

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель – *Жук Виктор Архипович, кандидат географических наук, доцент*

Официальные оппоненты – *Калинин Виталий Германович, доктор географических наук, доцент, заведующий кафедрой гидрологии и охраны водных ресурсов Пермского государственного национального исследовательского университета*

Козлов Дмитрий Вячеславович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства Московского государственного строительного университета

Коронкевич Николай Иванович, доктор географических наук, профессор, г.н.с. лаборатории гидрологии Института географии РАН

Защита диссертации состоится «13» мая 2021 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.11.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, географический факультет, 18 этаж, ауд. 18-01 (тел. +7(495)9391420, факс +7 (495)9328836).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/359503763/>

Автореферат разослан «5» апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. По данным МЧС, наводнения — самое распространенное стихийное бедствие по повторяемости и по площади распространения, и одно из самых разрушительных по причиняемому ущербу.

Одним из наиболее подверженных затоплению районов северной части Европейской территории России (ЕТР) является бассейн р. Северная Двина, где регулярно формируются ледовые заторы, приводящие к подъему уровня воды на 9 и более метров. В зону затопления попадают хозяйственные объекты, населённые пункты, что наносит существенный ущерб экономике регионов, а также может причинить вред здоровью населения.

Для оценки возможного ущерба и учета влияния отдельных факторов, влияющих на затопление освоенной местности, активно применяются методы математического моделирования. Это направление стремительно развивается благодаря появлению достаточно мощных вычислительных машин, ГИС-технологий.

Только в XXI в. произошло множество наводнений, повлекших за собой человеческие жертвы и существенный экономический ущерб. В связи с этим создание обоснованной методики исследования характеристик затопления и их максимальных значений с учетом заторообразования, основанной на синтезе разных типов гидрологических моделей, представляет собой актуальную научную задачу.

Степень разработанности темы. В настоящее время тематике наводнений и изучению опасных ледовых явлений на р. Северная Двина посвящено множество работ (Коновалов и др., 1962; Донченко, 1987; Агафонова, Фролова, 2007; Чалов и др., 2012; Католиков, Католикова, 2017; Козлов, Кулешов, 2019). Созданием методик прогноза и рекомендаций по борьбе с заторами льда на р. Сухона в районе г. 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). Отдельным этапом в исследованиях, связанных с обеспечением

безопасности ключевого участка у г. Великий Устюг от негативного воздействия вод, стала совместная работа кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, СПИИРАН и ИВП РАН. В ходе данного исследования, в том числе с участием автора диссертации, была произведена попытка совмещения различных типов моделей в единый комплекс, позволяющий прогнозировать зону затопления в режиме реального времени. Результаты данных исследований были отражены в работах (Alabyan et al., 2016; Зеленцов и др., 2019; Krylenko et al., 2020).

Объект исследования – освоенные участки р. Северная Двина, от слияния р. Сухона и р. Юг до г. Котлас, где наводнения происходят наиболее часто, регулярно нанося огромный экономический ущерб. Исследование процессов формирования весеннего стока было проведено для бассейнов р. Сухона и р. Юг.

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 р. Малая Северная Двина) и оценка их характеристик на основе динамико-стохастической модели, модели формирования стока и двумерной гидродинамической модели.

Задачи исследования:

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 ECOMAG для воспроизведения расходов воды на ключевом участке бассейна р. Северная Двина.

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 модели формирования стока, и на ее основе 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.

Основные защищаемые положения:

1. 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 половодий 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 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 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, полученные с помощью генератора погоды, позволили определить наиболее неблагоприятный сценарий прохождения половодья 0,1% обеспеченности. Получены карты затопления для различных сценариев. Эта информация может быть полезна при планировании защитных мероприятий и дальнейшего развития городской застройки.

Разработанная методика синтеза математических моделей позволит оперативно определять характеристики затопления, что, в свою очередь, позволит 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. В диссертационной работе были использованы различные типы гидрологических моделей, отличающиеся наборами исходных данных, а также данными для калибровки и верификации.

Гидродинамическая модель STREAM_2D (авт. Беликов В.В. и др.). В основу создания гидродинамической модели исследуемого участка вошли материалы экспедиционных исследований НИЛ эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева и кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и крупномасштабные топографические карты и планы. В качестве входных данных для модели STREAM_2D использовалась информация по расходам воды на гидрологических постах р. Сухона, р. Юг и р. Малая Северная Двина, уровни воды по г/п Великий Устюг привлекались для калибровки и верификации модели.

Модель формирования стока ECOMAG (ECOLOGICAL Model for Applied Geophysics) (авт. Мотовилов Ю.Г.). Для моделирования стока рек Сухона и Юг использовался информационно-моделирующий комплекс (ИМК) ECOMAG, основой для схематизации бассейна в котором являлась цифровая модель рельефа GLOBE с пространственным разрешением 1 км и тематические почвенная и ландшафтная карты масштаба 1:2 500 000.

В качестве входной информации для ИМК ECOMAG использовались среднесуточные данные о температуре воздуха, дефиците влажности воздуха

и сумме осадков по 68 метеостанциям в бассейне Северной Двины. Для калибровки ИМК ECOMAG использовались данные о среднесуточных расходах воды по гидрологическим постам р. Сухона - д. Каликино, р. Юг - д. Гаврино, р.Юг - п. Подосиновец, р. Малая Северная Двина- д. Абрамково.

Стохастический генератор погоды MSFR_WG (Multi-Site FRagment-based stochastic Weather Generator) (авт. Гельфан А.Н.). 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 ECOMAG, использовалась архивная информация по 35 метеостанциям (среднесуточные значения температуры воздуха, дефицита влажности и суммы осадков), расположенных в пределах бассейна р. Северная Двина и в его буферной зоне, за период с 1971 по 2018 г.

Пример совместного использования моделей представлен на рисунке 1, более детально каждая модель будет рассмотрена в главах 2-3.

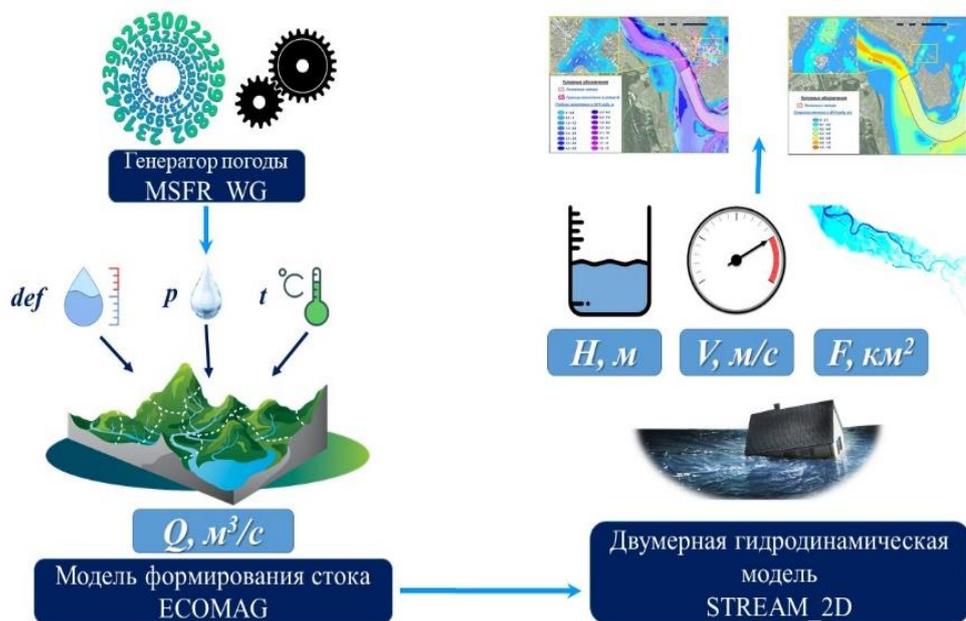


Рисунок 1.
Схема совместного использования различных типов моделей для определения возможных характеристик затопления в районе г. Великий Устюг

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

Степень достоверности и апробация результатов. В период 2015–2020 гг. результаты диссертационного исследования были доложены на 24 конференциях, в лектории Русского географического общества, на семинаре

кафедры гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова и в Северном Арктическом Федеральном университете. Среди конференций - International Geographical Congress (Китай, 2016), European Geosciences Union General Assembly (Австрия, 2018 и 2019), IGU Regional Conference (Квебек, Канада, 2018), «Water sustainability in a changing world» (Румыния, 2019). Автор принял участие в ряде всероссийских конференций с международным участием, таких как IV 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), конференция «Биомониторинг в Арктике» (Архангельск, 2018). Отдельные результаты диссертационной работы были доложены на совещании по подготовке к прохождению весеннего половодья 2018 г. заместителю губернатора Вологодской области В.В. Рябишину и начальнику аварийно-спасательной службы Вологодской области А.А. Лучинскому.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликованы 32 работы, в том числе 9 статей в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях.

Личный вклад автора. Автором были самостоятельно проанализированы данные наблюдений за ледовым режимом р. Северная Двина, природные и антропогенные факторы заторообразования. Автором было организовано экспедиционное исследование с целью обследования ключевого участка в период зимней межени и в момент вскрытия реки в

2018 г. Также автором были построены все графики и карты, проведена серия экспериментов по выявлению чувствительности гидродинамической модели к калибровочным параметрам. Под руководством А.Н. Гельфана была собрана необходимая информация для динамико-стохастической модели «генератор погоды» и проведена ее адаптация для исследуемого участка. При создании комплекса, объединяющего различные типы гидрологических моделей, автор принимал участие в разработке методики оценки характеристик затопления в черте г. Великий Устюг. Автором были выполнены необходимые этапы работ в рамках создаваемого комплекса: подбор исходных данных, построение расчетной сетки с учетом зданий, модельные 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.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, состоящего из 213 источников, включая 68 на иностранных языках. Общий объем диссертации – 201 страница, 97 рисунков, 11 таблиц.

Благодарность. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю, сотрудникам кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, сотрудникам ИВП РАН А.Н. Гельфану, Ю.Г. Мотовилову, В.В. Беликову, И.Н. Крыленко за помощь, поддержку и ценные советы на протяжении всей работы. Автор признателен начальнику аварийно-спасательной службы Вологодской области А.А. Лучинскому за предоставленные материалы и помощь в работе.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В **главе 1** дана физико-географическая характеристика рек Сухона, Юг и Малая Северная Двина, особое внимание уделено исследуемому участку от слияния р. Сухона и р. Юг до г. Котлас (рисунок 2). В **разделе 1.2** приводится

подробный статистический анализ наблюдений за водным и ледовым режимом на гидрологическом посту г. Великий Устюг за период с 1937 по 2018 гг. В **разделе 1.3** приведена социально-экономическая характеристика исследуемого района. В **разделе 1.4** сделан хронологический обзор исторических наводнений в районе г. Великий Устюг. До начала инструментальных наблюдений за уровнем, то есть до 1877 г., можно выделить два катастрофических наводнения (1742 и 1761 гг.), максимальный уровень воды которых превысил 10-метровую отметку, и 14 наводнений, когда отметка уровня достигла или превысила 7 м. После 1987 г. город Великий Устюг подвергался затоплению 22 раза. Самыми крупными со времен наводнения 1953 г. стали наводнения 1998 и 2016 гг.

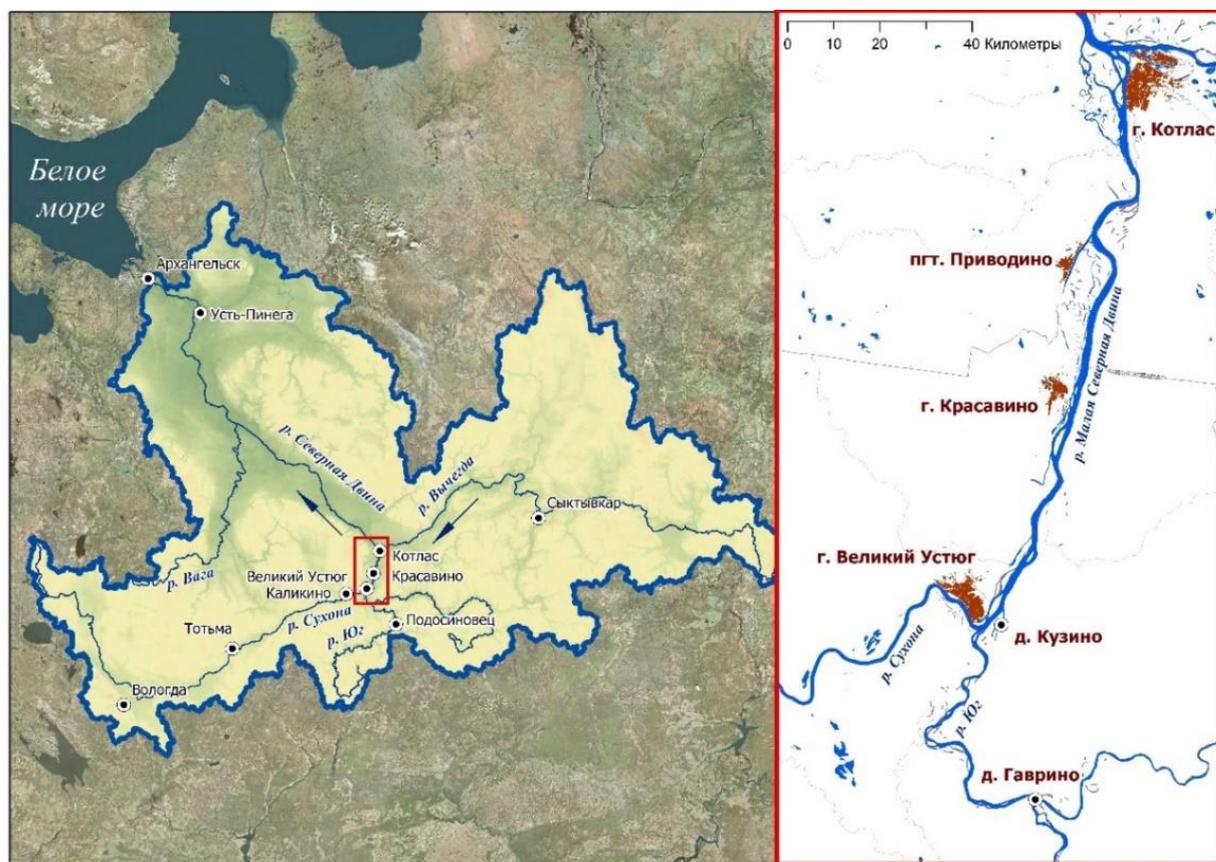


Рисунок 2. Положение ключевого участка на карте бассейна р. Северная Двина

В **разделе 1.5** рассмотрены основные метеорологические, гидрологические и антропогенные факторы формирования ледовых заторов. Для выделения заторной составляющей использовалась концепция выделения генетических составляющих уровня воды Н.И. Алексеевского.

В разделе 1.6 рассмотрены особенности формирования ледовых заторов на исследуемом участке р. Малая Северная Двина. Показано, что с 1938 по 2019 гг. заторные повышения уровня составляли от 0 до 63% от общего подъема уровней воды, составляя в среднем 36% (для тех случаев, когда ледовый затор формировался).

Рассмотрены процессы образования заторов и влияние различных факторов на их формирование в пределах исследуемого участка. Приведено описание наиболее распространенных мест образования ледовых заторов на исследуемом участке.

В разделе 1.7 рассматривается влияние меняющегося климата на водный режим и на формирование максимальных заторных уровней воды р. Сухона в районе г. Великий Устюг, прогноз которых основывается на эмпирической зависимости максимального уровня воды от условий замерзания реки, условия ледостава и условия вскрытия реки (Бузин, 2015 и др.).

Глава 2. Адаптация гидродинамической модели STREAM_2D для ключевого участка

В работе использовалась двумерная модель STREAM_2D (Беликов, Кочетков, 2014), и ее модификация с учетом ледовых явлений (Алексюк, Беликов, 2017). В основе модели лежит система двумерных уравнений Сен-Венана, известных как уравнения “мелкой воды”. В разделе 2.1 приводятся основные уравнения модели с учетом дополнительных факторов, связанных с ледовыми явлениями, таких как коэффициент шероховатости льда и уменьшение средней глубины потока за счет заполнения русла льдом. В разделе 2.2 рассмотрены основные этапы построения модели для участка реки.

В разделе 2.3 приводится описание модели затопления исследуемого участка длиной 69,5 км, от слияния рр. Сухона и Юг до г. Котлас. Для схематизации области моделирования была построена расчетная сетка, содержащая более 50 тыс. ячеек. 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 было получено хорошее соответствие смоделированных и фактических уровней воды по г/п г. Великий Устюг, г/п Медведки, с расхождением в диапазоне $\pm 0,15$ м.

В разделе 2.4 рассмотрен процесс создания детальной расчетной сетки, позволяющей учитывать все жилые строения, подвергающиеся затоплению.

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 форма и размер (Сазонов и др., 2020).

В данном варианте модели на основе детальной информации о застройке был реализован другой подход, и здания были исключены из расчетной сетки. Для учета их расположения построек использовался векторный слой города OSM, содержащий 3276 дома. Построение расчетной сетки производилось в сеткостроителе AutoMesh-2D, разработанном в университете г. Цзинань (КНР). Сам процесс построения состоял из пяти этапов: 1) разделение области построения на два класса: «дом» и «область затопления»; 2) разбиение линий на интервалы; 3) непосредственное построение четырехугольной нерегулярной сетки по алгоритму Looping-Quard; 4) ручная корректировка неправильно построенных ячеек; 5) адаптация созданной детальной расчетной сетки для модели STREAM_2D (Сазонов и др., 2020). Конечный вариант сетки для детальной модели на г. Великий Устюг содержит 122 404 ячейки. Граничные условия для детальной модели для г. Великий Устюг переносились с основной модели всего участка.

В разделе 2.5 представлены результаты численных экспериментов по оценке чувствительности модели к изменению основного калибровочного параметра — коэффициента шероховатости. В ходе сценарных расчетов на входе задавались расходы р. Сухона и р. Юг в пределах диапазона их изменений за период наблюдений, суммарный расход р. Малая Северная Двина составлял от 1000 до 11 000 м³/с. Для каждого заданного расхода воды

было проведено 9 вариантов расчетов при разных коэффициентах шероховатости русла – от 0,02 до 0,032 с шагом в 0,04. Вторая серия расчетов предполагала изменение коэффициента шероховатости поймы в диапазоне от 0,04 до 0,1 при постоянной шероховатости русла. На основании проведенных расчетов построены графики изменения осредненной по области моделирования скорости течения, средней глубины потока и площади водной поверхности. Согласно проведенным расчетам, при изменении коэффициента шероховатости русла и поймы наиболее сильно меняется средняя по области моделирования скорость течения – разница между ее наибольшим и наименьшим значением составляет 19%. Для глубины эта разница составляет 7–13%, а для площади водной поверхности — 5–6%.

При оценке чувствительности гидродинамической модели к параметрам ледового блока расчеты проводились с дополнительной шероховатостью льда в диапазоне от 0,035 до 0,125. Дополнительно уменьшалась средняя глубина руслового потока на величину от 0 до 2 м в зависимости от толщины льда в заторе. Результаты эксперимента были обобщены в виде номограммы. Показано, что максимальное повышение уровня воды на посту г. Великий Устюг за счет увеличения шероховатости в пределах указанного диапазона не превышает 2.9 м, дополнительное повышение уровня воды может быть связано с уменьшением поперечного сечения русла из-за скопления льда.

В **разделе 2.6** описаны результаты моделирования половодий за многолетний период с 1980 по 2016 г, включающего 18 лет с ледовыми заторами. 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.). На основании проведенных расчетов было выделено 4 группы параметров модели в зависимости от величины заторных подъемов уровня воды: небольшой затор (<1,5 м), средний затор (1,5–2,5 м), мощный затор (2,5–3,5 м) и катастрофически мощный затор (>3,5 м) (табл. 1). Итоги верификации модели с применением указанных групп параметров ледового блока показали удовлетворительные результаты, критерий Нэша-Сатклифа (NSE) для дней,

когда наблюдался ледовый затор, составил 0,79, а в целом за период верификации 0,91.

Таблица 1. Параметры ледового блока модели STREAM_2D для разных градаций заторов

Величина заторного повышения уровней воды	Дополнительная шероховатость	Толщина льда, м
Небольшие заторы (<1,5 м)	0,045	1
Средние заторы (1,5–2,5 м)	0,045	1,5
Мощные заторы (2,5–3,5 м)	0,075	2
Катастрофические заторы (>3,5 м)	0,1	2

Отдельно было проанализировано совпадение максимальных смоделированных и фактических уровней (рисунок 3), поскольку они являются наиболее важной характеристикой для определения опасности наводнения.

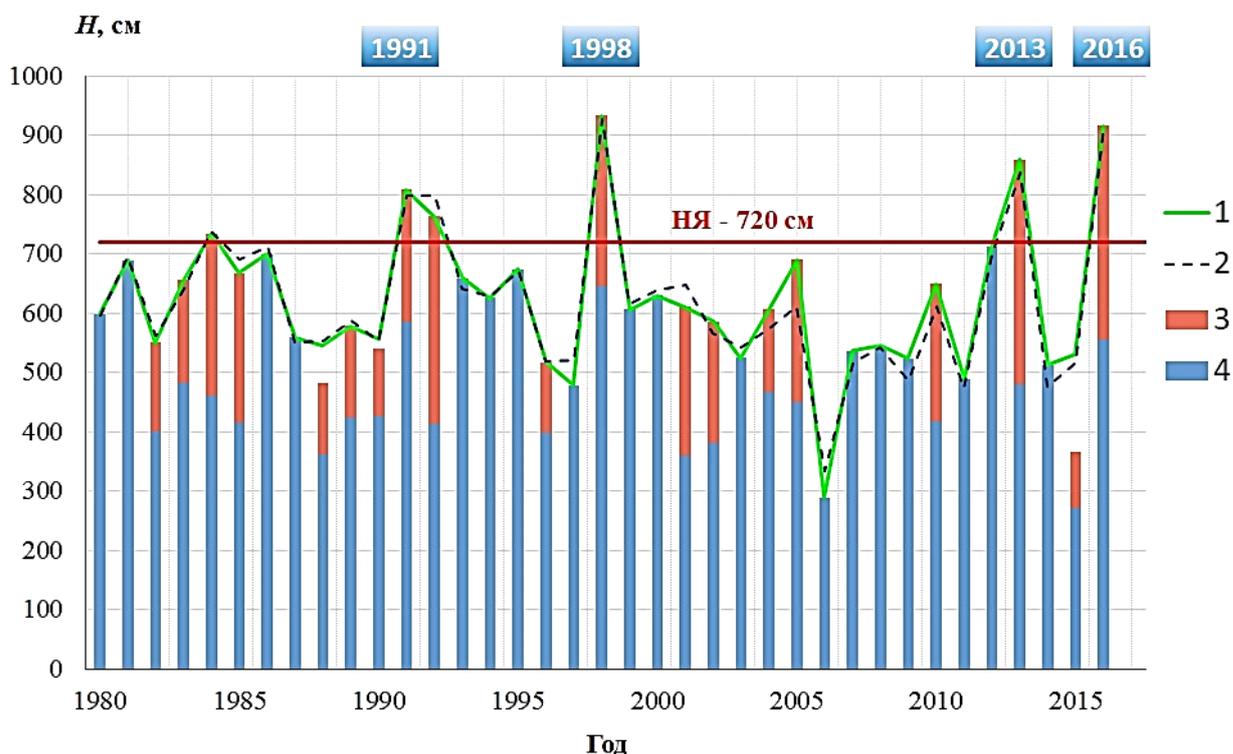


Рисунок 3. Сравнение фактических (1) и смоделированных (2) максимальных среднесуточных годовых уровней воды по г/п Великий Устюг за период 1980-2016 гг.; полученные на основе сценарного моделирования величины заторного повышения уровней воды (3) и фоновые уровни воды, обусловленные стоком, в дни затороформирования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

Модель воспроизвела их достаточно хорошо; значение критерия NSE для максимальных уровней воды за период 1980–2016 гг. составило 0,92, среднее значение абсолютных отклонений моделируемых максимальных уровней воды от фактических 0,18 м. Показано, что наиболее выдающиеся наводнения обусловлены либо сочетанием повышенного стока в период затороформирования с мощным затором (1998 г.), либо затором катастрофической мощности (2013 г.), либо сочетанием обоих факторов (2016 г.) (Sazonov et al., 2019).

Глава 3. Использование динамико-стохастического моделирования и модели формирования стока для определения максимального расхода воды малой обеспеченности

В разделе 3.1 приводится описание информационно-моделирующего программного комплекса ECOMAG, предназначенного для расчета речного стока по метеорологическим данным (Motovilov et al., 1999; Мотовилов, 2004; Мотовилов, Гельфан, 2018). Он состоит из пространственно-распределенной модели гидрологического цикла и базы данных с информацией о характеристиках территории, а также управляющую оболочку.

В разделе 3.2 приводится подробное описание модели бассейна р. Северная Двина в ИМК ECOMAG. Параметры модели ECOMAG калибровались по наблюдениям за стоком по постам в бассейне в период 1980–1996 гг., другие 18 лет наблюдений (1997–2014 гг.) использовались для независимой проверки эффективности моделирования стока. Согласно критерию соответствия Нэша–Сатклиффа, качество моделирования 35-летних рядов среднесуточных расходов воды для гидропостов с. Абрамково, д. Каликино, д. Гаврино, пос. Подосиновец оценивается как хорошее. На этапе верификации модель ECOMAG корректно воспроизводит максимальные расходы воды р. Сухона, в том числе во время катастрофических наводнений 1998 г. и 2013 гг.

В разделе 3.3 рассмотрен процесс адаптации динамико-стохастической модели «генератор погоды» *MSFR_WG* (авт. Гельфан А.Н.) для расчета максимально возможных расходов воды в районе г. Великий Устюг.

Качество моделирования на основе генератора погоды определялось путем сравнения как статистических характеристик метеорологических величин, определенных по фактическим и искусственным рядам, так и с помощью кривых обеспеченности, построенных по смоделированным на их основе расходам воды и по фактическим данным (рисунок 4).

Моделирование расходов воды 0,1% обеспеченности стокового генезиса было выполнено в три этапа:

1. Моделирование с помощью основанной на методе Монте-Карло стохастической модели MSFR_WG псевдовременных рядов метеовеличин (температуры воздуха, осадков, дефицита влажности) продолжительностью 1000 лет с суточным временным шагом.

2. Моделирование стока в створе гидрологического поста г. Великий Устюг с помощью ИМК ЕСОМАГ на основе рядов метеорологических величин, полученных с помощью генератора погоды.

3. Расчет характеристик затопления с помощью модели STREAM_2D, используя наибольший суммарный расход воды р. Сухона и р. Юг, рассчитанный с помощью ИМК ЕСОМАГ.

Результаты моделирования выявили наиболее критический сценарий прохождения половодья — одновременное прохождение пиков по р. Сухона и р. Юг, как это было, например, во время последнего выдающегося наводнения 2016 г. Согласно модельным расчетам, для р. Юг максимальное значение расхода воды составило 5990 м³/с, а для р. Сухона — 7860 м³/с, что соответствует максимальной отметке уровня воды по посту г. Великий Устюг 57,36 м. При этом уровень воды при прохождении расхода воды 1% обеспеченности при наличии ледового затора на 2 м больше и составляет 59,39 м. В качестве экстремального сценария было рассмотрено прохождение расхода воды 0,1% обеспеченности при условии образования ледового затора воды в узле слияния р. Сухона и р. Юг.

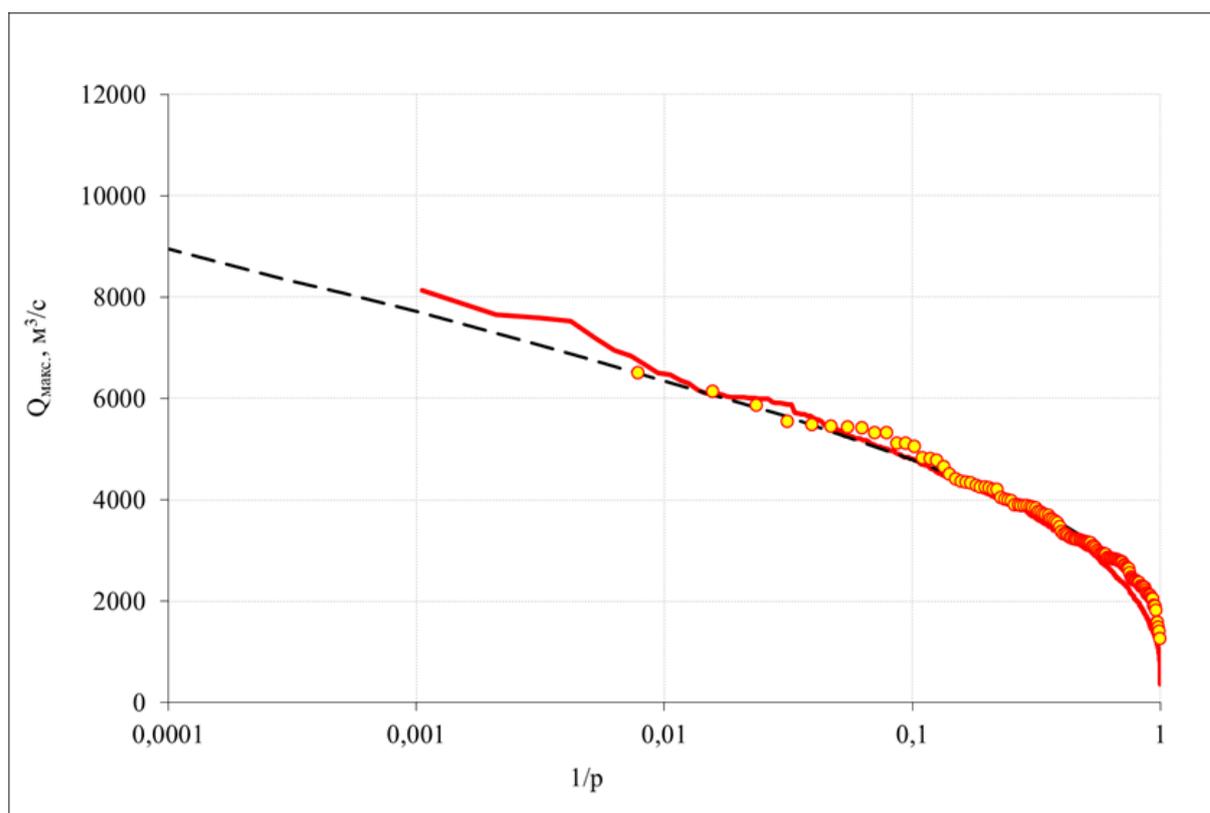


Рисунок 4. Вероятности превышения максимальных за год расходов воды р. Сухона, оцененные по ряду фактических значений (желтые точки), по 1000-летнему ряду, рассчитанному с помощью динамико-стохастической модели (красная линия). Черным пунктиром показана кривая трехпараметрического гамма-распределения, построенная по фактическим данным

В действительности такой вариант прохождения половодья маловероятен, так как установление ледового затора происходит на подъеме половодья, то есть до момента достижения его пика. Максимальная отметка уровня воды при установлении ледового затора и прохождении расхода воды 0,1% обеспеченности по результатам моделирования составила 61,07 м.

Глава 4. Построение вероятных сценариев затопления поймы р. Северная Двина (на примере ключевого участка)

В разделе 4.1, приведены результаты моделирования выдающихся наводнений 1998 и 2016 гг. Для моделирования наводнения 2016 г. была использована как основная модель (от слияния р. Сухона и р. Юг до г. Котлас), так и модель с детальной сеткой на территорию г. Великий Устюг (рисунок 5).

По результатам моделирования наибольшему затоплению подверглась юго-восточная часть города, в отдельных местах глубина потока достигала 2,5 м.

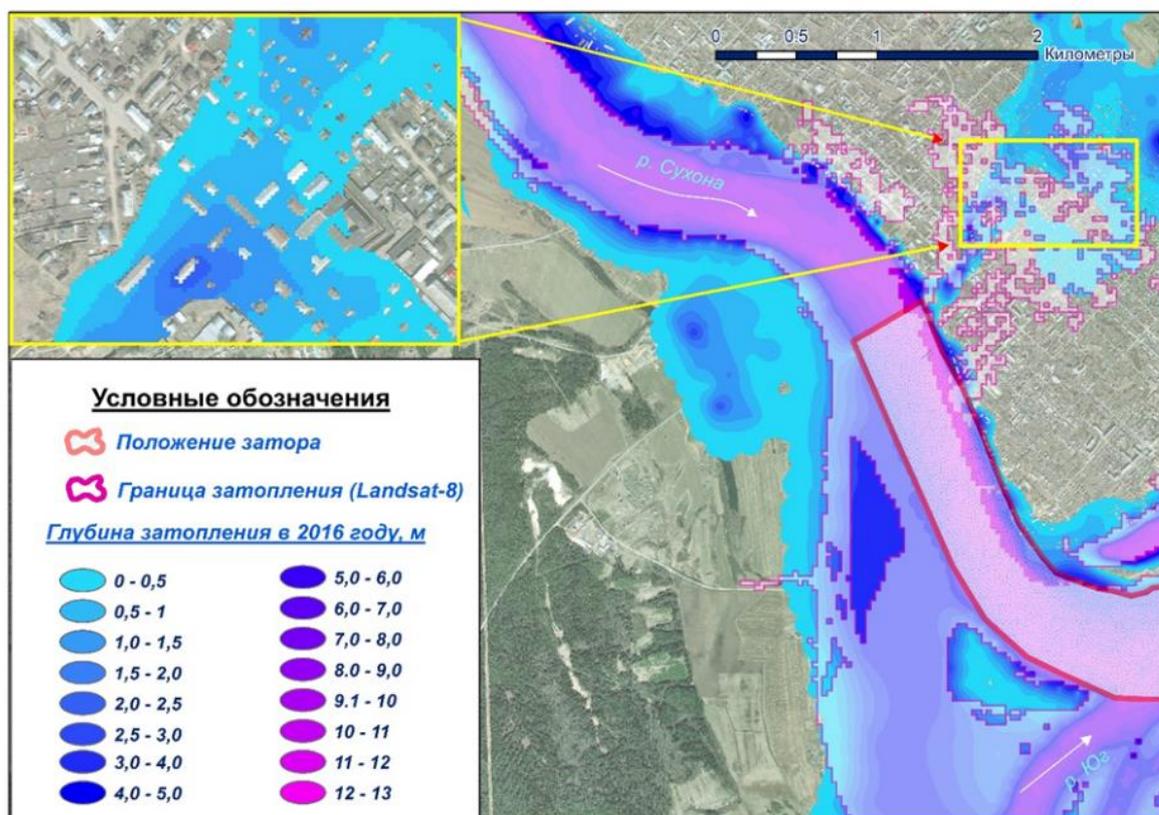


Рисунок 5. Полученная по результатам моделирования карта глубин в районе г. Великий Устюг на момент пика половодья 18.04.2016 г.

Расхождение площади смоделированной зоны затопления с полученной в ходе дешифрирования космических снимков для этих наводнений не превысило 8%. В разделе также приведено сравнение оценок ущерба от наводнений 1998 и 2016 г. на основе балльной шкалы, разработанной В.В. Беликовым (2005). Наибольшему разрушению подверглись жилые и хозяйственные постройки, расположенные в восточной части г. Великий Устюг. Также значительные ущербы наблюдались в населенных пунктах, расположенных в непосредственной близости от реки, например, д. Дымково, д. Коромыслово и пос. Приводино.

В разделе 4.2 приведены результаты моделирования зон затопления при прохождении половодья с уровнем воды 1% обеспеченности стокового и заторного генезиса. В качестве наиболее неблагоприятного сценария, было рассмотрено затопление территории при расчете уровня 0,001%

обеспеченности заторного генезиса. Для рассмотренных сценариев и наблюдавшихся исторических максимумов проведено сравнение максимальных уровней воды по г/п Великий Устюг и других характеристик, определяющих опасность затопления городской территории, включая площади затопления, скорости течения, глубины и интенсивность потока.

На построенном профиле (рисунок 6) 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 (полученного по результатам стохастического моделирования) уровень воды превысит отметку неблагоприятного опасного явления на 1 м.

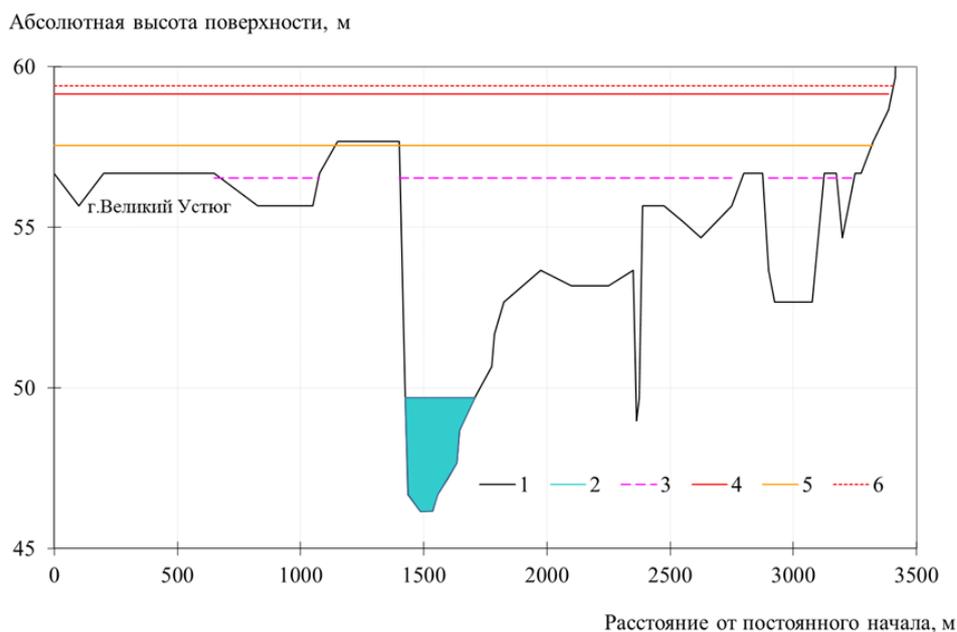


Рисунок 6.
Продольный
профиль через
долину р.
Сухоны у г.
Великий Устюг
и уровни
затопления
различного
генезиса

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

Уровень исторического максимума, который наблюдался во время наводнений 1998 и 2016 гг., близок по значению к уровню 1% обеспеченности заторного генезиса (максимальный наблюдавшийся уровень 1998 г. составил 980 см над «0» поста или 59,14 м). Таким образом, для исследуемого района именно заторные наводнения представляют наибольшую опасность по

сравнению с наводнениями стокового генезиса, даже столь малой обеспеченности, как 0,1%.

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

В разделе 5.1 приведено описание численных экспериментов, посвященных оценке эффективности противопаводковых дамб на основе гидродинамической модели. Для их учета в расчетную сетку и рельеф модели внесена конфигурация дамб и проведены расчеты для граничных условий, аналогичных сценариям для современных условий.

Первоначальный проект строительства противопаводковой дамбы предполагал защиту от наводнений не только г. Великий Устюг, но и прилегающих к нему населенных пунктов. Протяженность дамбы при этом составила бы более 15 км. В принятом в настоящее время к реализации проекте положение защитной дамбы вдоль р. Сухоны совпадает с предыдущим планом, однако северная граница дамбы располагается ближе к г. Великий Устюг более чем на 3 км. По результатам моделирования показано, что защита города противопаводковой дамбой при повышении уровня воды 1% обеспеченности при наличии затора существенно изменит гидродинамику потока на рассматриваемом участке, при этом наличие дамбы приведет к увеличению глубин затопления прилегающих территорий. За счет подпорного эффекта от дамб отметки водной поверхности у г/п Великий Устюг поднимутся на 1,3 м (до отметки 60,78 м БС) при длинной дамбе и на 0,7 м (до отметки 60,26 м БС) при дамбе, защищающей только городскую территорию (рисунок 7).

Полная защита рассматриваемой территории может быть реализована только при наращивании гребня дамбы до отметок более 60 м БС, однако это невозможно из нарушения исторического облика город, высокой стоимости сооружений и негативных подпорных эффектов, поэтому наряду с инженерными методами защиты необходима разработка методов прогноза заторных наводнений, основные подходы к которым приведены в заключительных разделах главы 5.

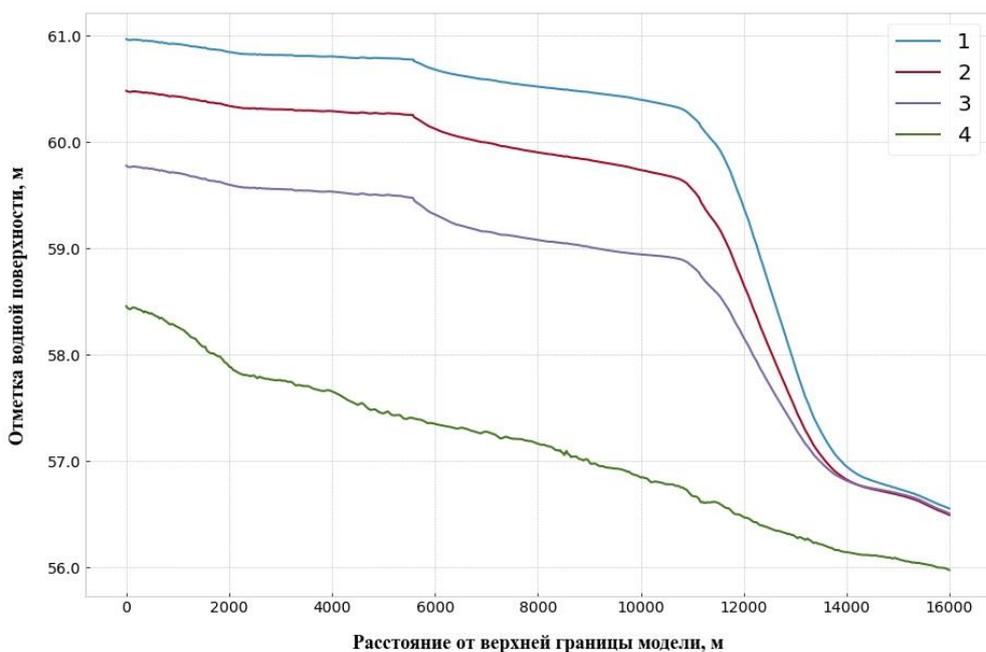


Рисунок 7. Продольный профиль высотных отметок водной поверхности от верхней границы модели по реке Сухона до места слияния с рекой Юг при уровне воды 1% обеспеченности и в случае:

1 – строительства дамбы по первоначальному проекту и наличия ледового затора, 2 – строительства дамбы по актуальному проекту и наличия ледового затора, 3 – без строительства дамбы и наличия ледового затора, 4 – без строительства дамбы и в отсутствие затора

В разделе 5.2 описана методика долгосрочного прогнозирования возникновения ледового затора на основе методов машинного обучения. В качестве примера автоматического прогнозирования ледового затора была разработана модель на основе алгоритма метрического KNN-метода (K Nearest Neighbor), основанного на гипотезе компактности, близости схожих объектов. При построении признаков использовались данные со следующих 6 гидрологических постов: г. Великий Устюг, г. Котлас, г. Тотма, д. Каликино, д. Березовая Слободка, пос. Подосиновец; и метеоданные по 3 метеостанциям: с. Нюксеница, г. Никольск и г. Великий Устюг. Всего было отобрано 10 наиболее значимых признаков, характеризующих особенности водного режима и погодных условий. При построении признаков использовались данные об осенних условиях замерзания реки, например, предледоставный уровень воды или продолжительность замерзания. Это позволило улучшить качество модели. С учетом данных о толщине льда, заблаговременность прогноза составила 1 месяц. 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 произведена проверка итоговой модели. Число правильно классифицируемых лет составило 85% (рисунок 8).

В разделе 5.3 приводится описание системы ПРОСТОР (Прогнозирование Развития Опасных Ситуаций на Территории в Оперативном Режиме), разрабатываемой в рамках проекта РФФ №17-11-01254 силами СПИИРАН, кафедры гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и ИВП РАН с участием автора.

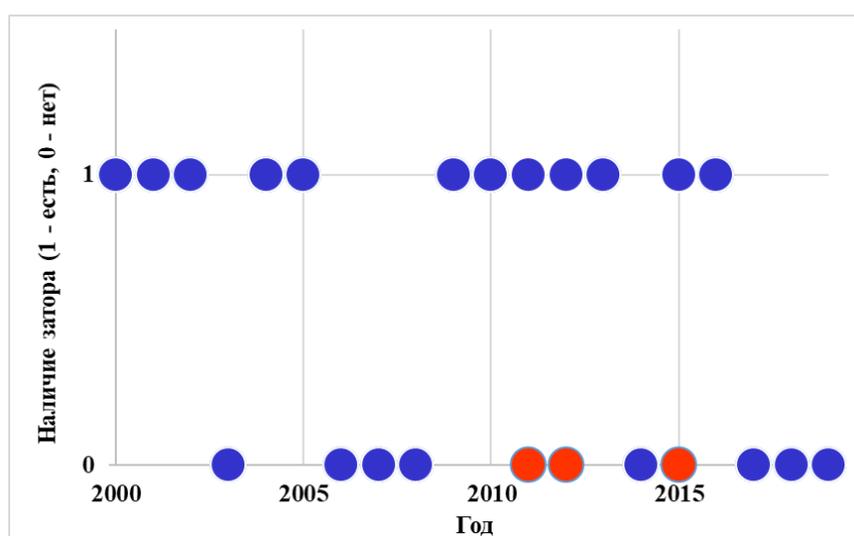


Рисунок 8. Результат верификации модели прогнозирования ледового затора в районе г. Великий Устюг на основе KNN-метода (синий цвет — оправдавшийся прогноз, красный цвет — ошибка модели)

Информационно-аналитическая система ПРОСТОР полностью автоматизирована, в том числе она способна в автоматическом режиме ассимилировать данные с самописцев уровня воды с гидрологических постов. В настоящее время в оперативном режиме при использовании данных гидрологических постов и гидродинамической модели система каждый час формирует прогноз зоны затопления на 24 часа; увеличение заблаговременности связано с прогнозами расходов воды на основе модели ЕСОМАГ при использовании данных метеорологических прогнозов.

Автор диссертационной работы принимал участие 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 ЕСОМАГ 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.

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.

Разработанная система ПРОСТОР была успешно апробирована в половодье 2019 г., а также на основе имитационных расчетов для выдающегося половодья 2016 г.

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 РФФИ № 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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных п. 2.3.

**Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени
М.В. Ломоносова**

По результатам диссертационной работы опубликовано **32 работы**, в том числе **9 статей в рецензируемых российских и зарубежных научных изданиях**, определенных п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. Modeling ice-jam floods in the frameworks of an intelligent system for river monitoring / I. Krylenko, A. Alabyan, A. Aleksyuk, V. Belikov, **A. Sazonov**, E. Zavyalova, I. Pimanov, S. Potryasaev, V. Zelentsov // *Water Resources*. — 2020. — Vol. 47, no. 3. — P. 387–398. DOI: 10.1134/s0097807820030069. (WoS, SCOPUS, IF 0.556)

2. Two-dimensional hydrodynamic modeling of residential areas flooding using a highly detailed computational mesh / **A. Sazonov**, I. Krylenko, A. Rumyantsev et al. // *E3S Web of Conferences*. — 2020. — Vol. 163. — P. 1–5. DOI: 10.1051/e3sconf/202016301010. (SCOPUS, IF 0.52)

3. 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. (SCOPUS, IF 0.52)

4. Application of the synthesis of mathematical models to study the characteristics of flooding of the Northern Dvina river / **A. A. Sazonov**, I. N. Krylenko, A. N. Amerbaev et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 263. — P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/263/1/012016.

5. Modeling the scenarios of catastrophic flood on the river of the Northern Dvina / **A. A. Sazonov**, I. N. Krylenko, A. N. Amerbaev et al. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 263. — P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/263/1/012056.

6. Верификация двумерной гидродинамической модели р. Лены у г. Якутск по разновременным данным космической съемки / Е. Д. Корнилова, И. Н. Крыленко, П. П. Головлев, **А.А. Сазонов** и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2018. — Т. 15, № 5. — С. 169–178. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-169-178. (SCOPUS, WoS)

7. 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, no. S1. — P. 171–188. DOI: 10.1007/s11069-016-2580-x. (WoS, SCOPUS, IF 2.427)

8. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment / N. L. Frolova, M. B. Kireeva, D. V. Magritckiy, **A.A. Sazonov** et al. // Natural Hazards. — 2017. — Vol. 88, no. 1. — P. 103–131. DOI: 10.1007/s11069-016-2632-2. (WoS, SCOPUS, IF 2.427)

9. Two-dimensional hydrodynamic flood modelling for populated valley areas of Russian rivers / V. V. Belikov, I. N. Krylenko, A. M. Alabyan, **A.A. Sazonov** et al. // Proceedings IAHS, Changes in Flood Risk and Perception in Catchments and Cities. — Vol. 370. — 2015. — P. 69–74. DOI: 10.5194/piahs-370-69-2015. (SCOPUS)

По теме диссертации опубликованы также **23** работы в сборниках тезисов и материалов российских и международных конференций, а также в других рецензируемых журналах. Их полный список доступен на странице соискателя в ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/profile/SazonovAA/>.