполненных в 2013 г. МГУ имени М.В. Ломоносова и в апреле 2016 г. ООО «ПНИ «Севзапдорпроект» [Материалы по обоснованию..., 2016], было предложено два проекта строительства: длинная дамба от д. Коробейниково до д. Красное поле (рисунок 5.1а) и малая дамба, защищающая только г. Великий Устюг (рисунок 5.1б).

Ввиду слишком высокой стоимости первого проекта был принят вариант дамбы, защищающей только город. Ее проектная отметка составила 59,6 м по всему периметру. Строительство запланировано провести в два этапа в период с 2017 по 2022 г.

На первом этапе, в 2017–2019 гг., планировалось возвести защитную дамбу в юго-восточной части протяженностью 2,5 км. На втором этапе, в 2019–2022 гг., планируется строительство второго участка противопаводковой дамбы, защищающей северную от затопления часть города, протяженностью 1,76 км. Общая стоимость строительства дамбы составит более 1 млрд рублей.

Для оценки воздействия на характеристики затопления планируемых инженерных противопаводковых мероприятий на р. Малая Северная Двина было проведено моделирование ситуаций для обоих вариантов строительства. Для этого в цифровую модель рельефа внесены возможные варианты конфигурации защитной дамбы у города Великий Устюг и прилегающего сегмента поймы р. Северной Двины. Проведено моделирование для граничных условий, аналогичных сценариям для современных условий, но с учетом защитной дамбы при максимальных уровнях стокового и заторного генезиса и оценены изменения гидродинамических характеристик потока при наличии защитного сооружения.

Рассмотрим следующие сценарии:

- 1) Максимальные уровни 1% обеспеченности заторного генезиса при условии строительства по первоначальному проекту дамбы;
- 2) Максимальные уровни 1% обеспеченности заторного генезиса при условии строительства по окончательному проекту дамбы.

Сценарий 1. Максимальные уровни 1% обеспеченности заторного генезиса при условии строительства дамбы по первоначальному проекту.

Первоначальный проект строительства противопаводковой дамбы предполагал защиту от наводнений не только г. Великий Устюг, но и прилегающих к нему населенных пунктов. Согласно плану, дамба должна была начинаться от автомобильного моста через р. Сухона и располагаться вдоль берега реки, оставляя затон с внешней стороны; далее дамба должна была поворачивать на север и тянуться вдоль островов Малый Коневец и Большой Коневец, защищая д. Рогозино и Сулинская. Северная граница дамбы должна была проходить по правому берегу р. Стрига, впадающей в р. Северная Двина, таким образом, под защиту попадал бы целый ряд населенных пунктов, например, д. Федоровская, Юдино, Дудино, Коншево и другие.

В результате протяженность противопаводковой дамбы, согласно первоначальному проекту, составила бы более 15 км. Для того, чтобы оценить ее влияние на динамику водного потока, был проведен расчет, имитирующий подъем уровня воды до отметки 1%

обеспеченности заторного генезиса. Расчет с помощью гидродинамической модели STREAM_2D производился с постоянным расходом воды до момента установления уровня во всех контрольных точках. Как было отмечено ранее, целью данного расчета является определение влияния подпора, создаваемого дамбой при возникновении 1% максимального уровня заторного генезиса, а также определение характеристик зоны затопления для населенных пунктов, не защищенных дамбой. На основе полученных результатов была построена карта глубин (рисунок 5.2-а) и скоростей течения (рисунок 5.2-б).

На карте глубин затопления видно, что населенные пункты, расположенные за дамбой, оказываются полностью затоплены. Глубина затопления в д. Дымково и Добрынино будет составлять 4–5 м, а в отдельных местах может достигать 7 м. При таком сценарии наступает затопление жилых домов, затопление автотранспорта, возможно всплытие деревянных домов, которые составляют основу поселений вне городской черты.

Такие экстремальные значения глубин затопления достигаются наложением подпора, создаваемого ледовым затором, образованным в узле слияния, и стеснением дамбой поперечного сечения русла реки Сухона.

Пойма р. Юг также подвергается затоплению. От д. Карасово и до д. Подворские фарватер проходит под правым, крутым берегом, поэтому разлив реки происходит на левый берег, на территории затопленной поймы глубина составляет от 4 до 8 м. Причем, если в предыдущем сценарии вода огибала ледовый затор по левому берегу, затапливая пойму и все населенные пункты, то в данном случае город и деревни, защищенные дамбой, в совокупности с ледовым затором приводят к затоплению высокой правобережной поймы, на которой располагается д. Кузино. Несмотря на свое относительно высокое положение, деревня подвергается затоплению, причем глубины в ее черте достигают 3 м, что означает полное затопление первых этажей и невозможность передвигаться без плавсредств.

Распределение скоростей течения похоже на сценарий при отсутствии дамбы: по мере приближения к ледовому затору скорость течения будет уменьшаться, однако за счет стеснения потока, вызываемого наличием дамбы, значения скорости будут выше. В районе, где располагаются деревни Дымково, Добрынино и Кузино, скорость течения может достигать 0,6 м/с.

При выходе на пойму поток также теряет скорость за счет увеличения коэффициента шероховатости; в некоторых местах, например, на левобережной пойме р. Юг, скорость течения становится близкой к нулю.

Наибольшие значения скорости на территории затопленной поймы наблюдаются в сужении русла. К таким участкам относится пространство между восточной окраиной

противопаводковой дамбы и телом затора или между затором и берегом, на котором расположена д. Демьяново.

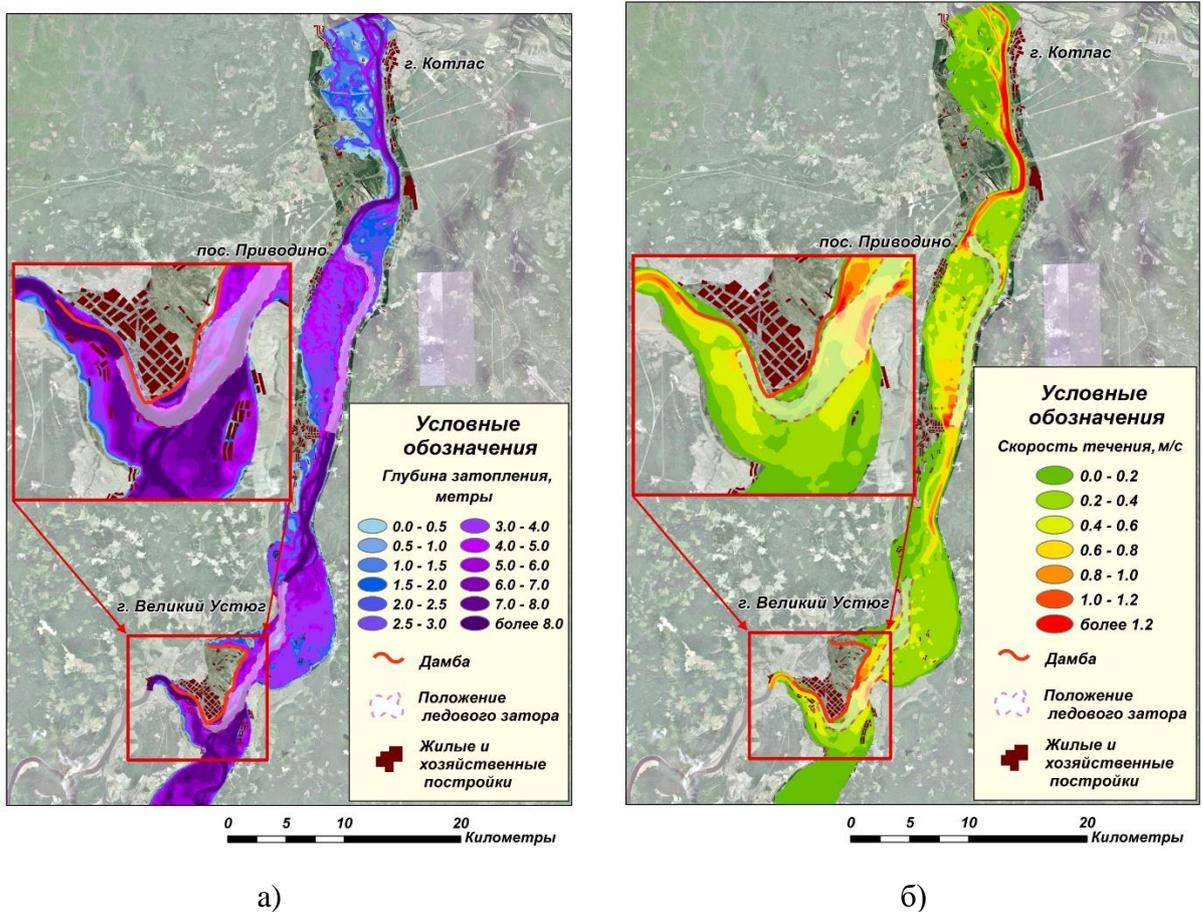
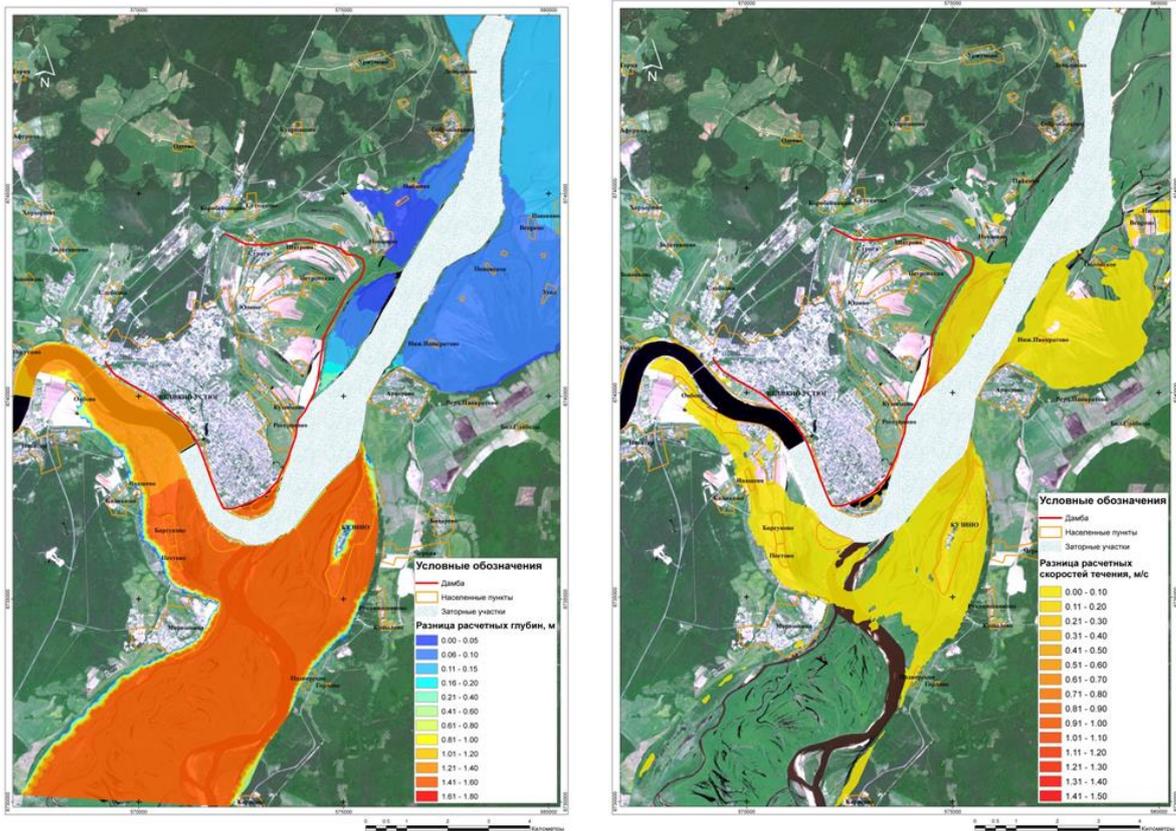


Рисунок 5.2. Смоделированные глубины затопления (а) и скорости течения (б) при уровне воды 1% обеспеченности заторного генезиса при условии строительства дамбы по первоначальному проекту

Глубины воды на пойме при данном сценарии возрастут более чем на 1м (рисунок 5.3 -а), скорости течения на 0,1 - 0,2 м/с, на отдельных участках на 0,4 м/с (рисунок 5.3-б) по сравнению со сценарием при отсутствии дамбы.



а)

б)

Рисунок 5.3 Разница рассчитанных на основе модели STREAM_2D отметок водной поверхности (а) и скоростей течения (б) у г.Великий Устюг при 1% уровнях заторного генезиса в современных условиях и при наличии протяженной защитной дамбы

Сценарий 2. Максимальные уровни 1% обеспеченности заторного генезиса при условии строительства дамбы по окончательному проекту.

В принятом к реализации проекте положение защитной дамбы вдоль р. Сухона совпадает с предыдущим планом, однако северная граница дамбы располагается ближе к г. Великий Устюг, в результате чего ряд деревень остался незащищенным от негативного воздействия вод. Для оценки влияния дамбы на зону затопления и характеристики наводнения так же, как и в предыдущем сценарии, был произведен расчет, имитирующий подъем уровня воды до отметки 1% обеспеченности заторного генезиса. На основании полученных результатов была построена карта глубин (рисунок 5.4а) и карта скоростей течения (рисунок 5.4б).

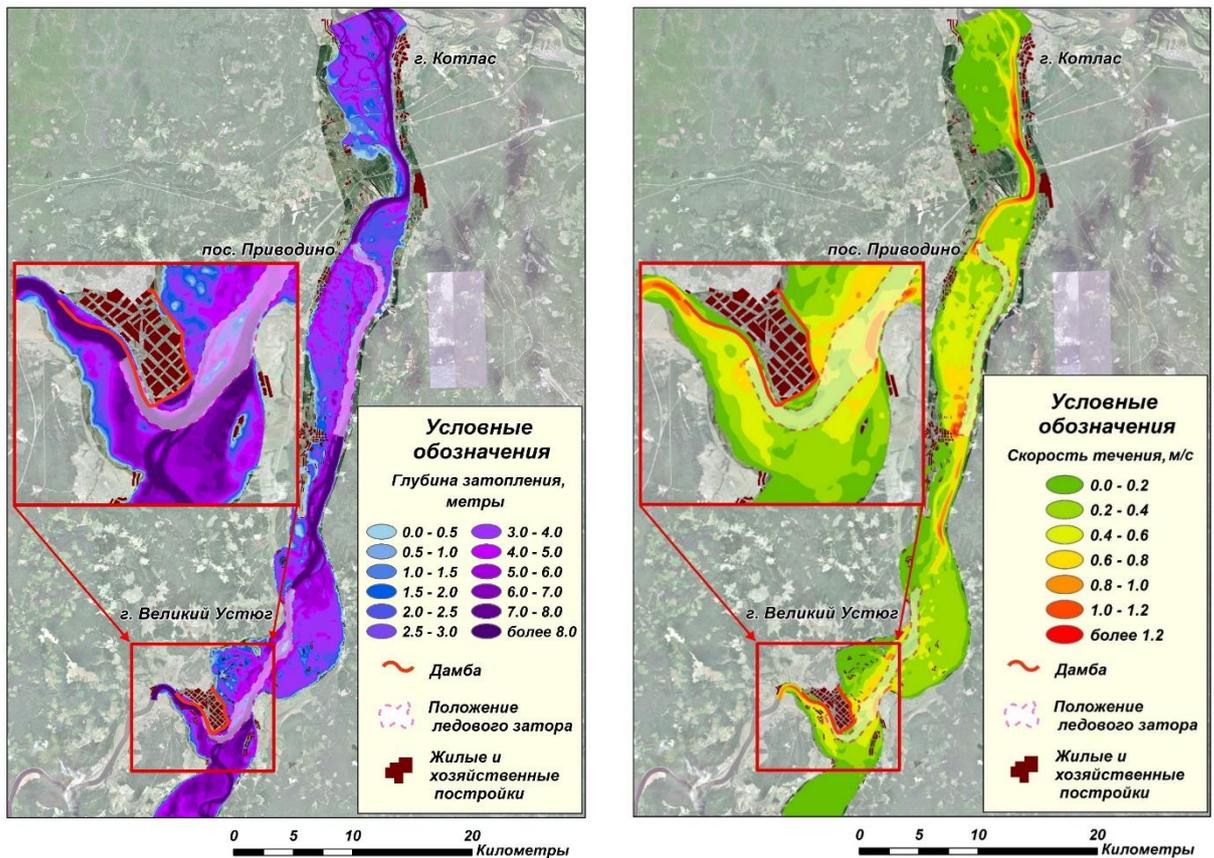


Рисунок 5.4. Глубина затопления (а) и скорости течения (б) при уровне воды 1% обеспеченности заторного генезиса при условии строительства по окончательному проекту дамбы

Установление ледового затора в узле слияния рек вызывает гидравлический подпор воды, в результате которого происходит разлив рек Сухона и Юг.

При этом правобережная пойма р. Сухона, где располагаются вышеупомянутые деревни Дымково и Добрынино, будет подвержена затоплению. Глубина затопления составит 2,5–3 м, что означает полное затопление первых этажей находящихся там домов.

Левобережная пойма р. Юг также подвергнется полному затоплению, при этом на большей ее части глубины составят от 3 до 4 м.

Высокая правобережная пойма, расположенная ниже по течению слияния рек Сухона и Юг, на которой располагается пос. Кузино, также подвергнется затоплению за исключением центральной части. Глубина затопления в пределах поселка будет уменьшаться от периферии к центру, максимальная глубина составит 2,5–3 м.

Ниже по течению слияния рек Сухона и Юг, к северу от дамбы, затоплению будет подвержена обширная территория сегментно-гвивистой поймы, на территории которой находится фрагмент частично сохранившейся древней излучины (рисунок 5.5).

Большинство населенных пунктов, располагающихся на ее территории, стоит на гривах, глубина затопления для них составит 1,5–2 м. Для населенных пунктов, расположенных в ложбинах, глубина затопления составит 4–5 м. Такие значения глубин свидетельствуют о том, что в обоих случаях будут затоплены все дороги и первые этажи зданий.



Рисунок 5.5. Фрагмент сегментно-гривистой поймы с застройкой в зоне затопления

Распределение скоростей течения реки Сухона на затопленной территории правобережной поймы будет неоднородно. За счет подпорного эффекта, создаваемого дамбой, скорость течения достигнет своего максимального значения на данном участке в районе д. Дымково, при этом она составит 0,6–0,8 м/с. В месте слияния с водами реки Юг скорость течения снизится до 0,2–0,4 м/с. В районе затопленной поймы р. Юг скорость течения более однородна и не превысит 0,2 м/с. На обширной правобережной пойме, расположенной к востоку от тела затора, распределение скорости течения достаточно однородно, она составит 0,2–0,4 м/с, лишь на отдельных участках возрастая до 0,6 м/с. Ниже по течению головы затора скорость потока составит 0,2–0,4 м/с, однако по мере продвижения вниз по течению она возрастет до 1 м/с в пределах меженной границы русла реки.

Чтобы сопоставить подпорное влияние противопаводковых дамб при различных сценариях также были построены продольные профили водной поверхности для различных сценариев (рисунки 5.6 - 5.7). Для этого по фарватеру русла реки, от верхней границы модели к нижней, была проведена линия, по которой был построен график высотных отметок водной поверхности для каждого из сценариев. По горизонтальной оси откладывались значения расстояний от верхней границы модели, а по вертикальной оси – высотные отметки водной поверхности.

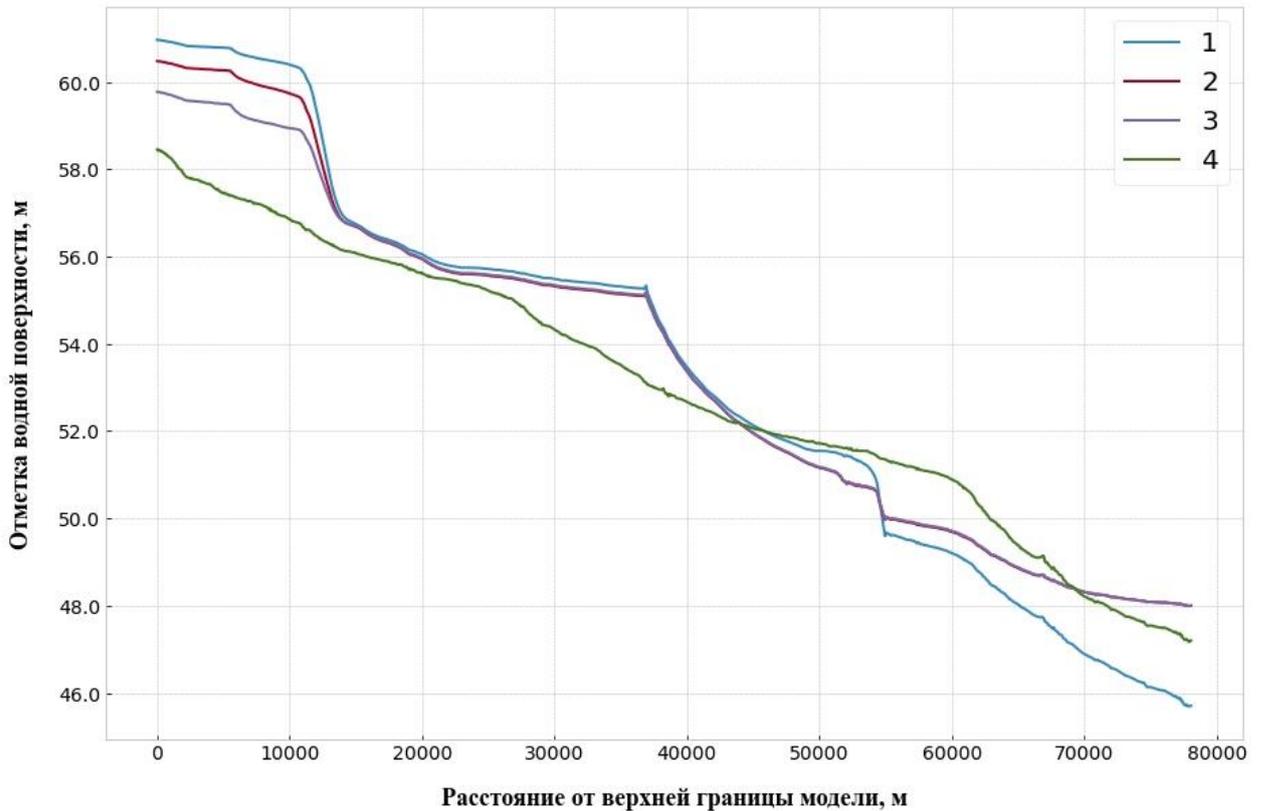


Рисунок 5.6. Продольный профиль высотных отметок водной поверхности от верхней границы модели по реке Сухона до нижней границы в районе города Котлас при уровне воды 1% обеспеченности в случае: 1 - строительства дамбы по первоначальному проекту и наличии ледового затора, 2 - строительства дамбы по актуальному проекту и наличии ледового затора, 3 - без строительства дамбы и наличия ледового затора, 4 - без строительства дамбы и без ледового затора

На продольном профиле уровня воды отчетливо видно положение ледовых заторов. На графике они представлены в виде двух ступеней с резким спадом уровня за головой затора. Не давая свободно проходить водному потоку по руслу, затор уменьшает уклон водной поверхности, в некоторых случаях создавая даже обратный уклон. Ниже по течению головы ледового затора уклон воды резко увеличивается, именно наиболее резкое падение

отметки водной поверхности отмечает положение замка затора. На нижней границе модели уровень воды 1% обеспеченности при условии обоих проектов защитных дамб и при наличии ледового затора совпадают, причем уровень совпадает с 38-го километра от верхней границы модели. Таким образом, можно сделать вывод, что характеристики затопления населенных пунктов, расположенных ниже по течению г. Красавино, не зависят от параметров противопаводковой дамбы вокруг г. Великий Устюг. Продольный профиль высотных отметок водной поверхности при уровне 1% обеспеченности стокового генезиса характеризуется отсутствием резких перегибов и равномерным уклоном водной поверхности.

В рассмотрении каждого из четырех сценариев особое внимание уделялось защите самого города, а также населенным пунктам, расположенных в непосредственной близости от города, а именно д. Добрынино, Дымково и Кузино. Чтобы оценить влияние защитной дамбы на их затопление, были сопоставлены продольные профили от верхней границы модели (по реке Сухона) до головы затора. Протяженность данного участка составила 16 км (рисунок 5.7). Анализ продольных профилей показал, что за счет подпорного эффекта от дамб отметки водной поверхности при заторном наводнении 1% обеспеченности у гидрологического поста Великий Устюг поднимутся на 1.3 м (до отметки 60.78 м БС) при длинной дамбе по варианту первоначального проекта и на 0.7 м (до отметки 60.26 м БС) при дамбе, защищающей только городскую территорию по принятому проекту.

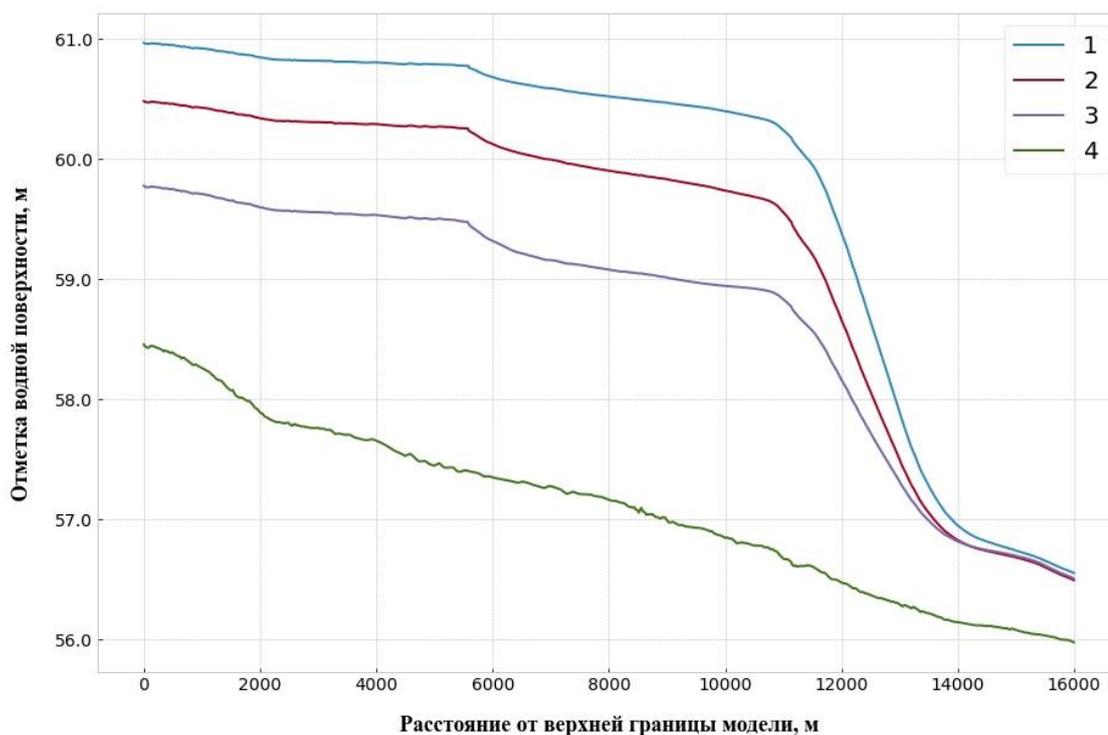


Рисунок 5.7. Продольный профиль высотных отметок водной поверхности для узла слияния рек Сухоны и Юга (обозначения как на рисунке 5.6)

Таким образом, можно сделать вывод, что строительство одной дамбы не решает вопрос полной защиты города и прилегающих территорий от затопления. Полная защита рассматриваемой территории может быть реализована только при наращивании гребня дамбы до отметок более 60 м БС и строительства более длинной дамбы по первоначальному проекту, однако, это невозможно из нарушения исторического облика города, высокой стоимости сооружений и негативного подпорного повышения уровней воды. В связи с этим требуются как дополнительные защитные инженерные мероприятия, так и разработка методов прогноза ледовых заторов и максимальных уровней воды.

Одним из дополнительных инженерных методов уменьшить подъем уровня воды является уменьшение объема льда, поступающего с верхнего течения реки. Этот факт был подтвержден экспериментальным путем в Руслевой лаборатории ГГИ на гидравлической модели, представляющей собой уменьшенную копию участка долины р. Сухона и Юг, в слиянии которых расположен г. Великий Устюг. В результате эксперимента было показано, что одним из возможных способов защитить город от неблагоприятного воздействия ледовых заторов является создание косых свайных шпор в 14 км выше по течению р. Сухона от г. Великий Устюг. Подобные шпоры предназначены для формирования искусственного затора выше по течению и уменьшения объема льда, приходящего в створ г. Великий Устюг [Католиков, Католикова, 2017]. Расчеты, проведенные в ГГИ, показали, что одновременное возведение системы шпор на р. Сухона и дамбы вокруг г. Великий Устюг позволит снизить уровень водной поверхности 1% обеспеченности заторного генезиса с 60,26 до 59,6 м. В связи с этим, отметка 59,6 м была принята в качестве проектной высоты возводимой дамбы.

Другим направлением, наряду с инженерными методами защиты, является разработка методов прогноза заторных наводнений, основные подходы к которым, разработанные в рамках диссертационной работы, приведены в следующих разделах.

5.2 Долгосрочный прогноз возникновения заторов льда с помощью методов машинного обучения⁸

За последние два десятилетия произошел огромный скачок в развитии вычислительной техники и машинного обучения, что позволило применять различные алгоритмы машинного обучения к большому числу прикладных задач, в том числе для прогноза наводнений [Humphrey et al, 2008; Xiong et al, 2004; Малыгин, 2014]. В теории

⁸ Раздел написан на основе статьи [Semenova et al., 2020]

машинного обучения существует множество различных алгоритмов, используемых для задачи классификации. Среди них можно отметить следующие: вероятностные, метрические, логические алгоритмы и нейронные сети. Каждый из этих методов использует свой математический аппарат, эффективность которого напрямую зависит от поставленной задачи. Например, вероятностные методы и нейронные сети требуют достаточно большого количества наблюдений, для получения статистически значимых результатов. При отсутствии таковых обычно используются метрические и логические подходы.

Для оценки возможности автоматического прогнозирования возникновения ледового затора в рамках исследования заторных наводнений у г. Великий Устюг была разработана модель на основе алгоритма метрического KNN-метода (K Nearest Neighbor) основанного на гипотезе компактности, близости схожих объектов [Semenova et al., 2020; Семенова и др., 2020а, Семенова и др., 2020б]. Преимуществами этого метода являются устойчивость к выбросам, простота реализации, интерпретируемость и возможность работы с небольшими объемами данных [Hand et al., 2001; Zhang, 2016].

При построении признаков использовались данные со следующих 6 гидрологических постов: г. Великий Устюг, г. Котлас, г. Тотьма, д. Каликино, д. Березовая Слободка, пос. Подосиновец; и метеоданные по трем метеостанциям: с. Нюксеница, г. Никольск и г. Великий Устюг. Выбор метеостанций был обусловлен тем, что две из них расположены как раз на рр. Сухона (с. Нюксеница) и Юг (г. Никольск), а метеостанция г. Великий Устюг как раз на месте слияния этих двух рек.

Из исходных данных были построены две группы признаков (гидрологические по каждому из 6 гидропостов (всего 42) и метеорологические по трем станциям (всего 21)), которые приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Список гидрологических (а) и метеорологических (б) признаков

Номер признака	Название признака	Характеристика - ед.измерения
1	Предледоставный уровень воды	«а» - см
2	Уровень при появлении первых ледовых явлений	«а» - см
3	Продолжительность замерзания	«а» - сут
4	Продолжительность осеннего ледохода	«а» - сут
5	Максимальная толщина льда	«а» - см
6	Количество дней до вскрытия	«а» - число суток с 1 февраля, сут
7	Расход воды за день до вскрытия	«а» - м ³ /с

8	Особенности температурного режима в период замерзания	«б» - переход температуры через 0 °С, число суток с 1 сентября
9	Особенности температурного режима в период вскрытия	«б» - переход температуры через 0°С, число суток с 1 февраля
10	Сумма отрицательных значений температуры воздуха за холодный период	«б» - °С
11	Сумма положительных значений температуры за холодный период	«б» - °С
12	Суммарное количество осадков	«б» - мм
13	Суммарное количество твердых осадков	«б» - мм
14	Число дней с положительной температурой за холодный период	«б» - сут

Полученные признаки образуют базу данных наблюдений за период с 1960 по 2019 гг. Каждый год наблюдений характеризуется вектором, состоящим из числовых значений метеорологических и гидрологических признаков (вектор признаков).

Было выделено два сценария для прогнозирования (целевая переменная):

1. Наличие заторного подъема уровня воды на участке слияния р. Сухона и Юг в районе г. Великий Устюг.
2. Отсутствие заторного подъема уровня воды в районе г. Великий Устюг.

Метод k ближайших соседей относится к метрическим классификаторам. В его основе лежит предположение, что сходные по признакам, близкие объекты будут относиться к одному классу. Для определения понятия «близости» двух объектов вводится функция расстояния $\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ (метрика) между ними, как функция от двух векторов-признаков $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ и $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)$ этих наблюдений. Классическими метриками в задачах машинного обучения считаются следующие метрики:

- Евклидова метрика

$$\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}, \quad (5.1)$$

- Манхеттенское расстояние

$$\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|, \quad (5.2)$$

- Чебышевская метрика

$$\rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max_{i=1 \dots n} |x_i - y_i|, \quad (5.3)$$

Алгоритм вычисляет расстояния от классифицируемого объекта до каждого известного наблюдения, находит k объектов с наименьшим расстоянием к классифицируемому

наблюдению и происходит «голосование» – классифицируемый объект относится к тому классу, к которому относится большинство из соседей данного элемента.

При такой классификации расстояние играет роль только при отборе k близких объектов, однако при голосовании оно уже не имеет значения. Одной из возможных модификаций алгоритма является взвешенное голосование (weighted voting). При этой модификации учитывается также расстояние до новой записи. Таким образом, чем ближе находится сосед от классифицируемого объекта, тем с большим коэффициентом учитывается его голос.

Для оценки качества модели в качестве основной метрики использовалась ассигасу – доля правильных ответов. Также дополнительно рассматривалась метрика полноты. Полнота показывает, какая часть положительных объектов была выделена классификатором. В нашем случае – какая часть заторных лет была распознана алгоритмом верно.

Результат работы алгоритма ближайших соседей для каждой конкретной задачи зависит от выбора параметров модели: количества соседей k , метрики расстояния между объектами $\rho(x, y)$ и от наличия весов при голосовании. Для выбора наилучших параметров модели вычисляется качество модели для каждого набора параметров и выбирается наилучшая комбинация значений.

С целью избежать эффекта переобучения при подборе гиперпараметров для оценки качества алгоритма используется метод кросс-валидации (K-fold cross validation). Обучающая выборка случайным образом разбивается на K частей. Алгоритм последовательно обучается на подвыборке, состоящей из $K-1$ частей, а качество модели считается на отложенной E_i . Итоговое качество алгоритма E при данном наборе гиперпараметров считается как среднее между значениями качества, полученными на кросс-валидации (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8. Иллюстрация работы метода кросс-валидации для случая $K=5$

Исходные данные были разделены на обучающую (1960 – 1999 гг.) и тестовую (2000 – 2019 гг.) выборки. При подборе параметров модели участвовала только обучающая выборка. Тестовая использовалась для последующей валидации полученной модели. С целью улучшения качества прогноза была дополнительно проведена предобработка данных. Так как продолжительность наблюдений составляет 60 лет, а признаков слишком много, то с целью предотвращения возникновения лишнего шума и переобучения был произведен отбор 10 наиболее скоррелированных с целевой переменной признаков. Перечень выбранных признаков приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Перечень 10 наиболее скоррелированных гидрологических (а) и метеорологических (б) признаков

Расположение гидрометеорологической станции	Номер признака	Название признака	Характеристика - ед.измерения
г. Великий Устюг	4	Продолжительность осеннего ледохода	«а» - сут
	5	Максимальная толщина льда	«а» - см
	8	Особенности температурного режима в период замерзания	«б» - переход температуры через 0 °С, число суток с 1 сентября
г. Котлас	5	Максимальная толщина льда	«а» - см
г. Никольск	8	Особенности температурного режима в период замерзания	«б» - переход температуры через 0 °С, число суток с 1 сентября
г. Тотьма	4	Продолжительность осеннего ледохода	«а» - сут
д. Березовая Слободка	1	Предлежавший уровень воды	«а» - см
	3	Продолжительность замерзания	«а» - сут
д. Каликино	1	Предлежавший уровень воды	«а» - см
с. Нюксеница	8	Особенности температурного режима в период замерзания	«б» - переход температуры через 0 °С, число суток с 1 сентября

На рисунке 5.9 изображена диаграмма рассеяния четырех максимально скоррелированных признаков с разделением на группы по целевой переменной.

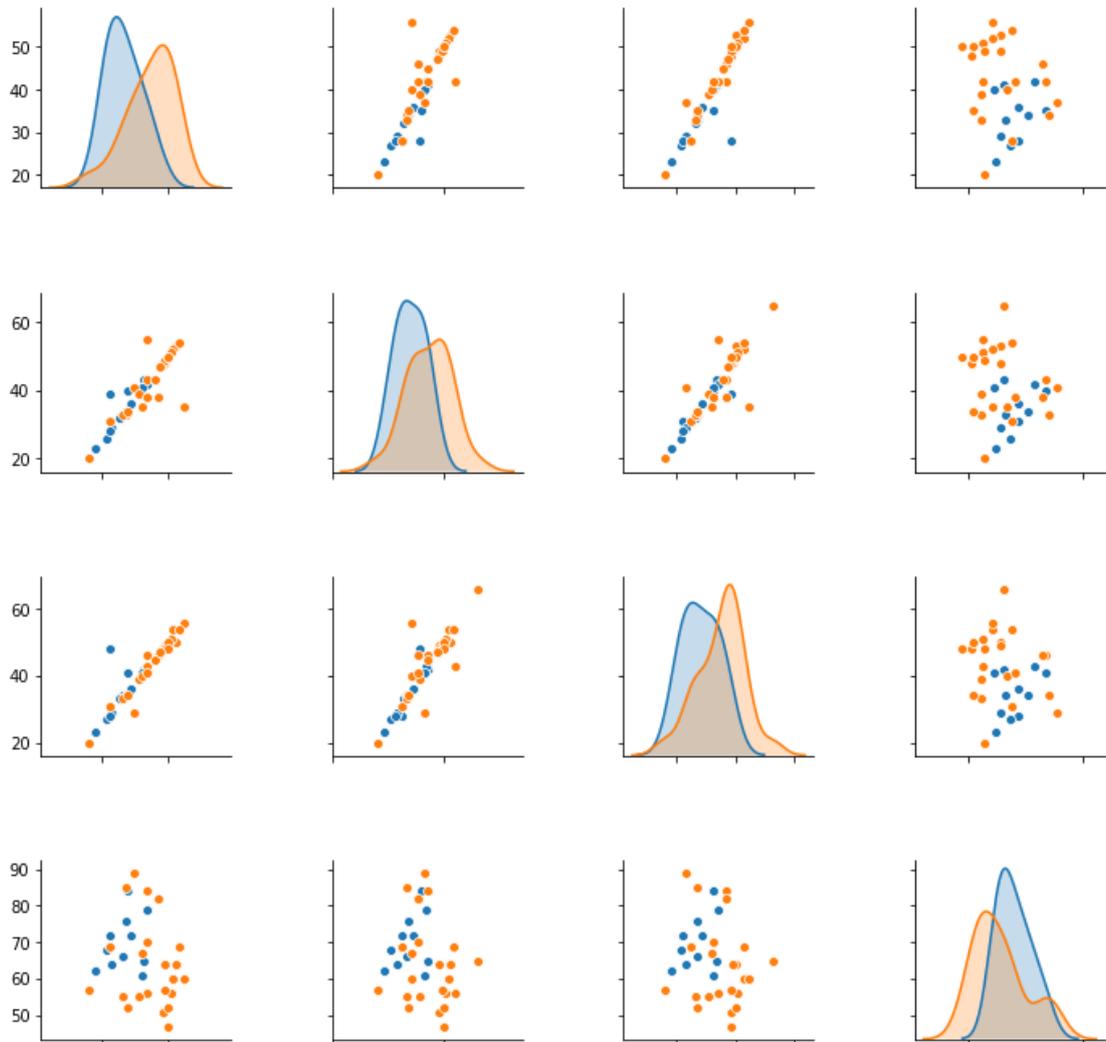


Рисунок 5.9. Диаграмма рассеяния для особенностей температурного режима в период замерзания для г. Нюксеница, г. Великий Устюг и г. Никольск и максимальная толщина льда для г. Котлас. Оранжевые точки – заторный подъем был, синие – заторного подъема не было

Метрические алгоритмы классификации очень чувствительны к масштабу данных. Исходные признаки могут находиться и изменяться в разных диапазонах, внося различный вклад в метрику. Дисбаланс между значениями признаков может вызвать неустойчивость работы модели и ухудшить ее качество. Например, признаки с большими числовыми значениями могут стать преобладающими, вклад в метрику признаков с малыми значениями будет очень мал и такие признаки просто не будут учитываться при построении модели. Для того, чтобы избежать такой ситуации, признаки необходимо нормализовать. В

данной задаче использовался метод MaxAbsScaler. При такой нормировке каждый признак масштабируется по своему максимальному абсолютному значению, тем самым диапазон изменения каждого признака трансформируется в диапазон $[-1; 1]$.

После предобработки данных был произведен подбор параметров модели с помощью кросс-валидации на тренировочной выборке. Наилучшими параметрами оказались евклидова метрика с 5 соседями без весов. Средняя оценка качества на обучающей выборке составила 79%.

После подбора оптимальных параметров была обучена соответствующая модель на тренировочной выборке и была произведена проверка итоговой модели. Число правильно классифицируемых лет составило 85% (рисунок 5.10).

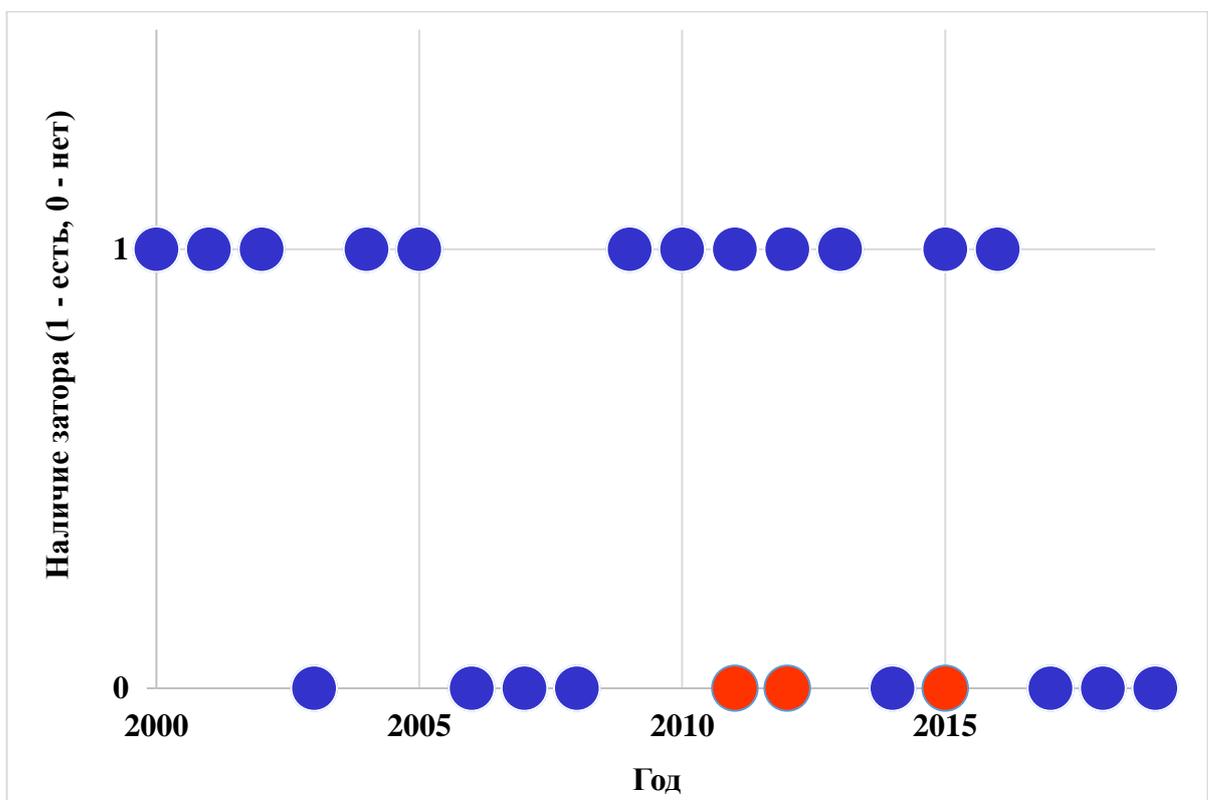


Рисунок 5.10. Результат верификации модели прогнозирования ледового затора в районе города Великий Устюг на основе KNN-метода (синий цвет — оправданный прогноз, красный цвет — ошибка модели)

Таким образом показано, что при наличии необходимых метеорологических и гидрологических данных возможно прогнозирование ледовых заторов у г.Великий Устюг с заблаговременностью до 1 месяца. Наличие подобных прогнозов может повысить готовность местных служб и населения, а также обосновать необходимость противозаторных мероприятий (ледорезные работы, чернение льда и т.п.).

5.3 Возможные подходы к применению комплекса моделей для краткосрочного прогнозирования характеристик затопления⁹

Одним из наиболее востребованных направлений в гидрологии является создание систем прогнозирования опасных гидрологических явлений, таких как наводнения, вызванные прохождением половодья или дождевых паводков. В качестве основы, дающей прогностическую информацию о характеристиках затоплений, используются гидрологические математические модели, как по отдельности, так и в совокупности. В ряде зарубежных стран в настоящее время подобные системы прогнозирования и оповещения населения успешно показали себя в оперативной практике [Buizza et al., 1999; Demeritt et al., 2007; Vogner, Kalas, 2008; Alfieri et al., 2011; Cloke et al., 2013]. Так, например, в США с 1 января 1994 г. работает национальная программа Emergency Alert System, направленная на предупреждение населения в случае природной или техногенной катастрофы, а также в случае возникновения террористической опасности [Byungseok, Choo, 2016]. В ряде Европейских стран после наводнения на р. Эльба и Дунай в 2002 г. была создана система оповещения о наводнениях EFAS. Ответственным разработчиком данной системы стал Объединенный Исследовательский Центр, в ее создании приняли участие ряд стран, в том числе Германия, Чехия, Венгрия, Словакия, Австрия и др. С 2005 по 2011 г. происходило тестирование системы сначала в рамках национальных гидрометеорологических служб, а позднее в рамках единой Европейской защиты гражданского населения. С 2012 г. система EFAS была полноценно принята к использованию в оперативной практике, а уже в мае-июне 2013 г. она успешно показала себя во время наводнения в Германии, Австрии, Польше, Венгрии, Словакии и других Европейских государствах [Raynaud et al., 2014; Smith, 2016]. В настоящий момент система в автоматическом режиме принимает около 70 вариантов прогноза погоды, ассимилирует их и так же автоматически рассчитывает зону затопления. Заблаговременность прогноза составляет от 3 до 6 суток.

В России подобных систем федерального масштаба в настоящее время нет, существуют лишь отдельные региональные системы прогнозирования наводнения. Примерами таких систем являются система мониторинга и прогноза развития дождевых паводков [Бугаец и др., 2017], прогноза прохождения половодья на крупных реках, например, на р. Обь [Бураков, Волковская, 2019] или система прогноза притока воды к водохранилищам [Мотовилов и др., 2017].

⁹ Раздел написан на основе статьи [Krylenko et al., 2020]

Для создания единой системы прогнозирования на всю территорию Российской Федерации существует ряд препятствий, среди которых можно выделить большое разнообразие ландшафтных и климатических условий, отсутствие единого государственного автоматизированного гидрометеорологического мониторинга, наличие ледовых заторов, требующих более сложных методик прогнозирования.

Одной из развивающихся систем прогнозирования для участков рек, подверженных заторным наводнениям, в разработке которой принимал автор диссертации, является система ПРОСТОР (Прогнозирование Развития Опасных Ситуаций на Территории в Оперативном Режиме). В данной системе была произведена попытка совмещения различных типов моделей (модели формирования стока, одномерной и двумерной гидродинамической моделей) в единый комплекс, позволяющий проводить моделирование зон затопления в режиме реального времени [Alabyan et al., 2016; Зеленцов и др., 2019; Krylenko et al., 2020]. Данное исследование было осуществлено в рамках проекта РНФ №17-11-01254 силами СПИИРАН, кафедрой гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и ИВП РАН. Информационно-аналитическая система ПРОСТОР полностью автоматизирована, в том числе она способна в автоматическом режиме ассимилировать данные с самописцев уровня воды с гидрологических постов.

Принцип действия системы «ПРОСТОР» представлен на рисунке 5.11.

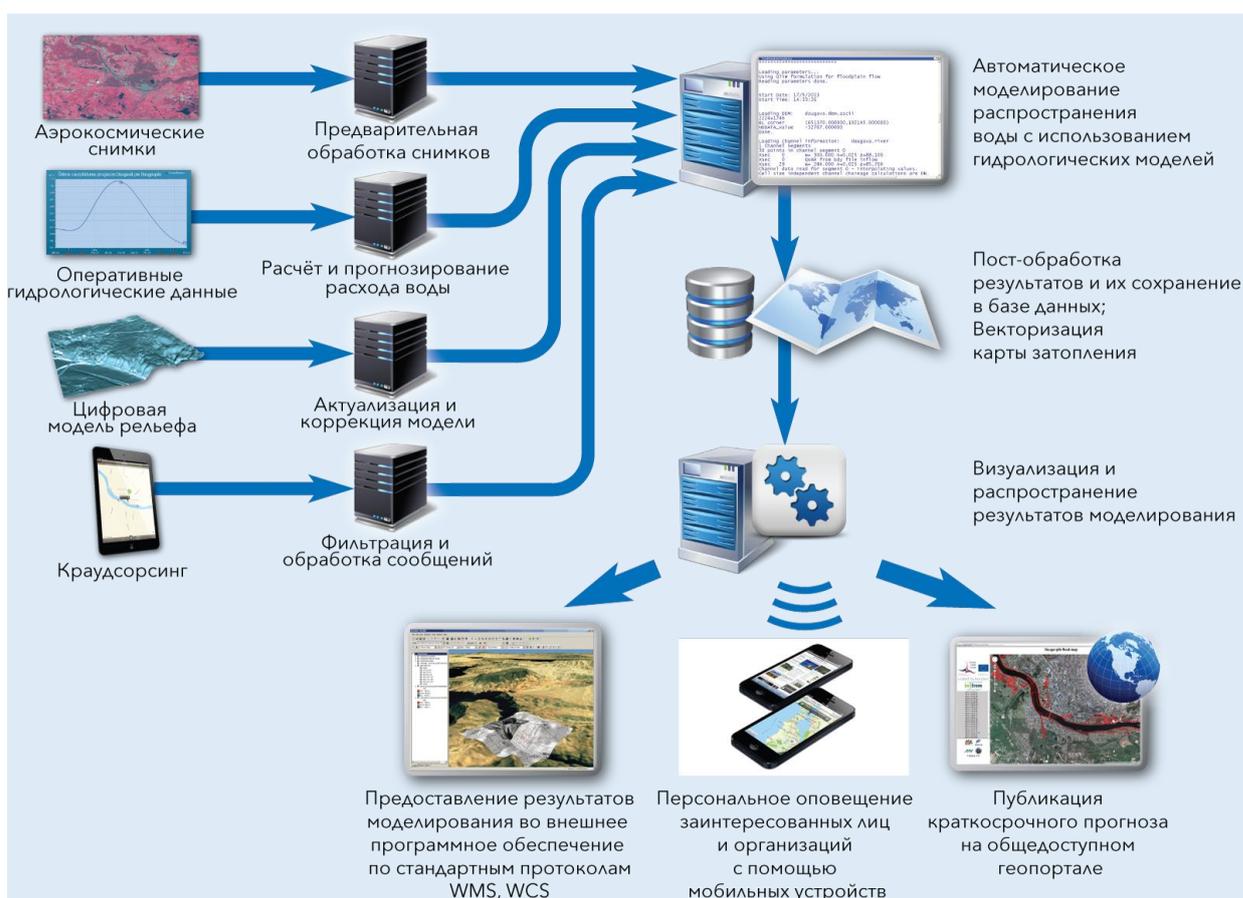


Рисунок 5.11. Схема работы системы «ПРОСТОР» [Алабян и др., 2016]

Использование в качестве исходных данных в системе именно уровней воды обусловлено невозможностью измерения расхода воды в период ледохода (рисунок 5.12). Также в системе предусмотрено получение расходов воды из модели формирования стока ECOMAG, входными данными для которой является как оперативная метеорологическая информация, так и метеорологические прогнозы с заблаговременностью до 3 суток. [Чурюлин и др., 2018]. Ядром системы для расчета зон затопления является двумерная гидродинамическая модель STREAM_2D.

При разработке системы в качестве опорного участка, где проводились все отладочные и тестовые расчеты, явился участок р. Северной Двины, от слияния р. Сухона и р. Юг до г. Котлас, при расчетах использовались адаптированные для данного участка модели и полученные для них наборы параметров. Для подключения ледового блока гидродинамической модели в системе была предусмотрена возможность переключения между наборами параметров в зависимости мощности затора. Признаком затороопасной ситуации принимается интенсивность нарастания уровней более 70 см/сутки в начале затора, окончание ледового затора определяется спадом уровней той же интенсивности. Дополнительно возможно выполнение проверки по оперативной информации о ледовой обстановке. Мощность затора может оперативно учитываться как по данным наземных

наблюдений, так и высоте заторного повышения уровней воды (по разности между рассчитанным по модели стоковым уровнем и фактически наблюдаемым).



Рисунок 5.12. Гидрологический пост города Великий Устюг 18 апреля 2019 г. (фото с сообщества Вологодского ЦГМС сайта «ВКонтакте»)

В качестве выходных данных система каждый час формирует прогноз зоны затопления на 24 часа в оперативном режиме при использовании только данных гидрологических постов и гидродинамической модели; дальнейшее увеличение заблаговременности (до 3 суток) связано с дальнейшим уточнением прогнозов расходов воды при использовании данных метеорологических прогнозов на входе в модель формирования стока ЕСОМАГ. Помимо наземных данных система ПРОСТОР использует данные космической съемки со спутников «Ресурс-П», «Sentinel-1» и «Sentinel-2», автоматическое выделение зоны затопления позволяет скорректировать параметры модели. Преимуществом данного комплекса является простота использования выходной информации, поступающей на разнообразные устройства, в том числе на планшеты и смартфоны, интерпретировать итоговые карты и графики может даже не специалист-гидролог (рисунок 5.13).

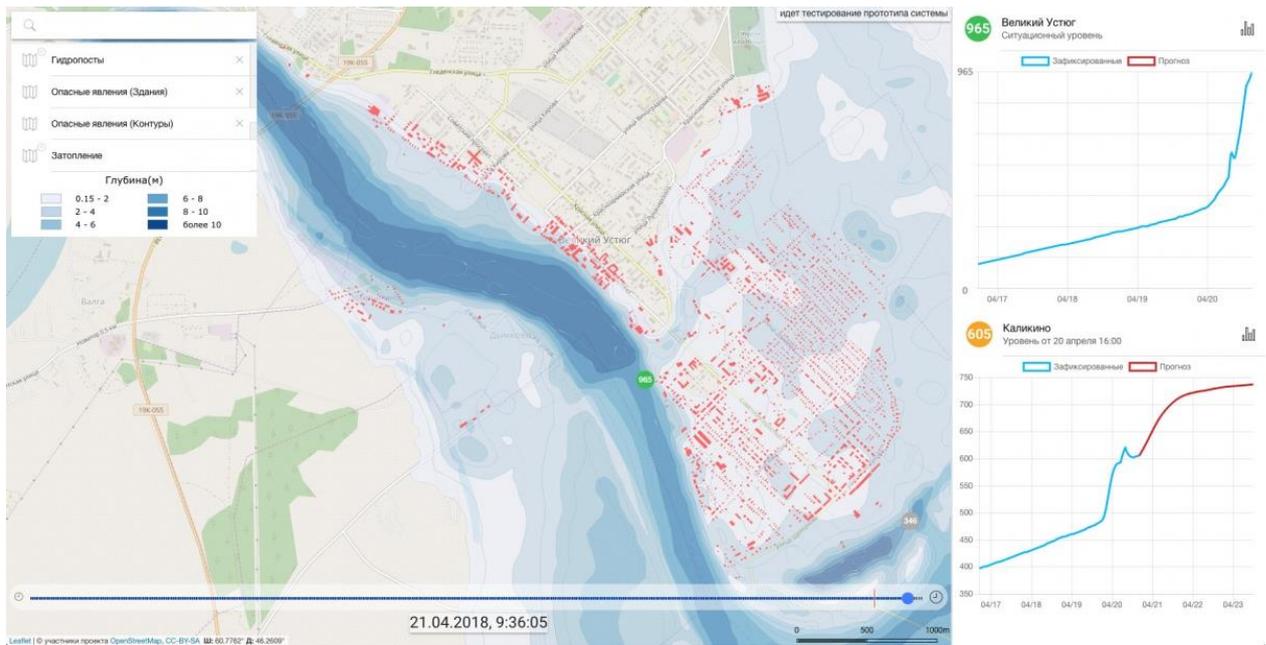


Рисунок 5.13. Тестирование системы ПРОСТОП, пример окна с визуализацией результатов

В рамках разработки системы автор диссертационной работы участвовал во всех этапах работы, связанных с научной частью проекта:

1. Разработка требований к структуре и составу данных наземных гидрологических измерений в условиях существующей сети гидрологических постов.
2. Тестирование совместной работы модели формирования стока ECOMAG и гидродинамической модели STREAM_2D для различных гидрологических ситуаций у г. Великий Устюг и разработка предложений по возможным сочетаниям разных типов моделей для работы комплекса в разные фазы водного режима.
3. Ретроспективный анализ прошедших наводнений у г. Великий Устюг на основе разработанной методики (на примере 1998 и 2016 г.).
4. Адаптация и тестирование методики численного гидродинамического моделирования уровенных и скоростных режимов на отдельных участках долины с учетом расположения селитебных территорий, детального рельефа местности и расположения застройки для района г. Великий Устюг.
5. Анализ результатов тестирования работы системы оперативного прогнозирования в режиме реального времени, в условиях ограниченности исходных данных, в бассейне р. Северной Двины в половодье 2019 г.

Особое внимание стоит уделить последнему пункту — работе системы ПРОСТОП в условиях ограниченных данных на примере половодья 2019 г.

В 2019 г. было проведено тестирование вычислительного комплекса (системы) на модельном участке реки от узла слияния рек Сухона и Юг, вблизи г. Великий Устюг, до г. Котлас. С целью проверки работоспособности комплекса в условиях ограниченности исходных данных последовательно было проведено моделирование формирования стока за период половодья, а после расчет характеристик потока и зоны затопления.

Для анализа гидрометеорологической обстановки автором были проанализированы данные об уровне воды на р. Сухона, р. Юг и р. Малая Северная Двина и бюллетени, выпускаемые Северным УГМС [<http://www.sevmeteo.ru/weather/gidro/>].

Март характеризовался относительно теплой погодой, с чередованием потеплений и похолоданий. Среднемесячная температура воздуха составила $-2 - -5$ °С, что выше климатической нормы на $2,3-3,2$ °. Общее количество осадков составило $18-52$ мм – $100-173\%$ нормы, местами $72-97\%$ нормы.

В отличие от предыдущего года, когда водность на основных реках была повышенной, уровни воды на реках в марте 2019 г. были близки к среднемноголетним значениям на этот период. Установление ледяного покрова началось после 10 ноября, когда температуры устойчиво перешли к отрицательным значениям (данные взяты по метеостанциям Великий Устюг и Тотьма). Оттепелей практически не было. За месяц толщина льда увеличилась на 10 см (к 20 января), еще через месяц – на 20 см (к 20 февраля). Последний месяц температуры были не очень низкие, а толщина увеличилась по Великому Устюгу еще на 15 см.

Толщина льда на 20 марта достигла в среднем $60-80$ см и оказалась близкой к норме.

Максимальные снегозапасы в 2019 г. составили $90-120\%$ от среднемноголетних.

В апреле за счет положительных среднесуточных температур воздуха в течение месяца наблюдалось разрушение снежного покрова. Высота снега за первую декаду уменьшилась на $10-20$ см. Во второй декаде продолжалось интенсивное снеготаяние: высота снега уменьшилась на $6-24$ см.

Вскрытие р. Сухона произошло в период $11-15$ апреля, что раньше средних многолетних сроков на $6-8$ дней. В районе г. Великий Устюг ледоход начался 15 апреля. Ледоход прошел с заторными остановками до 3 суток. 15 апреля в 9:30 утра ледоход с реки Сухона вышел на реку Северная Двина. Уровни воды в этот период достигли отметок $500-525$ см. На участке Аристово–Нокшино начал формироваться затор льда общей протяженностью 19 км. Для ликвидации затора были проведены взрывные работы, благодаря которым удалось частично разрушить голову затора. После проведенных взрывных работ уровни воды по гидрологическому посту Великий Устюг колебались в пределах $500-600$ см.

17 апреля в 8:00 голова «сухонского» ледохода сохранялась в заторе льда на реке Малая Северная Двина в районе Аристово (5–8 км ниже г. Великий Устюг). Хвост ледохода на реке Сухона находился выше д. Подсосенье (15 км от устья). Подпор уровня воды по р. Сухона распространялся выше г/п Подсосенье. Уровни воды в зоне подпора были ниже неблагоприятных отметок. Ледоход от д. Демьяново сместился ниже г. Красавино. В прошедшую ночь ниже г. Красавино сформировался затор льда (ориентировочно на Ярокурских перекатах, район Бурмасово — Выставка). В ночь с 17 на 18 апреля ледоход подошел к г. Котлас. В связи с обширной полыньей на р. Северная Двина от Котласского ЦБК прохождение ледохода было спокойным и ускоренным. Уровни воды были пониженными.

Обработка и подготовка исходных данных проходила в три этапа:

1. Построение графиков хода уровня р. Сухона по гидрологическому посту д. Каликино и гидрологическому посту г. Великий Устюг, р. Луза по посту д. Красавино и р. Юг по посту с. Кичменгский Городок.

2. Разделение графика хода уровня воды на стоковую и заторную составляющие. Заторная составляющая выделялась по резкому подъему уровня вплоть до его спада. Пример схемы такого деления приведен на рисунке 5.14.

3. Получение расходов воды для каждого из трех гидрологических постов на основе зависимостей $Q=f(H)$. Следует отметить, что для получения расходов воды на основании кривой зависимости использовались уровни стокового генезиса. Кривые зависимости $Q=f(H)$ для каждого из гидрологических постов приведены на рисунке 5.15.

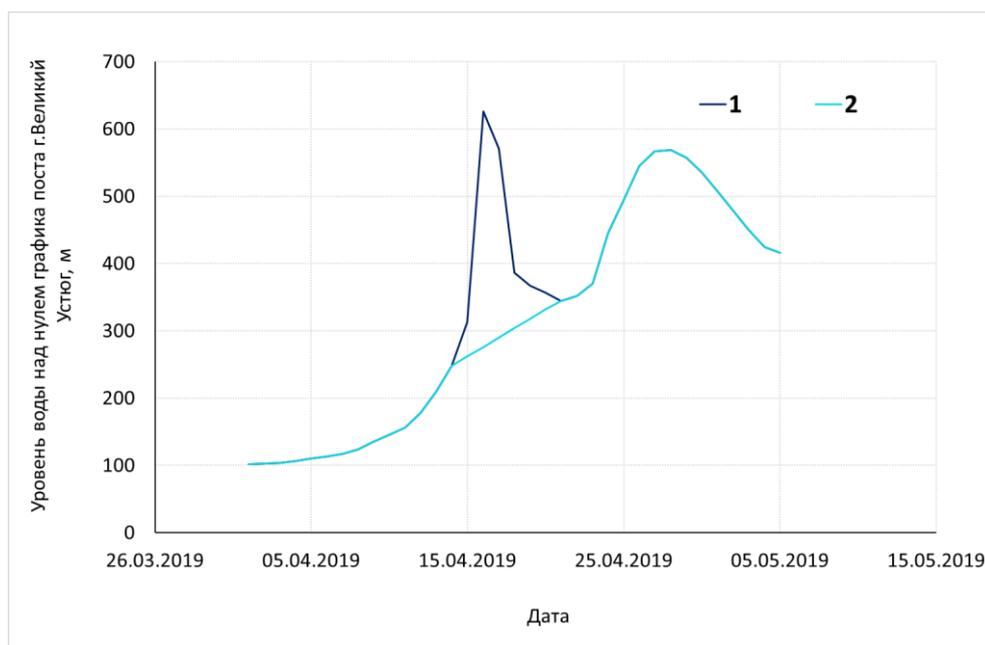
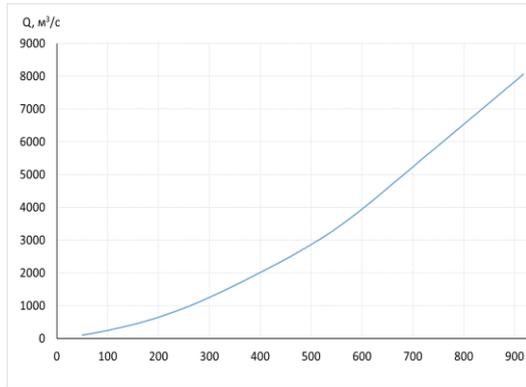
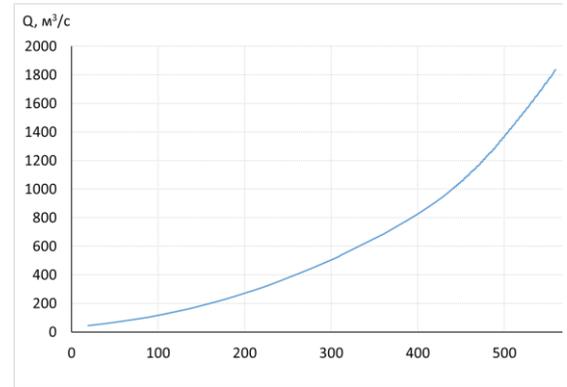


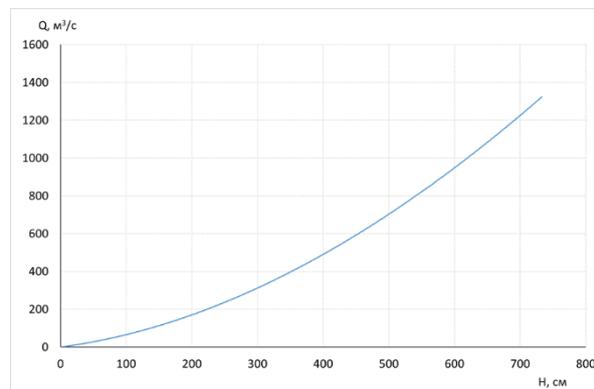
Рисунок 5.14. Расчленение графика хода уровня воды по данным гидрологического поста г. Великий Устюг на заторную (1) и стоковую (2) и составляющие



а)



б)



в)

Рисунок 5.15. Кривая зависимости $Q=f(H)$ для р. Сухона по гидрологическому посту д. Каликино (а), р. Луза по гидрологическому посту д. Красавино (б), р. Юг по гидрологическому посту с. Кичменгский Городок (в)

Из-за отсутствия гидрологического поста в устьевом створе р. Юг использовались данные гидрологического поста на р. Луза в д. Красавино и данные гидрологического поста Кичменгский Городок, расположенного на р. Юг. Расчет расхода воды по р. Юг осложнен тем, что гидрологический пост Кичменгский Городок расположен в 244 км от устья, поэтому был выполнен пересчет расходов воды с помощью модуля стока для гидрологического поста д. Подосиновец, расположенного ниже по течению, в 125 км от него. Так как площадь водосбора р. Юг в створе д. Подосиновец составляет 15 200 км², а в створе с. Кичменгский Городок — 8890 км², т.е. в 1,7 раз больше, то при вычислении расхода воды по гидрологическому посту д. Подосиновец расход по гидрологическому посту с. Кичменгский Городок умножался на 1,7 и смещался на 1 сутки для учета времени добегания воды.

Итоговые результаты расчета значений расхода воды были визуализированы в виде графиков-гидрографов (рисунок 5.16).

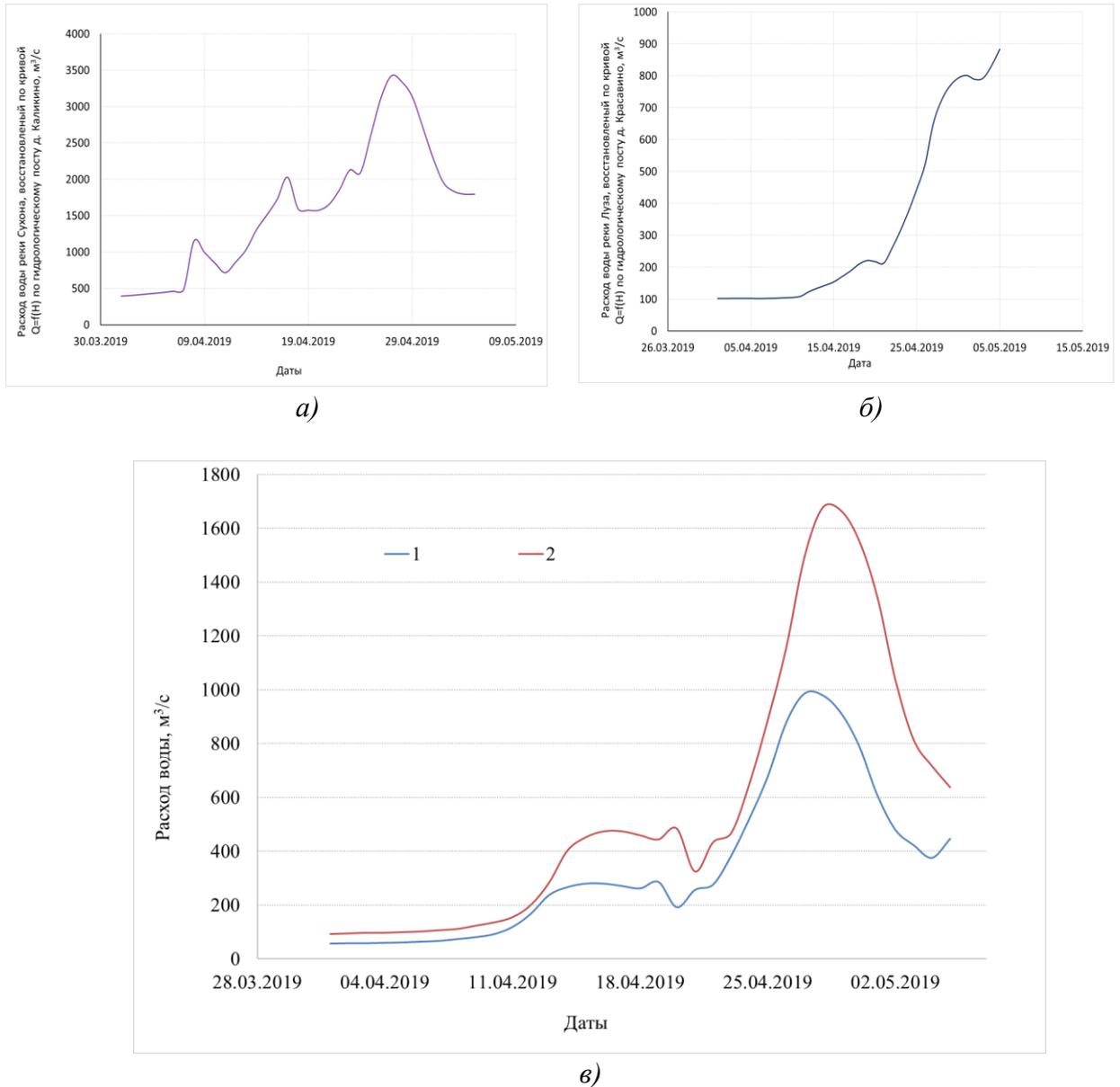


Рисунок 5.16. Гидрограф р. Сухона – д. Каликино (а), р. Луза – гидрологический пост д. Красавино (б), р. Юг по гидрологическому посту с. Кичменгский Городок (1) и по гидрологическому посту д. Подосиновец (2), полученный на основании пересчета расходов воды с гидрологического поста с. Кичменгский Городок (в), за период с 01 апреля по 05 мая 2019 г.

Полученные гидрографы по р. Сухона и по р. Юг использовались в качестве входных данных в двумерную гидродинамическую модель STREAM_2D. На нижней границе, ниже г. Котласа, уровень воды определялся автоматически по зависимости $Q=f(H)$.

На период установления ледового затора, то есть с 15 по 17 апреля, заторное повышение было оценено как среднее, поэтому согласно разработанным параметрам ледового блока STREAM_2D при расчетах был увеличен коэффициент шероховатости на 0,045 и учтено уменьшение средней глубины потока за счет льда на 1,5 м.

Оценка качества работы модели производилась путем сопоставления графика хода уровня воды по гидрологическому посту г. Великий Устюг (рисунок 5.17). Разница между фактическим и рассчитанным уровнем на пике половодья составляет 24,8 см, при этом смоделированный уровень завышен относительно фактических данных. Кроме того, между смоделированным и фактическим пиком половодья существует временной сдвиг в 1 день, согласно фактическим данным максимальный уровень воды был зафиксирован 16 апреля, в то время как согласно модели, он наступил 17 апреля. После затора модель хорошо воспроизводит уровни, и расхождение смоделированных и фактических значений не превышает 27 см. Таким образом, качество модели можно оценить, как хорошее, учитывая неполноту исходных данных. Используя критерий Нэша – Сатклиффа, показывающий соответствие рассчитанных и фактических данных, была произведена статистическая оценка качества моделирования.

Значение критерия составило 0,96, стоит отметить, что результат моделирования можно считать хорошим если $R^2 \geq 0,75$.

Отметим, что заторная составляющая во время половодья 2019 г. согласно модельному расчету составила 2,66 м.

По результатам проведенного моделирования на момент пика половодья, то есть на 17 апреля, была построена карта глубин (рисунок 5.18) и карта скоростей (рисунок 5.19).

На карте глубин видно, что г. Великий Устюг не попадает в зону подтопления, поэтому детальная модель с учетом застройки г. Великий Устюг не подключалась. Максимальная глубина р. Сухоны в районе города составляет 7–7,5 м, что вполне согласуется с данными наблюдений. Максимальная глубина р. Юг, согласно модельным расчетам, составляет 6 м. На левом берегу р. Юг, близ д. Морозовица, максимальная глубина составляет 2 м, на правом берегу р. Малая Северная Двина в районе острова Крушина максимальная глубина составляет 1,5 м, на левом берегу р. Малая Северная Двина в створе пос. Приводино максимальная глубина достигает 2 м.

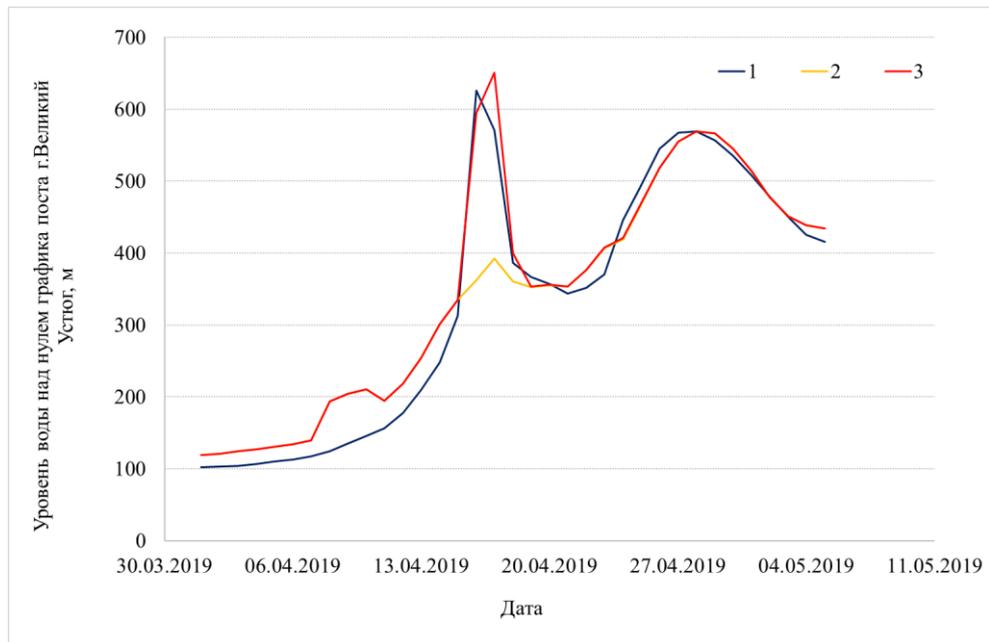


Рисунок 5.17. Фактический уровень (1), рассчитанный уровень без учета ледового затора (2) и рассчитанный уровень с учетом ледового затора (3) по гидрологическому посту г. Великий Устюг

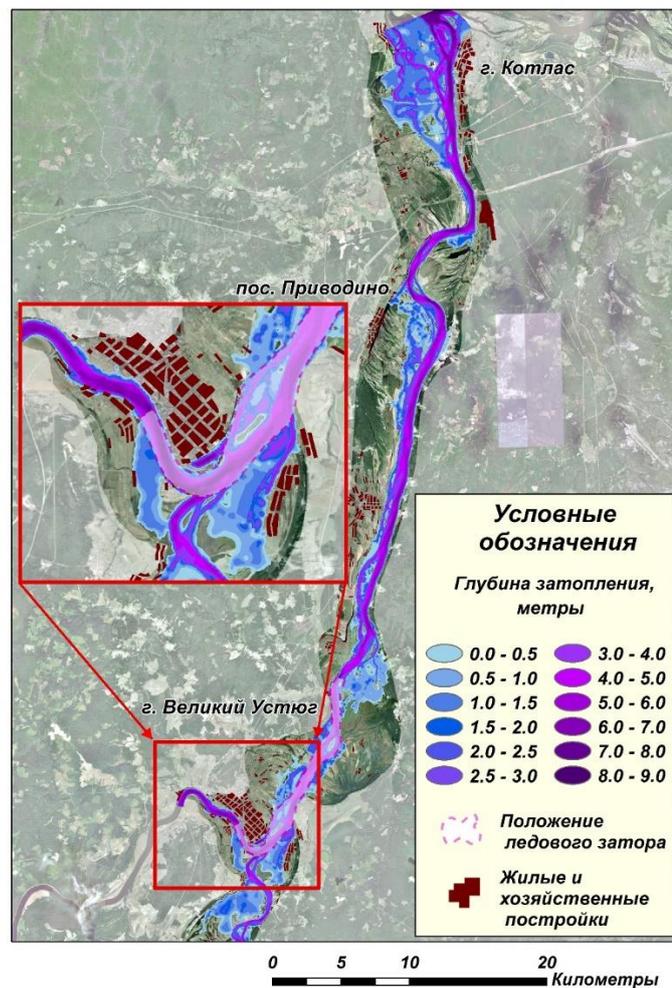


Рисунок 5.18. Карта глубин затопления на 17 апреля 2019 г. (пик половодья)

На карте скоростей течения видно, что своих максимальных значений, более 1,2 м/с, они достигают в местах сужения потока, в том числе в месте расположения ледового затора. В остальном, в пределах меженной границы русла, скорость течения составляет 0,4–0,6 м/с, в некоторых местах увеличиваясь до 0,6–0,8 м/с.

При выходе на пойму, где возрастает коэффициент шероховатости, скорость резко снижается – до 0,2 м/с, а в некоторых местах падает до 0.

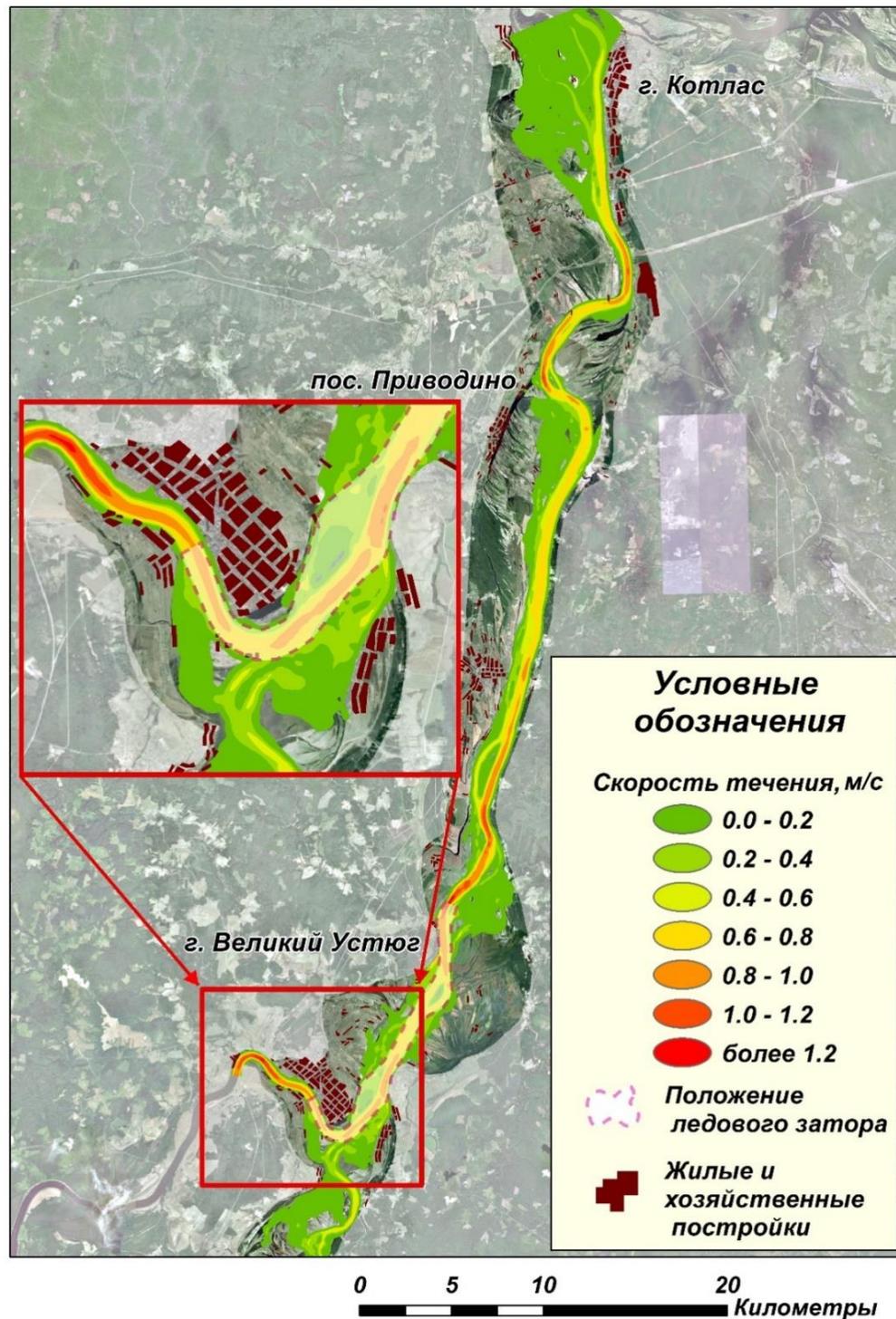


Рисунок 5.19. Карта скорости течения на 17 апреля 2019 г. (пик половодья)

Ежегодно в Великоустюгском районе перед началом ледохода проводятся мероприятия по снижению негативного воздействия вод. В марте 2019 г. в Великоустюгском районе был проведен комплекс работ, направленных на уменьшение прочности льда: были проведены ледорезные работы общей протяженностью почти 200 км, в районе д. Пуртовино на р. Сухона была организована искусственная ледоулавливающая перемычка изо льда, было произведено чернение льда на территории общей площадью более 23 тыс. м².

Все принятые меры в совокупности с профессионализмом работников гидрометслужбы и аварийно-спасательной службы привели к положительному результату: отсутствию жертв и убытков в связи с разрушением жилых и хозяйственных построек.

Как показали результаты тестирования, рабочая версия системы ПРОСТОР, объединяющая в себе различные типы гидрологических моделей, позволяет в автоматическом режиме прогнозировать характеристики потока для участка реки Малая Северная Двина от г. Великого Устюга до г.Котласа в условиях наводнения и может быть внедрена (передана для испытания) в Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды СевУГМС Росгидромета. Для оперативного обеспечения системы прогнозирования гидрологическими данными актуальным является внедрение автоматизированных гидрологических комплексов (АГК) с передачей данных непосредственно в систему.

Заключение

В соответствии с целью данного исследования и сформулированными защищаемыми положениями были сделаны следующие выводы:

1. Анализ исторических материалов и данных режимных наблюдений на посту г. Великий Устюг показал, что все крупнейшие наводнения на исследуемой территории (от наводнения 1742 г. с отметкой уровня более 1000 см над нулем поста до последних наводнений 1998 и 2016 гг.) связаны с формированием ледовых заторов. За период с 1936 по 2018 гг. выявлено 37 случаев заторов с мощностью более 1 м. Таким образом, повторяемость образования заторов составила 43,5%.

2. Проанализированы даты появления льда на р. Сухона, отметки предледоставных уровней, даты установления ледостава, даты первой подвижки льда, даты вскрытия и продолжительность ледохода. Для каждой из величин был определен диапазон ее изменения, а также был проведен соответствующий статистический анализ.

3. На основе численных экспериментов с двумерной гидродинамической моделью STREAM_2D выявлена чувствительность характеристик затопления к изменению коэффициентов шероховатости русел и пойм при условиях открытой воды, наиболее значительно (до 19%) меняется средняя по области моделирования скорость течения, площадь затопления меняется на величину до 6%.

4. Численные эксперименты и моделирование многолетнего ряда половодий за 1980-2016 гг. показали, что для воспроизведения гидродинамической моделью максимальных заторных повышений уровня воды необходимо учитывать два дополнительных параметра - шероховатость льда и уменьшение средней глубины потока за счет толщины льда. С учетом предложенных в зависимости от мощности затора 4-х групп параметров ледового блока модели удалось добиться хорошего соответствия смоделированных и фактических уровней воды по г/п Великий Устюг за весь исследуемый период, критерий соответствия Нэша-Сатклифа для среднесуточных уровней воды за период верификации составил 0,91.

5. Впервые разработана детальная модель затопления г. Великий Устюг с учетом зданий на основе специального алгоритма построения расчетной сетки. На ее основе проведено моделирование наиболее выдающегося заторного наводнения 2016 г., полученная по данным моделирования максимальная площадь затопления территории города - 1,85 км², по сравнению с космическим снимком Landsat 8 расхождение составило 7,5%. В наиболее низко расположенной части города глубина затопления, согласно данным моделирования, составляла 1,5–2,5 м, юго-восточная часть города оказалась отрезанной от

остального города понижением, по которому вода проникает со стороны р. Сухона (Сазонов и др., 2020).

6. На основе разработанной методики совместного использования динамико-стохастической модели “генератора погоды” MSFR_WG, модели формирования стока ECOMAG и гидродинамической модели STREAM_2D смоделированы псевдовременные тысячелетние ряды температуры воздуха, интенсивности осадков и дефицита влажности воздуха, получен гидрограф р. Малая Северная Двина 0.1% обеспеченности и оценены возможные зоны затопления и максимальные уровни воды у г. Великий Устюг.

7. Проведенное сравнение вероятных сценариев затопления показало, что при прохождении максимального расхода 0.1% обеспеченности при отсутствии льда уровень воды значительно (более чем на 1.5 м) ниже максимальных наблюдавшихся заторных уровней. Максимальная отметка уровня воды при одновременном установлении ледового затора и прохождении расхода воды 0,1% обеспеченности согласно результатам моделирования, составила 61,07 м, в таком случае, без строительства защитной дамбы затоплению будет подвержена большая часть города, включая исторический центр.

8. Для оценки эффективности противопаводковых мероприятий проведено моделирование уровней воды стокового и заторного генезиса 1% обеспеченности в случае строительства протяженной и малой дамбы. Анализ смоделированных продольных профилей показал, что за счет подпорного эффекта от дамб отметки водной поверхности при заторном наводнении 1% обеспеченности у гидрологического поста Великий Устюг поднимутся на 1,3 м при длинной дамбе проекта и на 0,7 м при дамбе, защищающей только городскую территорию. Таким образом, полная защита города и прилегающих территорий длинной противопаводковой дамбой невозможна ввиду высокой стоимости сооружений, подпорного эффекта и нарушения исторического облика города.

9. Разработаны подходы к долгосрочному прогнозу ледовых заторов у г. Великий Устюг на основе методов машинного обучения. На основе алгоритма классификации KNN была создана модель предсказания установления затора в районе г. Великий Устюг. Оправдываемость прогноза была проверена на независимом материале за период с 2000 по 2019 г., она составила 85%.

10. Адаптированные для исследуемого участка модель формирования стока, двумерная гидродинамическая модель всего участка и гидродинамическая модель на детальной сетке с учетом зданий; а также полученные для них наборы параметров были использованы при разработке системы ПРОСТОР (Прогнозирование Развития Опасных Ситуаций на Территории в Оперативном Режиме), созданной в рамках проекта РНФ № 17-11-01254 силами СПИИРАН, кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ

имени М.В. Ломоносова и ИВП РАН. Система ПРОСТОР полностью автоматизирована, каждый час она формирует оперативный прогноз зоны затопления на 24 час., в том числе для затороопасных участков рек. Работоспособность комплекса была успешно апробирована в условиях ограниченности исходных данных на примере половодья 2019 г., а также при тестовых расчетах для выдающегося наводнения 2016 г.

Список литературы

Абросимов, А.В. Возможности практического использования данных ДДЗ из космоса для мониторинга водных объектов / А.В. Абросимов, Б.А. Дворкин // Геоматика. – 2009. – №4. – С.54-63.

Авакян, А.Б. Наводнения: проблемы определения ущербов и защиты / А.Б. Авакян, А.А. Полюшкин // Водные ресурсы. – 1991. – №4. – С. 114-125.

Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 09.02.2021)

Агафонова С.А. Затопы и заборы на реках Арктической зоны России / С. А. Агафонова, Л. С Банщикова // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Т. 1. — ПГНИУ Пермь, 2019. — С. 32–36.

Агафонова, С.А. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках арктической зоны европейской территории России / С. А. Агафонова, Н. Л. Фролова, А. Н. Василенко, В. А. Широкова // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2016. — № 6. — С. 41–48.

Агафонова, С.А. Мониторинг ледовой обстановки на реках в районе г. Великий Устюг с использованием радиолокационных и оптических снимков / С.А. Агафонова, П.Г. Михайлюкова, Н.Л. Фролова // Труды II Всероссийской конференции Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития. – Санкт-Петербург, 2018. – С. 37-40.

Агафонова, С.А. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины / С.А. Агафонова, Н.Л. Фролова // Водные ресурсы. – 2007. – Т. 34, № 2. – С. 141–149.

Агафонова, С.А. Современные особенности морфологии русла и процессов заторообразования на реке Томь / С. А. Агафонова, К. М. Беркович, С. Н. Рулева, В.В. Сурков, Н.Л. Фролова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2012. – № 6. – С. 21–33.

Агафонова, С.А. Факторы образования ледовых затопов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях/ С. А. Агафонова, А. Н. Василенко, Н. Л. Фролова // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2016. — № 2. — С. 82–90.

Алабян, А.М. Генетический анализ причин весеннего затопления долины Малой Северной Двины в районе г. Великого Устюга / А.М. Алабян, Н.И. Алексеевский, Л.С. Евсева, В.А. Жук, В.В. Иванов, В.В. Сурков, Н.Л. Фролова, Р.С. Чалов, А.В. Чернов // Эрозия почв и русловые процессы, 2004. – Т. 14. – С. 104–130.

Алексеевский, Н.И. Механизмы изменения уровней воды в реках / Н.И. Алексеевский, А.Г. Ободовский, М.А. Самохин // Эрозионные и русловые процессы. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – Вып. 4. – С.216-237.

Алексеевский, Н.И. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования. / Н.И. Алексеевский, Н.Л. Фролова, А.В. Христофоров // Географический ф-т МГУ, 2011. – 367 с.

Алексеевский, Н.И. Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6-7 июля 2012 г / Н. И. Алексеевский, И. Н. Крыленко, В. В. Беликов, В.В. Кочетков, С.В. Норин // Гидротехническое строительство. — 2014. — № 3. — С. 29–35.

Алексюк, А.И. Программный комплекс STREAM 2D CUDA для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в открытых потоках с использованием технологии CUDA (на графических процессорах NVIDIA) / А.И. Алексюк, В.В. Беликов // Роспатент, Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2017660266. – 2017.

Антонов, В.С. Низовье и устье реки Оби / В.С. Антонов, Н.Г. Маслаева. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 235 с.

Антохина, Е.Н. Водный режим рек Европейской территории России и его изучение на основе модели формирования стока: диссертация на соискание степени кандидата географических наук: 25.00.27 / Е.Н. Антохина // Москва, 2012. - 219 с.

Антохина, Е.Н. Применение ИМК ECOMAG для моделирования стока воды с различных по площади водосборов / Е.Н. Антохина, В.А. Жук // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2011. — № 4. — С. 17–32.

Бабенко, К.И. Основы численного анализа / К.И. Бабенко. – М.: Наука, 1986. – 744 с.

Банщикова, Л.С. Мониторинг процесса заторообразования на реках по пространственно-временным графикам уровня воды / Л.С. Банщикова // Метеорология и гидрология. – 2008. – № 9. – С. 87–93.

Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков, Н.В. Шабанов. – М.: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.

Барышников, Н.Б. Руководство к лабораторным работам по динамике русловых потоков и русловым процессам : [Учеб. пособие для вузов по спец. "Гидрология суши"] / Н. Б. Барышников. - Л. : Гидрометеиздат, 1991. – 223 с.

Беликов, В.В. Двуслойная математическая модель катастрофических паводков / В.В. Беликов, А.Н. Милитеев // В сб. "Вычислительные технологии". – Новосибирск, 1992. – Т. 1, №3. – С. 167–174.

Беликов, В.В. Компьютерная гидравлическая модель речного бассейна – основа определения ущербов народному хозяйству от наводнений / В.В. Беликов, А.Н.Милитеев, А.М. Прудовский, В.Б. Родионов // Безопасность энергетических сооружений. – М., 2003. – Вып.11. – С. 132–147.

Беликов, В.В. Программный комплекс для расчета течений, деформаций дна и переноса загрязнений в протяженной и разветвленной системе русел (RIVER_1D) / В.В. Беликов., В.В. Кочетков // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2014612182. — М., 2014.

Беликов, В.В. Совершенствование методов и технологий прикладного численного моделирования в гидравлике открытых потоков: диссертация на соискание степени д-ра технических наук / В.В. Беликов // Москва, 2005. - 373 с.

Бернадский, Н.М. Речная гидравлика, ее теория и методология / Н. М. Бернадский // НКТП СССР-Главэнерго. Труды Науч.-иссл.ин-та гидротехники. – Л., М.: Гос. энергетич. изд-во, 1933. – 148 с.

Борисенков, Е.П. Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы / Е.П. Борисенков, В.М. Пасецкий. – М.: Мысль, 1988. – 524 с.

Борщ, С.В. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний / С. В. Борщ, А. Н. Гельфан, В. М. Морейдо, Ю.Г. Мотовилов, Ю.А. Симонов // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. — 2017. — № 366. — С. 68–86.

Бугаец, А.Н. Автоматизированная информационная система гидрологического мониторинга и управления данными / А.Н. Бугаец, Л.В. Гончуков, О.В. Соколов, Б.И. Гарцман, С.М. Краснопеев // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 3. – С. 103-113.

Бузин, В.А. Зависимости для прогнозов максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины и влияние на них климатических и антропогенных факторов / В.А. Бузин, Н.И. Горошкова, А.В. Стриженок, Д.А. Палкина // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – № 36. – С. 12–21.

Бузин, В.А. Зажоры и заторы льда на реках России / В.А. Бузин. – СПб.: Изд-во Государственного гидрологического института, 2015. - 240 с.

Бузин, В.А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. / В.А. Бузин. – СПб.: Гидрометеиздат, 2004. – 203 с.

Бузин, В.А. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах: монография / В.А. Бузин, А.Т. Зиновьев // Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс», 2009. - 168 с.

Бузин, В.А. Опасные гидрологические явления: учебное пособие – СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 228 с.

Булатов, С.Н. Расчет прочности тающего ледяного покрова и начала ветрового дрейфа льда / С.Н. Булатов. – Труды ГМЦ СССР, 1970. – Вып. 74. – 111 с.

Бураков, Д.А. Результаты испытаний автоматизированной технологии прогноза ежедневных и максимальных уровней воды на средней Оби и нижнем Иртыше / Д.А. Бураков, Н.П. Волковская // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. – 2019. – № 46. – С. 64-70.

Винников, С.Д. Гидравлический метод оценки заторных масс льда в речных потоках / С.Д.Винников // Метеорология и гидрология. – 1978. – № 6. – С. 62-70.

Виноградов, Ю. Б. Математическое моделирование в гидрологии: учебное пособие / Ю.Б. Виноградов, Т. А. Виноградова – М.: Академия, 2010. – 304 с.

Вуглинский, В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях / В.С. Вуглинский // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2014. – № 3. – С. 32-45.

Гельфан, А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока / А.Н. Гельфан. – М.: Наука, 2007. – 294 с.

Гельфан, А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России / А.Н. Гельфан, В.М. Морейдо // Лед и снег. – 2014. – Т. 54 № 2. – С. 44–52. doi:10.15356/2076-6734-2014-2-44-52

Гельфан, А.Н. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования / А.Н. Гельфан, В.М. Морейдо // Лед и снег. – 2015. – Т. 55, № 4. – С. 61–72. doi:10.15356/2076-6734-2015-4-61-72

Георгиевский, М.В. Условия формирования и полевые исследования ледового затора, послужившего причиной наводнения на р. Сухона у г. Великий Устюг весной 2016 / М.В. Георгиевский, Н.И. Горошкова, О.Ф. Голованов, Д.В. Георгиевский, В.С. Полякова, Е.Н. Скрипник // Геориск. – 2017. – №4. – С. 40-49.

Георгиевский, М.В. Экстремальное заторное наводнение весной 2016 г. на реке Сухона у г. Великий Устюг (формирование, прогноз, последствия) / М.В. Георгиевский, Н.И. Горошкова, В.С. Полякова, О.Ф. Голованов, Д.В. Георгиевский // Метеорология и гидрология. – 2018. – №2. – С. 108–114.

Гинзбург, Б.М. Краткий обзор методов долгосрочных прогнозов вскрытия и замерзания рек / Б.М. Гинзбург // Труды ЦИП, 1959. – Вып. 90. – С. 3-24.

Гинзбург, Б.М. Многолетняя изменчивость сроков ледовых явлений на реках как индикатор колебаний климата переходных сезонов / Б.М. Гинзбург, И.И. Солдатова // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 11. – С. 99-107.

ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-19179-73> (дата обращения: 09.02.2021)

ГОСТ Р 22.1.01-95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Основные положения. [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200001515> (дата обращения: 09.02.2021)

ГОСТ Р 22.1.08-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование опасных гидрологических явлений и процессов. Общие требования. [Электронный ресурс] – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200003993> (дата обращения: 09.02.2021)

Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов российской федерации в 2017 году». М.: НИА-Природа, 2018. – 298 с.

Григорьев, В.Ю. Оценка влияния изменения климатических параметров на сток рек бассейна Байкала во второй половине XX - начале XXI вв / В. Ю. Григорьев, Т. Д. Миллионщикова, А. А. Сазонов, С. Р. Чалов // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2020. — № 5. — С. 3–11.

Гундров, Д.С. Автоматизированная Система мониторинга и прогнозирования паводковой обстановки на водных объектах Краснодарского края и перспективы ее развития / Д.С. Гундров // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. – 2018. – №9. – С.200-203.

Дебольская, Е.И Математическое моделирование деформаций русла в нижних бьефах ГЭС, расположенных в криолитозоне, при катастрофических наводнениях / Е.И. Дебольская, О.Я. Масликова, А.Ю. Исаенков // Природообустройство. – 2010. – №3. – С. 51-58.

Добровольский, С.Г. Наводнения мира / С.Г. Добровольский, М.Н. Истомина. – М.: ГЕОС, 2006. – 256 с.

Доброумов, Б.М. Наводнения на реках России: их формирование и районирование / Б.М. Доброумов, С.М. Тумановская // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 12. – С. 70-78.

Донченко, Р.В. Ледовый режим рек СССР / Р.В. Донченко // Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.

Евтушенко, Н.В. Половодье на реках России: мониторинг из космоса / Н.В. Евтушенко, Н.А. Филимонова, Е.Н. Скрипник // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. – 2009. – № 2. – С. 34-38.

Железняков, Г.В. Точность гидрологических измерений и расчетов / Г.В. Железняков, Б.Б. Данилевич. – Л.: Гидрометеиздат, 1966. – 240 с.

Жук, В.А. Катастрофические наводнения на р. Сухона в районе г. Великий Устюг: причины, прогнозирование, возможность защиты / В.А. Жук, Н.Л. Фролова, В.А. Широкова // Доклады VI Всероссийского гидрологического съезда. 28-сентября - 1 октября 2004 г. Санкт Петербург. Секция 2. Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – С. 218–222.

Жук, В.А. Моделирование процессов затопления при наводнениях на реке Северная Двина / В.А. Жук, Н.И. Алексеевский, Н.Л. Фролова, В.А. Широкова // Ледовые и термические процессы на водных объектах России: труды всероссийской конференции. – Архангельск, северное УГМС, 2007. – С. 67–70.

Жук, В.А. Прогнозирование зон затопления в районе г. Великий Устюг в период весеннего половодья / В.А. Жук, И.Н. Крыленко, В.О. Полянин // Материалы IV научно-практической конференции "Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций". – М.: МТП-инвест, 2005. – С. 203–214.

Завьялов, Ю.С. Методы сплайн-функций / Ю.С. Завьялов, Б.И. Квасов, В.Л. Мирошниченко. — М.: Наука, 1980. – 352 с.

Зеленцов, В.А. Опыт создания и тестирования региональной системы мониторинга и анализа гидрологической обстановки на примере участка реки Северная Двина / В.А. Зеленцов, И.Ю. Пиманов, С.А. Потрясаев, А.Е. Семенов, А.М. Алабян, И.Н. Крыленко // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской конференции и выставки изыскательских организаций. – М.: ООО "Геомаркетинг", 2018. – Т. 1. – С. 207–214.

Ильина, Л.Л. Реки Севера / Л.Л. Ильина, А.К. Грахов. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 128 с.

Ильков, А.В. Системный анализ факторов заторообразования на реках севера европейской части России / А.В. Ильков, Р.Л. Белоусов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2015. – №3 (26). – С. 64-73.

Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России — [Электронный ресурс]. – URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 09.02.2021)

Каинова, С.А. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины и их влияние на нарушение гидроэкологической безопасности территории / С. А. Каинова, Н. Л. Фролова // Безопасность энергетических сооружений. — Т. 12. — 2004. — С. 250–263.

Каинова, С.А. Формирование максимальных заторных уровней воды р.Сухоны у г.Великий Устюг и возможности их долгосрочного и краткосрочного прогнозирования / С.А. Каинова, Н.Л. Фролова // Первая общероссийская научно-техническая конференция Вузовская наука – региону. — Вологда, 2003. — С. 271–274.

Калинин, В.Г. Изменения сроков ледообразования на реках и критерии оценки их статистической значимости / В.Г. Калинин, В.В. Чичагов // Метеорология и гидрология. — 2019. — №9. — С. 52-65.

Калинин, В.Г. Исследование распространения заторов льда и их повторяемости на реках водосбора Воткинского водохранилища / В.Г. Калинин // Метеорология и гидрология. — 2008. — № 12. — С. 96-101.

Калинин, В.Г. Оценка пространственно-временной динамики толщины ледяного покрова на реках водосбора Воткинского водохранилища / В.Г. Калинин // Географический вестник. — 2009. — № 1. — С. 5-9.

Карлин, Л.Н. Гидрометеорологические риски: монография / Л.Н. Карлин, Р.Е. Ванкевич, С.М. Тумановская, Е.С. Андреева, Ю.В. Ефимова, О.В. Хаймина, К.А. Клеванный, Г.Т. Фрумин, Т.Р. Еремина, А.А. Ершова // СПб.: Изд-во РГТМУ, 2008. - 282 с.

Католиков, В.М. Новая стратегия защиты от заторных наводнений / В.М. Католиков, Н.И. Католикова // Труды Всероссийской конференции к 70-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки, доктора физико-математических наук, профессора Льва Николаевича Карлина, 2017. — С. 249-253

Кичигина, Н.В. Районирование Восточной Сибири по опасности наводнений / Н.В. Кичигина, Л.М. Корытный // География и природные ресурсы. — 1997. — №3. — С. 50–60.

Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические исследования динамики географических явлений / Ю.Ф. Книжников, В.И. Кравцова. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. — 206 с.

Козлов, Д.В. Многомерный анализ данных при оценке факторов заторообразования в речных бассейнах / Козлов Д.В., Кулешов С.Л. // Водные ресурсы. - 2019. - Т. 46. - №2. - С. 132-141. doi: 10.31857/S0321-0596462132-141

Козлов, Д.В. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России / Д.В.Козлов, В.А. Бузин, Н.Л. Фролова, С.А. Агафонова, Бабурин В.Л., Банщикова Л.С., Горошкова Н.И., Завадский А.С., Крыленко И.Н., Савельев К.Л., К.Д. Козлов, Л.Ф. Бузина — РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева Москва, 2015. — 348 с.

Коновалов, И.М. Заторы льда на рр. Сухоне и Северной Двине, мероприятия по предупреждению и борьба с ними / И.М. Коновалов, В.В. Баланин, Р.И. Щербакова // Труды ЛИВТа, 1962. – Вып. XXX. – С.46–55.

Корень, В.И. Математические модели в прогнозах речного стока / В.И. Корень – Л.: Гидрометеиздат, 1991. - 200с.

Коронкевич, Н.И. Наиболее опасные проявления экстремальных гидрологических ситуаций на территории России / Коронкевич Н. И., Барабанова Е. А., Зайцева И. С. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. — 2010. — № 6. — С. 40–47.

Коронкевич, Н.И. Экстремальные гидрологические ситуации в мире и в России / Н. И. Коронкевич, Е. А. Барабанова, С. В. Долгов, И. С. Зайцева // Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. Вестник Брестского государственного технического университета. — 2014. — Т. 2, № 86. — С. 104–109.

Кравцова, В.И. Космические методы изучения природной среды. Современный фонд космических снимков / В.И. Кравцова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. – 206 с.

Кравцова, В.И. Материалы космических съемок и их использование в географических исследованиях / В.И. Кравцова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 98 с.

Крыленко, И.Н. Исследование подпорных явлений в узле слияния рек Сухоны и Юга на основе компьютерного моделирования / И.Н. Крыленко // Вестник Московского университета. – 2009. – Сер. 5. – № 1. – С. 53–58.

Крыленко, И.Н. Математическое моделирование взаимодействия в паводки водных потоков в узле слияния рек Сухоны и Юга / И.Н. Крыленко // Безопасность энергетических сооружений. – 2003. – Т. 11. – С. 175–185.

Крыленко, И.Н. Оценка генетических составляющих уровней воды / И.Н. Крыленко, А.А. Сазонов, С.А. Агафонова // Труды конференции Всероссийской конференции Гидрометеорология и экология: научные и образовательные достижения и перспективы развития. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 288–292.

Кулешов, С.Л. Анализ влияния морфометрии русла на частоту образования весенних заторов льда в пределах речного бассейна / С.Л. Кулешов, Д.В. Козлов // Природообустройство. - 2017. - № 5. - С. 15-19.

Кучмент, Л.С. Математическое моделирование речного стока: монография / Л.С. Кучмент // Л.: Гидрометеиздат, 1972 – 191 с.

Кучмент, Л.С. Моделирование гидрологического цикла речных водосборов: монография / Л.С. Кучмент, Е.Л. Музылев // Национальный геофизический комитет, 1993 – 285 с.

Кучмент, Л.С. Применение физико-математических моделей формирования речного стока для оценки степени опасности катастрофических наводнений / Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан, В.Н. Демидов, Ю.Г. Мотовилов, В.Ю. Смахтин, Н.А. Назаров // Метеорология и гидрология. – 1994. — № 4. — С. 93–100.

Кучмент, Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление): монография / Л.С. Кучмент // М.: Изд-во ИВП РАН, 2008 – 394 с.

Кюнж, Ж.А. Численные методы в задачах речной гидравлики: Практ. применение / Ж. А. Кюнж, Ф. М. Холли, А. Вервей; Перевод с англ. Ю. В. Абрамова и Е. И. Масса. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 255 с.

Лаврова, О.Ю. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О.Ю. Лаврова, А.Г. Костяной, С.А. Лебедев, М.И. Митягина, А.И. Гинзбург, Н.А. Шеремет. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 480 с

Леви, И.И. Зимний режим рек: Конспект лекций по III ч. курса инженерной гидрологии / И.И. Леви. - Ленингр. политехн. ин-т им. М. И. Калинина, 1958. - 36 с.

Лупачев, Ю.В. Опыт космического мониторинга развития весеннего половодья на реке Северная Двина в 2010 г / Ю.В. Лупачев, Е.Н. Скрипник, А.А. Кучейко // Земля из космоса: наиболее эффективные решения. – 2010. – № 6. - С. 57-68.

Ляхтер, В.М. Гидравлическое моделирование / В.М. Ляхтер, А.М. Прудовский. – М.: Энергия, 1984. – 392 с.

Малыгин, И. В. Методика прогноза образования ледовых заторов на реках на основе теории распознавания образов / И.В. Малыгин // Вестник Московского университета. Серия 5: География. — 2014. — № 3. — С. 43–47.

Материалы по обоснованию выполнения работ по строительству объекта капитального строительства «Комплекс мероприятий по защите г. Великий Устюг, включающий строительство противопаводковой дамбы на р. Северная Двина» / Комитет градостроительства и архитектуры Вологодской области. – 2016. – 54 с.

МГЭИК. Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата МГЭИК. – Женева, 2014. – 163 с.

Морейдо, В.М. Разработка методов ансамблевого прогноза характеристик сезонного речного стока (на примере притока воды в Чебоксарское водохранилище): диссертация на соискание степени кандидата географических наук: 25.00.27 / В.М. Морейдо // Москва, 2015. – 185 с.

Мотовилов, Ю.Г. Автоматизированная информационно-управляющая система (АИУС) «Водные ресурсы». / Ю.Г. Мотовилов, Е.С. Дмитриев, С.Е. Беднарук, С.В.

Герасимов, В.М. Угоров // в сб. «Водные ресурсы. Проблемы и пути их решения». – Йошкар-Ола, 2003. – с.17-40.

Мотовилов, Ю.Г. Информационно-моделирующий комплекс ЕСОМАГ для моделирования речных бассейнов / Ю.Г. Мотовилов // VI Всероссийский гидрологический съезд: тезисы докл. – СПб, 2004. – С. 139.

Мотовилов, Ю.Г. Краткосрочный прогноз притока воды в Бурейское водохранилище на основе модели ЕСОМАГ с использованием метеорологических прогнозов / Ю. Г. Мотовилов, В. В. Балыбердин, Б. И. Гарцман и др. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2017. — № 1. — С. 78–102. doi: 10.35567/1999-4508-2017-1-6

Мотовилов, Ю.Г. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов / Ю.Г. Мотовилов, А.Н. Гельфан. – М.: Изд. Российской академии наук, 2018. – 300 с.

Научно-популярная энциклопедия Вода России [Электронный ресурс]. – URL: <https://water-rf.ru/> (дата обращения: 09.02.2021)

Нежиховский, Р. А., Прогнозы максимальных заторных уровней воды рек Северной Двины и Немана / Р. А. Нежиховский, Н. П. Саковская— Л. Гидрометеиздат Труды ГГИ – 1975. – вып. 227 – С. 70-86.

Нежиховский, Р.А. Наводнения на реках и озерах / Р.А. Нежиховский. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 183 с.

Никитина Н.А. Руслые процессы в узлах слияния рек: Автореф. дис. канд. геогр. наук. / Н.А. Никитина. – Москва, 1989. – 20 с.

Норин, С. В. Моделирование движения паводковых волн по селитебным территориям / С.В. Норин, В.В. Беликов, А.И. Алексюк // Гидротехническое строительство. — 2016. — № 12. — С. 15–21.

Отчет о научно-исследовательской работе. Исследование водного режима и русловых процессов реки Северная Двина на участке от города Великий Устюг до города Котлас и разработка научно обоснованных рекомендаций по предотвращению вредного воздействия вод» / М.: Географический ф-т МГУ, 2013. – 283 с.

Полное собрание русских летописей. Т. 37. Устюжские и Вологодские летописи XVI-XVIII вв. – Л.: Наука, 1982. – 234 с.

Попов, В.П. Исследование заторов льда в устьевой области Северной Двины с целью их предсказания / В.П. Попов – Изд. Сев. упр. Госкомгидромета, Архангельск, 1980. – 122 с.

Приказ МЧС РФ и Минэнерго РФ от 29 декабря 2003 г. № 776/508 «Об утверждении Методики определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью

физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварий гидротехнических сооружений предприятий топливно-энергетического комплекса»

Разработка и внедрение в практику ситуационного управления водным фондом математической модели формирования поверхностного стока с водосборных территорий в бассейне р. Волга (модель ЕСОМАГ) // Научно-технический отчет по НИР / Министерство природных ресурсов РФ, Государственный институт прикладной экологии, рук. Ю.Г. Мотовилов. – М., 2002. – 62 с.

РД 52.04.563-2002. Руководящий документ. Инструкция. Критерии опасных гидрометеорологических явлений и порядок подачи штормового сообщения. – СПб.: Гидрометеоздат, 2002. 27 с.

Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: материалы II Междунар. науч. конференция, 22–25 сентября 2015, г. Красноярск / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. М. В. Носков. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 365 с.

Ромасько, В.Ю. Использование данных ДЗЗ из космоса для мониторинга ЧС в паводкоопасный период / В.Ю. Ромасько, А.Н. Борисевич, С.И. Миськив, В.В. Иванов // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. – 2010. – № 4. – С. 36–43.

Румянцев, А.Б. Интегральный подход к оценке и минимизации рисков затопления селитебных территорий / А.Б. Румянцев, Е.С. Васильева, В.В. Беликов // Всероссийская научная конференция Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения Сборник научных трудов. — Москва: Студия Ф1, 2019. — С. 253–258.

Сазонов, А.А. Катастрофические наводнения на севере Европейской части России: анализ, моделирование и прогноз / А.А. Сазонов, И.Н. Крыленко, Е.В. Завьялова, Н.К. Семенова, Е.В. Чурюлин // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения. Сборник научных трудов. — Студия Ф1 Москва, 2019. — С. 259–263.

Сазонов, А. А. Анализ чувствительности двумерной гидродинамической модели к изменению коэффициента шероховатости / А.А. Сазонов, И.Н. Крыленко // Международная научно-практическая конференция Третьи Виноградовские Чтения. Грани гидрологии памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова (28-30 марта 2018 г., Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия). — Санкт-Петербург, 2018. — С. 933–938.

Сазонов, А.А. История наводнений в городе Великий Устюг / Сазонов А. А., Савенкова В. М. // Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова. Годич. научн. конф. – Т. 1. – УРСС Москва, 2013. – С. 116–119.

Сазонов, А.А. Моделирование характеристик затопления в узле слияния рек Сухона и Юг при прохождении расхода воды малой обеспеченности / А.А. Сазонов, И.Н. Крыленко,

Н.К. Семенова, А.Н. Амербаев // Труды VII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2018)». – ООО ПолиПРЕСС Тверь, 2019. – Т. 1. – С. 172–179

Сазонов, А.А. Оценка эффективности противопаводковых дамб с помощью методов математического моделирования (на примере реки Томь у города Междуреченска) / А.А. Сазонов, П.П. Головлев, И.Н. Крыленко // Природообустройство. – 2015. – № 4. – С. 73–76.

Сванидзе, Г.Г. Математическое моделирование гидрологических рядов / Г.Г. Сванидзе. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 296 с.

Сванидзе, Г.Г. Основы расчета регулирования речного стока методом Монте-Карло / Г.Г. Сванидзе. – Тбилиси: Мецниереба, 1964. – 272 с.

Северное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.sevmeteo.ru/company/index.php> (дата обращения 09.02.2021)

Семенов, В.А. Климатически обусловленные изменения опасных наводнений, паводков и маловодий в крупных речных бассейнах России / В.А. Семенов // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения. – Барнаул, 2009. – С. 194–203.

Семенов, В.А. Районирование территории России по опасности высоких наводнений в связи с изменениями климата и улучшение информационного обеспечения о наводнениях / В.А. Семенова, А.А. Коршунов // ЭКВАТЭК 2008: Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях. – М., 2008. – С.142–145.

Семенова, Н. К. Прогнозирование возможности образования заторов льда с помощью методов машинного обучения / Н.К. Семенова, А. А. Сазонов, И. Н. Крыленко // Четвертые виноградские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. — Санкт-Петербург, 2020. — С. 358–361.

Семенова, Н.К. Оценка вероятности возникновения ледового затора на основании knp-метода на примере реки Северная Двина / Н.К. Семенова, А.А. Сазонов, А.Н. Амербаев // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2019)». — ПолиПРЕСС Тверь, 2020. — Т. 1. — С. 277–280.

Сидоренко, С.В. Спутниковый мониторинг паводка на реке Томь / С.В. Сидоренко, А.Д. Романцов // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. — 2010. — № 6. — С. 70–77.

Софер, М.Г. Об условиях прорыва заторов льда на р.Малой Северной Двине в районе г. Котласа / М.Г. Софер // Изв. Всесоюзн. Географ. Об-ва. – 1967. – Т. 99. – Вып. 3. – С. 239-240.

СП 42.13330.2016 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89* (Приказ Минстроя России от 30 декабря 2016 г. № 1034/пр).

СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003 (с Изменением N 1) (утв. приказом Министерства регионального развития РФ от 29.12.2011 г. N 623).

Срибный, М.Ф. Формула средней скорости течения рек и их гидравлическая классификация по сопротивлению движения / М.Ф. Срибный // В сб.: Исследования и комплексное использование водных ресурсов. – М.: АН СССР, 1960. – С. 204–220.

Таратунин, А.А. Наводнения на территории Российской Федерации. / А.А. Таратунин; под ред. Н. И. Коронкевича // Екатеринбург: Изд-во ФГУП РосНИИВХ, 2008. – 432 с.

Трофимов, Н.А. О проблеме удлинения рядов наблюдений за ледовым режимом рек / Н.А. Трофимов, В.Г. Калинин // Метеорология и гидрология. – 2004. – №5. – С. 96-100.

Фролова, Н.Л. Затонное наводнение на р. Сухона в районе г. Великий Устюг 2016 г / Н. Л. Фролова, С. А. Агафонова, И. Н. Крыленко, А. А. Сазонов // Труды V всероссийской конференции Ледовые и термические процессы на водных объектах России. — Москва, 2016. — С. 434–440.

Фролова, Н.Л. Оценка опасности гидрологических явлений в период прохождения половодья и формирования затонров льда в пределах освоенных участков / Н.Л. Фролова, С.А. Агафонова, В.Л. Бабурин, А.С. Завадский, И.Н. Крыленко, П.Н. Терский // Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. VIII Международная научно-практическая конференция (Москва, РУДН, 24-27 ноября 2014 г.). — Москва, 2014. — Т. 1. — С. 563–579.

Христофоров, А.В. Надежность расчетов речного стока / А.В. Христофоров. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 165 с.

Чалов, Р.С., Русловые процессы и водные пути на реках бассейна Северной Двины / Р.С. Чалов, Л.С. Первушин, В.Г. Шмыков, А.С. Вильперт, А.С. Завадский, В.В. Иванов, Н.М. Михайлова, Л.Н. Никитина, С.Н. Рулева, А.В. Чернов, С.Н. Агафонова, Б.В. Белый, В.Р. Беляев, И.Н. Каргаполова, А.Н. Кичигин, П.Н. Резников, В.В. Сурков, Н.Л. Фролова, С.Р. Чалов. – М.: ООО "Журнал РТ", 2012. – 492 с.

Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов / В.Т. Чоу. – М.: Стройиздат, 1969. – 464 с.

Шаночкин, С.В. Методика прогноза максимальных затонров уровней и продолжительности стояния затонра у г. Великий Устюг / С.В. Шаночкин, В.М. Сакович // Сборник статей по материалам XIII международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы современной науки», 2018. – С. 196-200.

Крыленко, И.Н. Водный режим и гидрологическая безопасность освоенных участков рек: диссертация на соискание степени кандидата географических наук: 25.00.27 / И.Н. Крыленко // Москва, 2007. - 183 с.

Приказ об утверждении методики определения размера вреда, который может быть причинен жизни, здоровью физических лиц, имуществу физических и юридических лиц в результате аварии гидротехнического сооружения (за исключением судоходных и портовых гидротехнических сооружений) от 10 декабря 2020 года N 516 — [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/573191717> (дата обращения 09.02.2021)

Agafonova, S. A. Dangerous ice phenomena on the lowland rivers of European Russia / S.A. Agafonova, N.L. Frolova, I.N. Krylenko, A.A. Sazonov, P.P. Golovlyov // *Natural Hazards*. – 2017. – Vol. 88, № S1. – P. 171–188. doi: 10.1007/s11069-016-2580-x

Agafonova, S. A. Modern characteristics of the ice regime of Russian arctic rivers and their possible changes in the 21st century / S. A. Agafonova, N. A. Frolova, G. V. Surkova, K. P. Koltermann // *GEOGRAPHY, ENVIRONMENT, SUSTAINABILITY*. — 2017. — Vol. 10, no. 4. — P. 4–15.

Alabyan, A.M. Development of intelligent information systems for operational river flood forecasting / A.M. Alabyan, I.N. Krylenko, S.A. Potryasaev, B.V. Sokolov, R.M. Yusupov, V.A. Zelentsov // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. – 2016. – Vol. 86, № 1. – P. 24–33. doi: 10.1134/S1019331616010056

Alfieri, L. Ensemble hydro-meteorological simulation for flash flood early detection in southern Switzerland / L. Alfieri, J. Thielen, F. Pappenberger // *J. Hydrol.* – 2012. – Vol. 424–425. – P. 43–153. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.12.038

Alfieri, L. Flash flood detection through a multi-stage probabilistic warning system for heavy precipitation events / L. Alfieri, D. Velasco, J. Thielen Del Pozo // *Adv. Geosci.* – 2011. – Vol. 29. – P. 69–75. doi: 10.5194/adgeo-29-69-2011

Arnold, C.D. CLIGEN Weather Generator Predictions of Seasonal Wet and Dry Spells in Uganda / C.D. Arnold, W.J. Elliot // *Transactions of the ASAE*. – 1996. – Vol. 39. № 3. – P. 969–972.

Bartholmes, J.C. The European Flood Alert System EFAS – part 2: statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts / J.C. Bartholmes, J. Thielen, M.H. Ramos, S. Gentilini // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* – 2009. – Vol. 13. – P. 141–153. doi: 10.5194/hessd-5-289-2008

Belikov, V.V. Justification of hydrological safety conditions in residential areas using numerical modelling / V.V. Belikov, A.I. Aleksyuk, N.M. Borisova, E.S. Vasilieva, S.V. Norin,

A.B. Rumyantsev // *Water Resources*. – 2018. – Vol. 45. № 1. – P. 39–49. doi: 10.1134/S0097807818050305

Belikov, V.V. Mathematical modeling of complex reaches of large river channels / V.V. Belikov, A.A. Zaitsev, A.H. Militeev // *Water Resources*. – 2002. – Vol. 29. № 6. – P. 643–650.

Belikov, V.V. Non-Sibsonian interpolation on arbitrary system of points in Euclidean space and adaptive isolines generation / V.V. Belikov., A. Yu. Semenov // *Applied Numerical Mathematics*. – 2000. – Vol. 32. № 4. – P. 371–387.

Belikov, V.V. Two-dimensional hydrodynamic flood modelling for populated valley areas of Russian rivers / V.V. Belikov, I.N. Krylenko, A.M. Alabyan, A.A. Sazonov, A.V. Glotko // *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. – 2015. – № 370. – P. 69–74. doi: 10.5194/piahs-370-69-2015

Bogner, K. Error-correction methods and evaluation of an ensemble based hydrological forecasting system for the Upper Danube catchment / K. Bogner, M. Kalas // *Atmos. Sci. Lett.* – 2008. – Vol. 9, Issue 2. – P. 95–102. doi: 10.1002/asl.180

Braydlay, J.N. *Hydraulics of Bridge Waterways* / J.N. Braydlay // *Hydraulic design series*. – 1960. – Vol. 37. № 1. – P. 1–53.

Buizza, R. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system R. Buizza, M. Miller, T.N. Palmer // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 1999. – Vol. 279 – P. 2887–2908.

Burrough, P. A. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment* / P. A. Burrough // *Geocarto International* – 1986. – Vol. 1. Issue 3. – P. 54–54.

Byungseok, K. A deep-learning-based emergency alert system / K. Byungseok, H. Choo // *ICT Express* – 2016. – Vol. 2. – P. 67–70 doi: 10.1016/j.ict.2016.05.001.

Cloke, H. *Operational European flood forecasting* / H.Cloke, F.Pappenberger, J.Thielen, V.Thiemig // *Environmental Modelling: Finding Simplicity in Complexity*, ed. by J. Wainwright, M. Mulligan, 2nd edn. – John Wiley & Sons, Inc. – 2013. – P. 415-434. doi: 10.1002/9781118351475.ch25.

Demeritt, D.B. Ensemble predictions and perceptions of risk, uncertainty, and error in flood forecasting / D.B. Demeritt, H.L. Cloke, F. Pappenberger, J. Thielen, J.Bartholmes, M.H. Ramos // *Environmental Hazards*. – 2007. – Vol. 7. – P. 115–127. doi: 10.1016/j.envhaz.2007.05.001

Di Piazza, A. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy / A. Di Piazza, F. Lo Conti, L.V. Noto, F. Viola, G. La Loggia // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2011. – Vol. 13, Issue 3. – P. 396–408. doi:10.1016/j.jag.2011.01.005

Fiebiger, G. Hazard mapping in Austria / G. Fiebiger // *Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rockfall Engineering*. – 1997. – Vol. 61, № 134. – P. 121- 133.

García, R. Hazard mapping for debris flow events in the alluvial fans of northern Venezuela / R. García, J.L. López, M. Noya, M.E. Bello, M.T. Bello, N. González, G. Paredes, M.I. Vivas, J.S. O'Brien // In: D. Rickenmann and C. Chen, Editors, 3rd Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation. – Davos: Millpress, 2003. – P. 589 – 599.

Gelfan, A. Climate change impact on the water regime of two great arctic rivers: modeling and uncertainty issues / A. Gelfan, D. Gustafsson, Y. Motovilov, B. Arheimer, I. Krylenko, A. Lavrenov // *Climatic Change*. — 2017. — Vol. 141., № 3. – P. 499-515. doi: 10.1007/s10584-016-1710-5

Gelfan, A. Testing robustness of the physically-based ecomag model with respect to changing conditions / A. Gelfan, Yu Motovilov, I. Krylenko, V. Moreido, E. Zakharova // *Hydrological Sciences Journal*. — 2015. — Vol. 60, №. 7-8. — P. 1266–1285. doi: 10.1080/02626667.2014.935780.

Hand, D. J. Principles of Data Mining / D. J. Hand, H. Mannila, P. Smyth. – MIT Press, Cambridge-London, 2001. – 546 p.

Herget, J. Reconstructing peak discharges for historic flood levels in the city of Cologne, Germany / J. Herget, H. Meurs // *Global and Planetary Change*. – 2010. – Vol. 70. – P. 108-116. doi: 10.1016/J.GLOPLACHA.2009.11.011

Humphrey, G. Review of Artificial Intelligence Techniques and their Applications to Hydrological Modeling and Water Resources Management. Part 1 – Simulation / G. Humphrey, H. Maier, Holger, G. Dandy – Nova Science Publishers, 2008. – P. 15-65

Hutchinson, M. F. A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia / M.F. Hutchinson, T. I. Dowling. // *Hydrological Processes*. – 1991. – Vol. 5. – P. 45–58.

Hutchinson, M.F. Digital elevation models and representation of terrain shape / M.F. Hutchinson, J.C. Gallant // J.P. Wilson and J.C. Gallant (eds) *Terrain Analysis*. – Wiley, New York, 2000. – P. 29–50.

Hutchinson, M.F. Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure / M.F. Hutchinson, T. Xu, J.A. Stein – *Geomorphometry 2011*, edited by T. Hengel, I.S. Evans, J.P. Wilson and M. Gould – P. 19–22.

Jones, A.A. Climate change and sustainable water resources: placing threat of global warming in perspective /A.A. Jones // *Hydrological Sciences J*. – 1999. – Vol. 44, Issue 4. – P. 541-557.

Kalinin, V.G. Long-term changes of ice formation dates on the rivers / V.G. Kalinin, V.V. Chichagov // Practical geography and XXI century challenges. International Geographical Union Thematic Conference dedicated to the Centennial of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, 2018. – P. 376-378.

Kerin, I. Simulation of Levee Breach Using Delft Models: A Case Study of the Drava River Flood Event / I. Kerin, S. Giri, D. Bekic // Advances in Hydroinformatics, 2018. – P. 1117-1131. doi: 10.1007/978-981-10-7218-5_77

Krylenko, I. Modeling ice-jam floods in the frameworks of an intelligent system for river monitoring / I. Krylenko, A. Alabyan, A. Alekseyuk, V. Belikov, A. Sazonov, E. Zavyalova, I. Pimanov, S. Potryasaev, V. Zelentsov // Water Resources. — 2020. — Vol. 47, no. 3. — P. 387–398.

Krylenko, I. Physically-based distributed modelling of river runoff under changing climate conditions / I. Krylenko, Yu Motovilov, E. Antokhina, V. Zhuk, G. Surkova // Remote Sensing and GIS for Hydrology and Water Resources (IAHS Publ. 36X, 201X) (Proceedings RSHS14 and ICGRHWE14, Guangzhou, China, August 2014). — Guangzhou, 2014. — Vol. 368 of IAHS Publ.— P. 156–161.

Lee, K.Y. An algorithm for automatic 2D quadrilateral mesh generation with line constraints / K.Y. Lee, I.I. Kim, D.Y. Choo, T.W. Kim // Computer-Aided Design. – 2003. – Vol. 35. – P. 1055–1068. doi:10.1016/S0010-4485(02)00145-8

Ma, X. AUTOMESH-2D/3D: Robust automatic mesh generator for metal forming simulation / X. Ma, G. Zhao, L. Sun // Materials Research Innovations – Vol.15, Issue 1 – P. 482–486. doi: 10.1179/143307511X12858957676038

Moreno-Chamarro, E. Winter amplification of the European Little Ice Age cooling by the subpolar gyre / E. Moreno-Chamarro, D. Zanchettin, K. Lohmann, J. Luterbacher, J. Jungclaus // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7, № 9981. – P. 1–8. doi: 10.1038/s41598-017-07969-0

Moriasi, D.N. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations / D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, T. L. Veith // American Society of Agricultural and Biological Engineers. – 2007. – Vol.50, №3. – P. 885-900. doi:10.13031/2013.23153

Motovilov Yu. Ecomag: a distributed model of runoff formation and pollution transformation in river basins / Yu. Motovilov // IAHS Publ. — 2013. — Vol. 361. — P. 227–234.

Motovilov, Y. G. Hydrological simulation of river basins at different spatial scales: 1. generalization and averaging algorithms / Y. G. Motovilov // Water Resources. — 2016. — Vol. 43, no. 3. — P. 429–437.

Motovilov, Y. G. Hydrological simulation of river basins at different spatial scales: 2. test results / Y. G. Motovilov // *Water Resources*. — 2016. — Vol. 43, no. 5. — P. 743–753.

Motovilov, Yu. ECOMAG – regional model of hydrological cycle. Application to the NOPEX region / Yu. Motovilov, L. Gottschalk, K. Engeland, A. Belokurov. – Department of Geophysics, University of Oslo, Institute Report Series. – 1999. – № 105. – 88 p.

Motovilov, Yu.G. Simulation of spatially-distributed copper pollution in a large river basin using the ecomag-hm model / Yu.G. Motovilov, T.B. Fashchevskaya // *Hydrological Sciences Journal*. — 2019. — Vol. 64, № 6. — P. 739–756. doi: 10.1080/02626667.2019.1596273

Nash, J.E. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles / J.E. Nash, J.V. Sutcliffe // *Journal of Hydrology*. – 1970. – Vol.10, №3. – P. 282-290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6

Norin, S.V. Simulating flood waves in residential areas / S.V. Norin, V.V. Belikov, A.I. Aleksyuk // *Power Technology and Engineering*. – 2017. – Vol. 51, no. 1. – P. 52–57. doi: 10.1007/s10749-017-0782-3

Parker, Geoffrey. *Global Crisis: War, Climate Change and Catastrophe in the Seventeenth Century* / Geoffrey Parker – Yale University Press, 2013. – 904 p.

Pavliček, M. Numerical modelling of flash flood event in steep river using Telemac 2D and Sisyphe / M. Pavliček, O. Bruland // *Toulouse: Zenodo*. – 2020. – P. 1-7. doi: 10.5281/zenodo.3611582

Piacentini, T. Geomorphology-Based Analysis of Flood Critical Areas in Small Hilly Catchments for Civil Protection Purposes and Early Warning Systems: The Case of the Feltrino Stream and the Lanciano Urban Area (Abruzzo, Central Italy) / T. Piacentini, C. Carabella, F. Boccabella, S. Ferrante, C. Gregori, V. Mancinelli, A. Pacione, T. Pagliani, E. Miccadei // *Water*. – 2020. – Vol. 12(8), № 2228. P. 1- 31. [doi: 10.3390/w12082228](https://doi.org/10.3390/w12082228)

Racsko, P. A Serial Approach to Local Stochastic Weather Models / P. Racsko, L. Szeidl, M. Semenov // *Ecological Modelling*. – 1991. – Vol. 57. – P. 27-41. doi:10.1016/0304-3800(91)90053-4

Rangari, V Assessment of inundation risk in urban floods using HEC RAS 2D / V. Rangari, U. Nanduri, C M. Bhatt // *Modeling Earth Systems and Environment*. – 2019 – P. 1839-1851. doi:10.1007/s40808-019-00641-8.

Raynaud, D. A dynamic runoff co-efficient to improve flash flood early warning in Europe: Evaluation on the 2013 central European floods in Germany / J. Thielen, P. Salamon, P. Burek, S. Anquetin, L. Alfieri // *Meteorological Applications*. — 2014. — Vol. 22, Issue 3 — P. 410–418. doi: 10.1002/met.1469.

Richardson, C.W. 1981: Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. / C.W. Richardson // *Water Resour. Res.* — 1981.— Vol. 17. — P.182–190.

Santer, B.D. Celebrating the Anniversary of Three Key Events in Climate Change Science / B.D. Santer, C.J.W. Bonfils, Q. Fu, J.C. Fyfe, G.C. Hegerl, C. Mears, J.F. Painter, S. Po-Chedley, F. J. Wentz, M. D. Zelinka, C.Z. Zou // *Nature Climate Change.* – 2019. – Vol. 9. – P. 180-182.

Sazonov, A Two-dimensional hydrodynamic modeling of residential areas flooding using a highly detailed computational mesh / A. Sazonov, I. Krylenko, A. Rumyantsev, V. Belikov, N. Semenova. // *E3S Web of Conferences.* — 2020. — Vol. 163. — P. 1–5. doi: 10.1051/e3sconf/202016301010

Sazonov, A.A. Modeling the scenarios of catastrophic flood on the river of the Northern / A. A. Sazonov, I. N. Krylenko, A. N. Amerbaev, E V Zavyalova, N.K. Semenova, A.N. Gelfan, N.L. Frolova // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2019. – Vol. 263. – P. 1–8. doi:10.1088/1755-1315/263/1/012056

Semenova, N. Use of classification algorithms for the ice jams forecasting problem / N. Semenova, A. Sazonov, I. Krylenko, N. Frolova // *E3S Web of Conferences.* — 2020. — Vol. 163. — P. 1–5. doi: 10.1051/e3sconf/202016302008

Sharpley, A.N. EPIC: The erosion-productivity impact calculator / A.N. Sharpley, J.R. Williams. – U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin, No. 1768, 1990. – 235 p.

Shepard, D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data / D. Shepard // *ACM Annual Conference/Annual Meeting.* – 1968. – P. 517–524.

Skotner, C. MIKE FLOOD WATCH - managing real-time forecasting [Электронный ресурс] / C. Skotner, A. Klinting, H. Ammentorp. – 2005. – URL: [https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike11/Skotner MIKE FLOOD watch.pdf](https://www.dhigroup.com/upload/publications/mike11/Skotner_MIKE_FLOOD_watch.pdf)

Smith, P. On the Operational Implementation of the European Flood Awareness System (EFAS) / P. Smith, Pappenberger, F. Wetterhall, J. Thielen-del Pozo, B. Krzeminski, P. Salamon, D. Muraro, M. Kalas, C. Baugh // *Flood Forecasting.* — 2016. — P. 313-348 doi: 10.1016/B978-0-12-801884-2.00011-6.

Stockle, C.O. *ClimGen Manual* / C.O. Stockle, G.S. Campbell, R. Nelson – Biological Systems Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA, 1999. – 28 p.

Thielen-del Pozo, J. Medium Range Flood Forecasting Example EFAS / J. Thielen-del Pozo, P. Salamon, P. Burek, F. Pappenberger, C. Eklund, E. Sprokkereef, M. Hazlinger, M. Garcia, R. Garcia-Sanchez // *Handbook of Hydrometeorological Ensemble Forecasting.* – 2015. – P. 1-17. doi: 10.1007/978-3-642-40457-3_51-1.

Vasilenko, A. N. Ice regime of rivers of the arctic zone of Russia in modern and future climate conditions / A. N. Vasilenko, S. A. Agafonova, N. L. Frolova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 263. — P. 1–7.

Vuglinsky, V.S. Peculiarities of ice events in Russian arctic rivers / V.S Vuglinsky // Hydrological Processes. – 2002. – Vol. 16, № 4. – P. 905-913. doi: 10.1002/hyp.365

Watson, D.F. A Refinement of Inverse Distance Weighted Interpolation / D.F. Watson, G.M. Philip G.M. // Geoprocessing. – 1985. – Vol. 2, №. 4. – P. 315-327.

Xiong, Lihua Comparison of three updating schemes using artificial neural network in flow forecasting / Kieran O'Connor, Shenglian Guo // Hydrology and Earth System Sciences. – 2004. – Vol.8, №2. – P. 247–255. doi:10.5194/hess-8-247-2004.

Zelentsov, V. River flood forecasting system: An interdisciplinary approach / V. Zelentsov, I. Pimanov, S. Potryasaev, B. Sokolov, S. Cherkas, A. Alabyan, V. Belikov, I. Krylenko // Flood Monitoring through Remote Sensing. – Springer, Cham Cham. – 2018. – P. 81–100. doi: 10.1007/978-3-319-63959-8_4

Zhang, Z. Introduction to machine learning: k-nearest neighbors / Z. Zhang // Annals of Translational Medicine. – 2016. – Vol. 4., №11 – P. 1–7. doi: 10.21037/atm.2016.03.37.