

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»



На правах рукописи

СУМАЧЕВ АЛЕКСАНДР ЭДУАРДОВИЧ

Совершенствование методов прогнозирования характеристик ледового
режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей

Специальность 1.6.16 – Гидрология, водные ресурсы, гидрохимия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.г.н., Л.С. Банщикова

Санкт-Петербург – 2022

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Исследуемый регион и состояние изученности проблемы	9
1.1. Физико-географическое описание исследуемого региона.....	9
1.2. Гидрологическая изученность исследуемого региона.....	11
1.3. Состояние изученности проблемы.....	15
Глава 2. Климатическая характеристика изучаемого региона	24
2.1. Общие сведения о климате изучаемого региона	24
2.2. Многолетние колебания температуры воздуха за холодный сезон	26
2.3. Перспективные климатические изменения	39
Глава 3. Особенности ледового режима рек бассейнов Белого и Баренцева морей в условиях современного климата	45
3.1 Ледовый режим рек в период замерзания.....	45
3.2. Ледовый режим в период ледостава	64
3.3. Ледовый режим в период вскрытия	80
3.4. Влияние изменений климата на ледовый режим и долгосрочный прогноз характеристик ледового режима.....	93
3.5. Классификация участков рек по степени стохастичности формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода	97
Глава 4. Повторяемость и риски опасных ледовых явлений	102
4.1. Современное представление об опасных ледовых явлениях.....	102
4.2. Расчетные формулы для определения потенциальных рисков опасных гидрологических явлений	103
Глава 5. Особенности прогнозирования элементов ледового режима рек различных типов, разработка и верификация нейросетевых моделей прогнозирования.....	111
5.1 Особенности прогнозирования сроков формирования фаз ледового режима.....	111
5.2. Используемые подходы к прогнозированию высшего уровня воды за период весеннего ледохода и критерии оценки качества выпускаемых прогнозов.....	112
5.3. Особенности прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода на реках первого типа	116
5.4. Особенности прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода на реках второго и третьего типа.....	118
5.5. Верификация нейросетевых моделей прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода.....	131
Заключение	139
Список литературы.....	141
Приложения.....	156

Введение

Актуальность темы. Вследствие особенностей географического положения Российской Федерации ледовые явления характерны для большинства рек, при этом наиболее полно они проявляются на территории регионов, расположенных на севере страны. Для ведения рациональной хозяйственной деятельности и минимизации негативных последствий от опасных гидрологических явлений (ОГЯ) в холодный период года необходимо всестороннее изучение ледового режима рек и развитие методов прогнозирования его элементов.

В настоящее время, с одной стороны, сложилось понимание процессов, протекающих в речной системе, и разработаны теоретические модели, способные с большой точностью их описать, с другой стороны, использование данных моделей на практике осложняется влиянием стохастической природы формирования многих гидрологических явлений. Поэтому чаще всего используются эмпирические модели, которые подразумевают аппроксимацию исходных данных.

Одним из перспективных подходов является применение метода обучения искусственных нейронных сетей при прогнозировании различных гидрологических характеристик. Основываясь на результатах, приведенных в различных зарубежных и отечественных научных публикациях, можно заключить, что применение данного метода показало хорошие результаты при прогнозировании расходов и уровней воды, однако в отечественной гидрологической практике, в частности в ледовых прогнозах, искусственные нейронные сети применяются редко.

Таким образом, разработка и совершенствование методов прогнозирования элементов ледового режима на основе методов обучения искусственных нейронных сетей является актуальной научной и практической задачей.

Объекты и предмет исследования. Объектом изучения являются крупные реки Европейского Севера Российской Федерации, принадлежащие бассейнам Белого и Баренцева морей, а именно: бассейны рек Онеги, Северной Двины, Мезени, Печоры, Лоты, Колы, Вороньей, Поноя, Варзуги, а также озеро Лача. В

административном отношении исследуемая территория относится к Архангельской, Вологодской и Мурманской областям, Республике Коми, Ненецкому автономному округу; таким образом, все изучаемые реки полностью или частично относятся к Арктической зоне Российской Федерации.

Предметом исследования являются характеристики ледового режима, а также прогностические закономерности формирования фаз ледового режима и высших уровней воды за период весеннего ледохода.

Материалы и методы исследования.

В работе проанализированы данные регулярных наблюдений по 64 гидрологическим и 44 метеорологическим станциям и постам. Используются следующие данные гидрометеорологического мониторинга сети Росгидромета: среднесуточные и среднемесячные значения температуры воздуха, среднесуточные и срочные значения уровней воды, данные наблюдений за ледовым режимом и толщиной льда. Для рек бассейна Северной Двины, помимо вышеперечисленных характеристик, проанализированы среднесуточные расходы и уровни воды. Базы данных характеристик ледового режима, созданные в рамках настоящего исследования, организованы по следующему принципу: по данным среднесуточных наблюдений за уровнем воды и ледовой обстановкой выбраны даты и соответствующие им уровни воды при образовании и разрушении тех или иных ледовых явлений; по данным срочных наблюдений — даты и высшие уровни воды за период ледостава, осеннего и весеннего ледоходов, зажоров и заторов льда; по данным пентадных наблюдений — максимальные толщины льда. Таким образом, разработанная и зарегистрированная база данных содержит количественную информацию о датах и характерных уровнях воды за период замерзания, ледостава и вскрытия, а также данные по максимальной толщине льда.

Для построения и обучения искусственных нейронных сетей была применена командная оболочка для интерактивных вычислений *Jupyter Notebook* и язык программирования *Python 3* с библиотеками *TensorFlow* и *Keras*, предназначенными для создания и обучения глубоких нейронных сетей.

Обучение однослойных нейронных сетей и кластерный анализ данных осуществлялся в программе *Statistica 12*.

Цель работы состояла в разработке современного научно-методического подхода к прогнозированию характеристик ледового режима на примере рек бассейнов Баренцева и Белого морей.

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

1. сформировать базу данных характеристик ледового режима рек Баренцева и Белого морей, опасных его проявлениях и факторах, его определяющих. Провести статистическую обработку гидрометеорологических данных, дать оценку степени изменения климата и влияния этих изменений на ледовый режим рек бассейнов Баренцева и Белого морей;

2. создать классификацию участков рек по условиям формирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода;

3. разработать методику, позволяющую выполнять оценку и сравнение потенциальных рисков различных опасных гидрологических явлений заданной обеспеченности;

4. определить зависимости и оптимальный предиктивный состав моделей для прогнозирования характеристик ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей. Оценить возможность и целесообразность применения методов обучения искусственных нейронных сетей для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода, выработать методические рекомендации по применению искусственных нейронных сетей в качестве инструмента прогнозирования.

Научная новизна исследования.

Заключается в разработке комплексного подхода к прогнозированию и предупреждению опасных проявлений ледового режима рек Севера Европейской территории Российской Федерации, основанного на разработанной непосредственно автором классификации участков рек и методике оценки потенциальных рисков опасных гидрологических явлений.

Практическая значимость. Полученная оценка изменения ледового режима рек, а также разработанная методика оценки потенциальных рисков

опасных гидрологических явлений и прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода обеспечивают предупреждение возникновения чрезвычайных ситуаций и уменьшение ущерба, наносимого опасными гидрологическими явлениями. Рекомендации по разработке и обучению искусственных нейронных сетей и предложенная классификация рек могут использоваться специалистами-гидрологами при разработке прогностических методик. Результаты диссертации, связанные с методическими подходами к прогнозированию характеристик ледового режима и применением искусственных нейронных сетей при прогнозировании высшего уровня воды за период весеннего ледохода, нашли отражение в учебном процессе при подготовке гидрологов (магистров) Российского государственного гидрометеорологического университета по направлению подготовки 05.04.05 «Прикладная гидрометеорология». Результаты диссертации, связанные с методическими подходами к оценке потенциальных рисков опасных гидрологических явлений, учтены при оценке зон затопления на реках Роста и Варзуга.

Наиболее существенные результаты исследования, полученные впервые, обладающие научной новизной и выносимые на защиту.

1. На основе анализа пространственно-временной изменчивости численных характеристик ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей за период наблюдений с 1950 по 2018 год в условиях нестационарного климата установлено статистически значимое уменьшение периода с ледовыми явлениями, длительности устойчивого ледостава, максимальной толщины льда, для различных фаз ледового режима актуализированы характерные сроки и уровни воды.

2. Выявлено три типа участков рек в зависимости от степени стохастичности формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода. Определены основные факторы и осуществлена количественная оценка их влияния на условия формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода. Обоснована целесообразность применения разработанной классификации при определении оптимального предиктивного состава прогностических моделей.

3. Модернизирована ранее разработанная в ФГБУ «ГГИ» методика оценки потенциальных рисков заторных наводнений. Предложенная методика позволяет выполнять оценку и сравнительный анализ потенциальных рисков различных гидрологических явлений заданной обеспеченности и предназначена для выявления наиболее опасных гидрологических явлений для отдельных участков рек и пойм.

4. На участках рек с динамическим типом формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода различного генезиса обоснована целесообразность использования стандартизированной инерционной методики, на участках рек со стохастическим и стохастико-динамическим типом формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода различного генезиса — метода обучения искусственных нейронных сетей в качестве инструмента прогнозирования.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности результатов подтверждается использованием официальной гидрологической и метеорологической информации, а также общепринятых и рекомендованных Гидрометцентром России критериев для оценки качества прогностических методик.

Апробация работы подтверждается рядом научных публикаций и устных докладов на международных и всероссийских конференциях, заключениями экспертных семинаров.

Материалы работы доложены на секции ученого совета Гидрометцентра России (2022 г.), на II (2018 г.), III (2019 г.) конференциях «Гидрометеорология и экология достижения и перспективы развития», международной научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ» в 2020 году, всероссийской научной конференции с международным участием «Экология и Климат» в 2020 году, в 2021 году на IV Всероссийской конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии».

В рамках конкурсов грантов для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов, отраслевых и академических

институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга, в 2020 году по проекту «Разработка методики прогнозирования максимального ледоходного уровня на примере реки Печоры», и в 2021 году по автореферату диссертационной работы присуждены две премии правительства Санкт-Петербурга.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тема диссертационного исследования и его содержание соответствуют требованиям паспорта специальности ВАК 1.6.16 — Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия по следующим пунктам: п. 10. — «Опасные гидрологические явления – наводнения, маловодья, ледовые явления. Факторы и закономерности их проявления. Научные основы обеспечения гидроэкологической безопасности территорий и хозяйственных объектов, экономически эффективного и экологически безопасного водопользования и водопотребления, планирования хозяйственной деятельности в областях повышенного риска опасных гидрологических процессов, защиты водных объектов от истощения, загрязнения, деградации. Создание научной основы обеспечения оптимальных условий существования водных и наземных экосистем», п. 11 — «Методы расчета и прогноза характеристик водного баланса, стока воды, взвешенных и влекомых наносов, химических веществ; оценка влияния хозяйственной деятельности и климатических изменений на сток и гидрологические процессы, на экологическое состояние водных объектов, п. 12 — «Математическое моделирование гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов в речных бассейнах, руслах рек, водоемах суши. Использование геоинформационных систем и дистанционных методов в гидрологии».

Личный вклад автора. Сбор актуальных гидрометеорологических данных, анализ современного состояния климата, проведение расчетов и численных экспериментов, обработка и интерпретация полученных результатов, разработка классификации рек, методики оценки потенциальных рисков различных опасных гидрологических явлений и методик прогнозирования характеристик ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей выполнены автором лично.

Публикации. По теме работы опубликовано 16 печатных работ, из них 5 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 5 глав, введения, заключения и 5 приложений. Объем работы составляет 173 с., включая 40 рисунков и 6 таблиц, библиографический список содержит 147 источников.

Благодарности. Автор выражает благодарность коллегам из Государственного гидрологического института, Санкт-Петербургского государственного университета, Российского государственного гидрометеорологического университета.

Глава 1. Исследуемый регион и состояние изученности проблемы

1.1. Физико-географическое описание исследуемого региона

В настоящей работе рассмотрен ледовый режим рек и многолетняя вариация температуры воздуха Европейского Севера Российской Федерации. В административном отношении в исследуемую территорию входит несколько крупных административных областей: Архангельская область и Ненецкий автономный округ (без арктических островов), Республика Коми, Вологодская область (без западной ее части), все вместе перечисленные регионы часто называются Северным Краем, а также Мурманская область. Таким образом, вся исследуемая территория в административном отношении полностью или частично относится к Арктической зоне Российской Федерации. Гидрометеорологическое обеспечение Северного края осуществляется Северным УГМС Росгидромета (г. Архангельск), Кольского полуострова — Мурманским УГМС Росгидромета. В работе рассмотрен ледовый режим основных водных систем Северного края и Кольского полуострова. Для Северного края это Печора, Северная Двина, Онега, Мезень, Кольского полуострова — Поной, Кола, Воронья, Варзуга, Умба.

Река Печора — крупнейшая водная артерия исследуемой территории, характеризующаяся наибольшим стоком и множеством крупных притоков, которые оказывают существенное влияние на водный и ледовый режим основной реки. Верхнее течение реки характеризуется переменным рельефом: до Усть-Уньи он преимущественно горный, после чего постепенно переходит в равнинный. Считается, что верхнее течение реки Печоры закачивается у с. Усть-Ильич, где сток реки практически удваивается. Среднее течение характеризуется

переменным направлением течения — до реки Усы Печора течет преимущественно на север, после поворачивает на запад и течет так до впадения реки Цильмы, после впадения которой снова поворачивает на север. После впадения Цильмы начинается нижнее течение реки. В 130 км от устья Печора делится на два рукава — восточный (Большая Печора) и западный (Малая Печора). Ниже, в районе Нарьян-Мара, река образует дельту шириной около 45 км и впадает в Печорскую губу. Сгонно-нагонные течения распространяются на юг до ГП Оксина [Ильина, Грахов, 1987; Гидрологическая изученность..., 1965].

Река Онега вытекает из озера Лача и в верхнем своем течении подвергается озерному регулированию. На гидрологический, а в особенности на ледовый режим реки Онеги в верхнем течении оказывают существенное влияние многочисленные пороги. В среднем и нижнем течении на ледовый режим Онеги уже практически не оказывают влияния вышерасположенные участки и впадающие, относительно маловодные, притоки. Устьевая область реки включает в себя часть нижнего течения реки и прилегающую к устью реки часть вершины Онежского залива. Протяженность устьевого участка реки около 30 км. Устьевой участок одорукавный, и по своим геоморфологическим характеристикам приближается к эстуарию [Ильина, Грахов, 1987; Гидрологическая изученность..., 1965].

Река Северная Двина начинается слиянием рек Сухоны и Юг, образуя, так называемую, Малую Северную Двину, по длине реки в нее впадают многочисленные притоки, крупнейшими из которых являются реки Вычегда, Вага и Пинега, которые во многом определяют ледовый режим Северной Двины. Длина — 744 км (с учетом Сухоны, как основной составляющей — 1302 км. Площадь водосборного бассейна — 357 тысяч км². Самый верхний участок реки длиной 74 км от слияния Сухоны и Юга до впадения Вычегды носит название Малая Северная Двина. В пределах Северной Двины расположены крупные речные порты — Котлас и Архангельск [Ильина, Грахов, 1987; Гидрологическая изученность..., 1965].

Река Мезень берет свое начало из болот на западных склонах Тиманского кряжа (Республика Коми). В верховьях река Мезень часто меняет направление

течения. Река Вашка, протекая по сильно залесенным территориям, напротив направления течения не меняет и течет строго с юга на север. Впадая в реку Мезень с левого берега при среднем многолетнем расходе порядка 180 м³/с, Вашка является крупнейшим притоком Мезени. Верхнее течение Мезени характеризуется высокой зарегулированностью со стороны многочисленных болотных массивов, нижнее же течение находится под сильным влиянием приливных и сгонно-нагонных течений, которые могут распространяться на 60 километров выше по течению Мезени, в связи с этим вся река характеризуется достаточно специфическим ледовым режимом [Ильина, Грахов, 1987; Гидрологическая изученность..., 1965].

На гидрологический режим рек Кольского полуострова значительное влияние оказывает ландшафт местности. Холмисто-горный рельеф Кольского полуострова обуславливает большие уклоны местности и, как следствие, высокие скорости течения и многочисленные пороги, что сильно отражается на ледовом режиме. При этом в понижениях местности, в силу избыточной увлажненности, формируются озера, а отдельные участки местности заболачиваются. Поэтому большинство рек Кольского полуострова на своем пути встречают ряд озер, что делает их, по своей сути, озерно-речными системами [Гидрологическая изученность..., 1969]. Большое влияние на ледовый режим рек Кольского полуострова оказывает относительно теплый морской климат побережья Баренцева моря и относительно суровый климат центральной части Кольского полуострова. Крупнейшие реки Поной, Кола, Воронья, Варзуга, Умба. В виду географических особенностей для рек Кольского полуострова характерны следующие общие признаки: сильная зарегулированность на всем протяжении, повышенная повторяемость зажоров и заторов льда, ограниченное влияние климатических факторов на ледовый режим, высокие, как правило, незатопляемые берега.

1.2. Гидрологическая изученность исследуемого региона

Исследуемая территория в гидрологическом отношении является достаточно изученной. Часть исследуемой территории Северного и вся территория Мурманского УГМС при этом относится к Арктической зоне

Российской Федерации. Гидрологическая сеть изучаемого региона густая и покрывает все крупные и большинство средних и малых рек. Всего на исследуемой территории на 2019 год действует 242 речных наблюдательных подразделений. В пределах Двинско-Печорского бассейнового округа Северного УГМС — 192 речных и 5 озерных; на территории Мурманского УГМС — 33 речных и 12 озерных наблюдательных подразделений [Обзор состояния системы..., 2020, Обзор состояния системы..., 2021]. Количественный состав действующей наблюдательной сети Росгидромета сокращается, что негативным образом сказывается на состоянии и качестве проводимых наблюдений. Так как часть исследуемого региона относится к Арктической зоне Российской Федерации, вопрос состояния наблюдательной сети и ее модернизации является широко освященным. В частности, вопрос состояния и развития гидрологической сети в Арктической зоне РФ рассматривается в ежегодных отчетах ФГБУ «ААНИИ» и статьях [Обзор состояния и работы гидрологической сети..., 2019; Обзор состояния и работы гидрологической сети..., 2020; Обзор состояния и работы гидрологической сети..., 2021; Штанников, Муждаба, 2018]. В приведенных работах констатируется, что в пределах исследуемой территории сокращение наблюдательной сети в большей степени затронуло Мурманское УГМС, где только в 2018 году было закрыто 18 законсервированных наблюдательных подразделений, при этом против закрытия законсервированной наблюдательной сети резко против выступают сотрудники ФГБУ «ААНИИ», что находит отражение в соответствующих отчетах. Консервация и сокращение, в том числе и фактически работающей, наблюдательной сети Мурманского УГМС привело к значительным пропускам в многолетних рядах наблюдений. Так, пропуски в данных наблюдений имеются по всем рассмотренным постам, что осложняет разработку надежных прогностических моделей. Были закрыты важные гидрологические пункты на реках Поной, Воронья, Варзуга, Лотта и Кола, лишь сравнительно недавно возобновил работу гидрологический пост «1429-ый км Октябрьской ж.д.», расположенный на реке Кола. На реках Поной, Воронья, Кола, Лота закрыты посты, расположенные в нижнем течении. При этом на большинстве рек осталось по одному фактически работающему

гидрологическому посту, при этом даже среди них наблюдаются систематические пропуски данных. Таким образом, состояние данных многолетних наблюдений на реках Кольского полуострова можно признать неудовлетворительным.

С другой стороны, в настоящее время наметилась противоположная тенденция, которая заключается в продолжающейся модернизации сети Росгидромета и техническом перевооружении. В этом отношении территория Европейской Севера Российской Федерации является в более выгодном положении, а Мурманская область является лидером по количеству автоматизированных гидрологических комплексов (далее — АГК) и других современных приборов, так на балансе Мурманского УГМС числится 17 АГК из которых 15 фактически работает, для сравнения на все Северное УГМС приходится всего 20 АГК, из которых 3 не работает. Таким образом, в процентном отношении Мурманское УГМС является намного более оснащенным современными средствами измерения [Обзор состояния и работы гидрологической сети..., 2019; Обзор состояния и работы гидрологической сети..., 2020; Обзор состояния и работы гидрологической сети..., 2021; Штанников, Муждаба, 2018]. Данная тенденция хоть и не исправляет сложившуюся ситуацию с данными многолетних наблюдений, но свидетельствует об усилении внимания к данному региону, что в долгосрочной перспективе должно улучшить качество и состав наблюдений.

Качество и состав наблюдений, производимых в пределах Двинско-Печорского бассейнового округа Северного УГМС, находится на сравнительно высоком уровне. Данные многолетних наблюдений по всем видам наблюдений практически не имеют пропусков, что позволяет использовать их как для количественного и качественного анализа ледового режима рек, так и для разработки надежных прогностических моделей. Из недостатков данных многолетних наблюдений можно отметить лишь эпизодические пропуски тех или иных измерений. На некоторых гидрологических постах отмечаются пропуски наблюдений длиной в 10 и более лет, но возобновление наблюдений и наличие достаточно густой гидрологической сети позволят в случае необходимости легко восстановить имеющиеся пропуски. Отдельно стоит отметить прекращение с 2014

года публикации в ежегодных изданиях Государственного водного кадастра суточных данных по гидрологическому посту, расположенному в городе Великий Устюг и закрытие в 2001 году достаточно важного гидрологического поста на Северной Двине в районе города Медведки.

Для хранения и анализа необходимой гидрологической информации была разработана типовая форма и созданы две базы данных, содержащие основные характеристики ледового режима рек и одна база данных, содержащая среднесуточные расходы и уровни воды Северной Двины. В настоящей работе собраны и проанализированы данные по 64 гидрологическим постам Северного и Мурманского УГМС (рис. 1.2.1).



Рис. 1.2.1 Схема расположения гидрологических станций и постов в пределах изучаемого региона.

Метеорологическая сеть в исследуемом регионе достаточно развита и имеет длительные ряды наблюдений за температурой воздуха и осадками, что позволяет оценить современное состояние климата и климатические изменения. Небольшое расстояние, а в ряде случаев и совпадение расположения

метеорологических и гидрологических станций и постов позволяет с высокой точностью оценить влияние изменений климата на ледовый режим рек, а также производить совместные расчеты. В работе рассмотрены данные по 44 метеорологическим станциям (рис. 1.2.2).

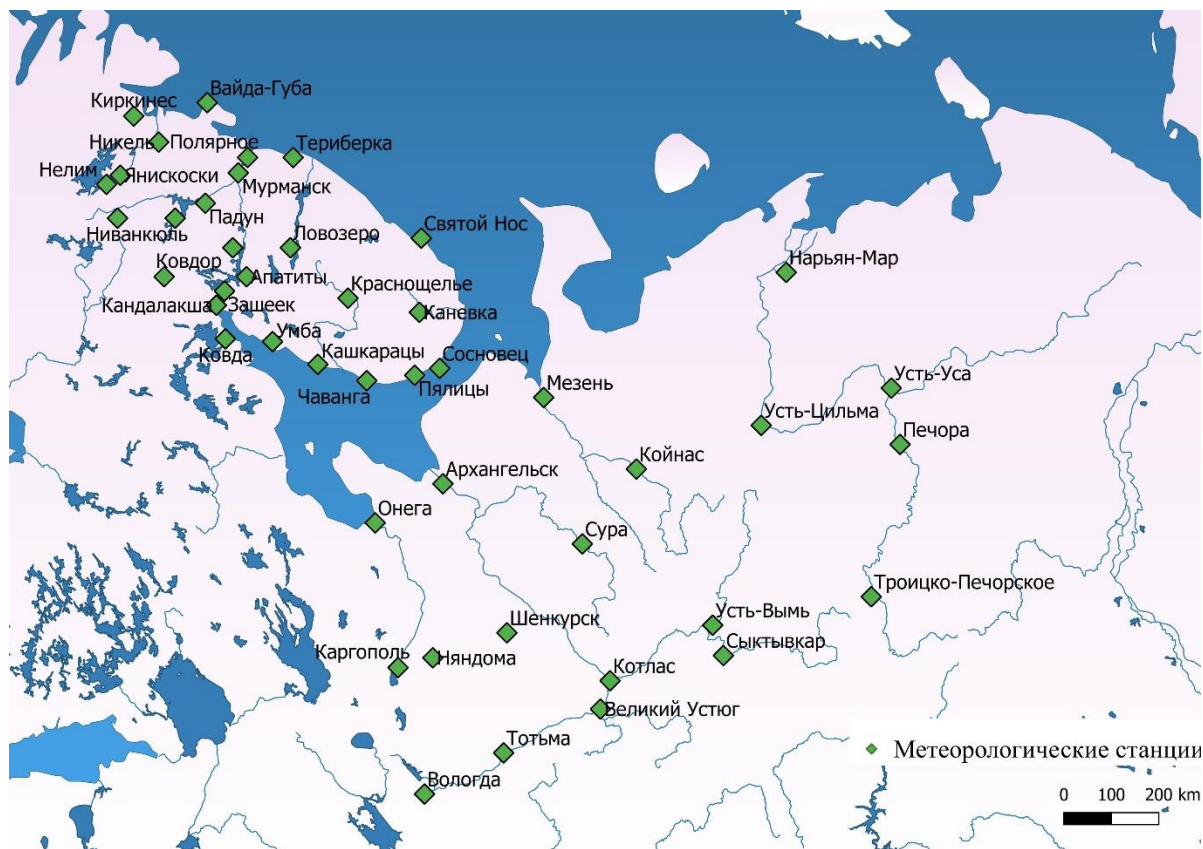


Рис. 1.2.2. Схема расположения метеорологических станций в пределах изучаемого региона.

Выше указанные базы данных были зарегистрированы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности (свидетельство о государственной регистрации баз данных №№ 2019621036, 2021621902, 2021621912), что говорит об успешном выполнении поставленной в настоящей работе задачи создания баз данных об характеристиках ледового режима рек Двинско-Печорского бассейнового округа и Кольского полуострова.

1.3. Состояние изученности проблемы.

Большинство методик прогнозирования заторных уровней воды, в том числе используемые на наблюдательной сети Росгидромета, основаны на исследованиях, проведенных еще в конце XX в. Таким образом, в

прогностических уравнениях не отражены гидрологические и климатические изменения последних десятилетий. В ежегодном отчете ФГБУ «ААНИИ» о состоянии наблюдательной сети Арктической зоны Российской Федерации за 2018 год прямо говорится об неактуальности прогностических зависимостей: «Ныне существующие методики, используемые в подразделениях Росгидромета для ледовых прогнозов и связанных с ними опасных явлений, в основном, базируются на эмпирических или статистических зависимостях, которые в настоящее время не достаточно надежны или не работают вовсе, главным образом из-за значительного сокращения оперативной гидрометеорологической информации и климатических изменений в Арктике» [Обзор состояния и работы гидрологической сети..., 2019].

Климат и климатические изменения и его влияние на гидрологический и ледовый режим описан во многих работах. К примеру, в 2014 году издан обобщенный доклад по изменению климата [МГЭИК, 2014; Второй оценочный доклад..., 2014]; в статье [Суркова, Крылова, 2017] описано современное состояние климата Арктики и его влияние на вариацию гидротермических ресурсов.

Большой вклад в развитие методов расчета и прогноза элементов ледового режима рек внесли Р.А. Нежиховский, Р.В. Донченко, В.А. Бузин, М.А. Жукова, В.В. Кильмянинов. В настоящее время для прогноза максимальных уровней воды при образовании заторов в руслах рек в основном применяются общие для группы рек и локальные эмпирические зависимости максимальных заторных уровней воды от факторов, определяющих процесс образования заторов, установленные по данным наблюдений на сети Росгидромета. Как правило, общие зависимости обусловлены подобием условий вскрытия рек и гидрологической аналогичностью рек. При использовании этих зависимостей в расчетах и прогнозах основная проблема возникает при определении местоположения скопления льда в конкретный год относительно расчетного створа. Местоположение головы затора на заторных участках рек от года к году может изменяться, и это значительно затрудняет прогнозирование развития заторов по данным конкретного постоянного гидрологического поста. Поэтому для каждого года к моменту

начала ледохода надо установить на каком расстоянии от поста образуется затор. Данный вопрос подробно рассмотрен в диссертационной работе Банщиковой Л. С. [Банщикова, 2009], где для решения поставленной проблемы определения головы затора использовано графоаналитическое решение уравнения Сен-Венана и была предложена методика определения местоположения заторов льда путем отслеживания хода уровней воды на гидрологических постах. Суть методики заключается в построении графика равных уровней воды по длине реки в координатах времени и длины реки, что было впервые предложено в работах Н.М. Бернадского и В.С. Антонова [Бернадский, 1933; Антонов, Маслаева, 1965]. Такой подход значительно расширяет возможности графоаналитического анализа, так как графики содержат информацию об изменении уровней воды любого створа на любую дату, уклонах водной поверхности, местах образования заторов льда и другие важные сведения. С использованием данной методики по перепадам уклонов водной поверхности можно определить место значительного уменьшения пропускной способности русла из-за заторов или зажоров льда. Так, при свободном состоянии русла ход расходов воды повторяет ход уровней, а значения уровней воды в абсолютной системе отсчета снижаются к устью. В случае образования затора или зажора льда наблюдается искажение уклона водной поверхности: выше затора уровни значительно повышаются, расходы при этом уменьшаются; ниже образования затора льда уровни понижаются или не изменяются, что отражается на графике в виде искажения изолиний. Данная методика была верифицирована на реке Лене и Северной Двине, а также при определении мест зажорных скоплений на реке Неве [Банщикова, Сумачев, 2019].

Прогнозы максимальных заторных уровней для участков рек с постоянным местом формирования заторов выполняются по эмпирическим моделям, разработанным для конкретных участков рек и гидрологических постов, при этом подразумевается неизменность места формирования затора льда. Первая подобная методика прогнозирования заторных уровней была предложена Л.Г. Шуляковским и В.И. Еременой. Позже И.Я. Лиссером разработана методика для прогнозирования заторных уровней для ряда рек Сибири (Енисей, Обь и др.). Р. А. Нежиховским разработаны прогностические методики заторных уровней для

рек Великая, Неман, Северная Двина и других, В.А. Бузиным — для рек Лена, Уссури, Северная и Западная Двина, Верхний Амур, Днестр и др. В.Н. Карновичем — для рек Ангара, Днестр, Северная Двина; В.В. Кильмянинов — для рек Якутии [Банщикова, 2009].

Изучению ледового режима в период замерзания, процессов образования внутриводного льда и шуги посвящены работы В.Я. Альтберга, В.В. Пиотровича, В.А. Рымшы, А.Н. Чижова и др.; в период ледостава, в том числе вопросу нарастания толщины льда – Ф.И. Быдина, С.Н. Крицкого, М.Ф. Менкеля, К.И. Россинского, А.И. Чеботарева, А.Г. Шуляковского [Донченко, 1987; Одрова, 1979]. Исследованием процессов разрушения ледяного покрова под влиянием тепловых и механических факторов занимались В.П. Берденников, К.Н. Коржавин, Д.Н. Панфилов, В.В. Пиотрович и др. Существенный вклад в изучение процессов вскрытия рек внесли С.Н. Булатов и Л.Г. Шуляковский [Шуляковский, Еремина, 1952]. В дальнейшем теория процесса разрушения ледяного покрова получила развитие в исследованиях В.А. Бузина [Бузин, 2004; Бузин, 2001; Бузин, 1989; Бузин, 1995; Бузин, 2000; Бузин, 1980; Бузин, Банщикова, 2007; Бузин, 2008; Бузин, Копалиани, 2008] и была использована для прогнозной оценки возможных изменений сроков вскрытия рек под влиянием изъятия части стока. В прошлых и современных исследованиях процессов замерзания и вскрытия рек большое внимание уделяется изучению зажорных и заторных явлений [Бузин, 2004, Дебольский и др. 2004; Деев, Попов, 1978; Донченко и др., 1982; Кильмянинов, 2001; Кильмянинов, 1987; Кильмянинов, 2002; Лисер, 1967; Нежиховский, Саковская, 1975; Попов, 1968, (б); Софер, 1967; Чижов, 1975]. В 1970—2002 гг.

Методам прогноза сроков замерзания и вскрытия посвящены работы Гинзбурга Б. М. [Гинзбург, Солдатова, 1997], Солдатовой И. И. [Солдатова, 1996 (а); Солдатова, 1996 (б)] и Савченко Е. И. [Савченко, 1974]. Методы прогноза сроков замерзания и вскрытия рек севера ЕТР рассматривались в работах сотрудников ААНИИ (для низовьев рек и их устьевых областей). Возможные изменения ледового режима в последние десятилетия в связи с изменением климата оценивались Б.М. Гинзбургом [Гинзбург и др., 1992; Гинзбург, Солдатова, 1997], И.И. Солдатовой [Солдатова, 1996(а); Солдатова, 1996(б)], В.С.

Вуглинским [Вуглинский, Гронская, 2006; Vuglinsky V. et al., 2017 Vuglinsky V. et al, 2018] и др. Опасным явлениям, в том числе гидрологическим, посвящены работы А.Б., С.С. Гинко [Гинко, 1977], С.М. Мягкова [Мягков, 1995], Р.А. Нежиховского [Нежиховский, Саковская, 1975; Нежиховский, 1990], А.В. Рождественского [Рождесвенский и др., 2002], И.Н. Русина [Русин, 2003], А.А. Таратурина [Татулин, 2000] и др.

В современных исследованиях ледовый режим, в части касающейся заторов и зажоров, рассмотрен в работах В.А. Бузина. В монографии «Зажоры и заторы льда на реках России», выпущенной в 2015 году, обобщены и систематизированы результаты исследований заторов льда, рассмотрена теория процесса формирования ледяных скоплений, методики прогнозирования и расчета максимальных заторных уровней. А. Т. Зиновьев рассматривает вопросы качественного и количественного описания ледовых процессов и явлений на реках, в том числе в условиях их зарегулирования. В работах А.Т Зиновьева приводятся методы расчета и прогноза формирования и разрушения ледового покрова на реках и водохранилищах, движения кромки льда в нижних бьефах гидроэлектростанций, образования зажоров и заторов и ледовых наводнений на реках при их замерзании и вскрытии [Зиновьев, 2014; Бузин, Зиновьев, 2009; Атавин, Зиновьев, 2004].

В последние десятилетия во многих работах по изучению ледового режима в условиях изменяющегося климата рассматриваются не только методы прогнозирования, но и ледовый режим водных объектов в целом. Оценка пространственно-временной динамики толщины ледового покрова рек водосбора Воткинского водохранилища представлена в работе Калинина [Калинин, 2009]. Возможность использования региональных методик расчета толщины льда на примере рек севера Европейской территории России рассмотрена в работе Германова [Германов, 2014]. В монографии [Козлов и др., 2015.] рассмотрены методы расчета и прогнозирования характеристик зажоров и заторов льда и возможности их использования в условиях наблюдающегося изменения климата. Вопросы изменения ледового режима рек Арктической зоны в современных климатических условиях рассмотрены в работах Фроловой Н.Л., Агафоновой С.А.

[Агафонова и др., 2016, (а); Агафонова и др., 2016, (б); Агафонова, 2019]. В работах [Лупачев, 2001; Васильев, 2006; Магрицкий, Скрипник, 2016] рассмотрены особенности ледового режима устьевых областей Северной Двины и Печоры.

Многолетний опыт использования лабораторных методов и гидравлического моделирования речных русел в Русловой лаборатории Государственного гидрологического института описан в монографии [Клауен, Копалиани, 2011]. Лабораторные исследования и построение гидравлических моделей русел рек для изучения и моделирования заторов льда, как правило, проводятся с целью разработки противозаторных мероприятий, включающих в себя ледоудерживающие сооружения, дамбы и т.д. Результаты полевого исследования затора льда, вызвавшего наводнение на р. Сухоне близ Великого Устюга описаны в работе [Георгиевский и др., 2017].

Математическому моделированию русловых процессов в ледовых условиях, в том числе при образовании заторов, посвящены работы В.К. Дебольского и Е.И. Дебольской [Дебольская и др., 2004; Дебольский и др., 2004]. Оригинальный подход к прогнозированию заторов льда представлен в работах И.В. Млыгина [Малыгин, 2014 (а); Малыгин 2014 (б)]. В данных работах автор предлагает использовать теорию распознавания образов для прогнозирования факта образования затора льда на примере участка реки от г. Великий Устюг до г. Котлас. В работе [Алешин, 2018] приведено краткое описание, а также результаты верификации авторской экспертной системы для прогнозирования мощности ледового заторообразования на участке р. Северная Двина. Математическому моделированию половодий за многолетний период с использованием набора параметров ледового блока гидродинамической модели на примере Малой Двины посвящена работа А.А. Сазонова [А. А. Sazonov, et al., 2019].

Особенностям статистической обработки данных о ледовом режиме посвящены работы Калинина и Трофимова [Калинин, Трофимов, 2001; Калинин, 2006; Калинин, 2020; Трофимов, 2004]. В частности, в работе [Калинин, 2020] на примере Воткинского водохранилища автор приходит к выводу, что репрезентативным можно считать период наблюдений от 40 лет. Период

наблюдений от 40 лет действительно является репрезентативным для расчета большинства статистических характеристик, подтверждение этому можно найти в рекомендациях по расчету статистических характеристик [Горошков, 1979; Владимиров, 1990].

Среди иностранных авторов, занимающихся проблемами заторообразования, наиболее полные исследования принадлежат С. Белтаос [Beltaos 1996; Beltaos, 2001; Beltaos, 2003; Beltaos, 2007; Beltaos, 2008; Beltaos, 2010; Beltaos, 2012; Beltaos, 2013; Beltaos, 2014; Beltaos, Burrell, 2015; Beltaos, 2018; Beltaos, Bonsal, 2021]. Предупреждению последствий заторообразования посвящена работа [Belore et al., 1990]. Среди других авторов можно выделить Barrette P. D., в работах которого достаточно подробно рассмотрены особенности организации ледовых переправ на реках Канады [Barrette, 2015; Barrette, 2018; Barrette, Charlebois, 2019; Barrette, 2020].

Математическому моделированию и прогнозированию процессов заторообразования на реке Одер посвящена работа [Lindenschmidt et al., 2019]. Прогнозированию и численному моделированию с использованием данных дистанционного зондирования и стохастических методов посвящена работа [Lindenschmidt, 2020].

В последнее время все большую популярность получают исследования, связанные с использованием методов обучения искусственных нейронных сетей в качестве инструмента прогнозирования. Произшедшая революция в нейронных сетях, связанная с разработкой методов глубокого обучения открывает новые возможности в области прогнозирования и распознавании образов, решении прикладных гидрологических задач. В области гидрологии нейронные сети получили широкое распространение за рубежом. Например, в работах [Akhtar et al., 2009; Shamseldin, O'Connor, 2001] доказана более высокая эффективность нейросетевого моделирования при прогнозировании стока с различных водосборов, чем при использовании регрессионных зависимостей. В работе [De Coste M. et al., 2021] рассмотрена система гибридного ансамблевого моделирования для прогнозирования ледяных заторов на северных реках Канады. В работах отечественных ученых также встречается применение методик,

основанных на методе обучения искусственных нейронных сетей. В работе [Алдошкина и др., 2009] рассмотрено применение аппарата нейронных сетей для анализа и краткосрочного прогноза приземной температуры с использованием созданной базы метеорологических данных, получаемых от автоматической метеорологической станции Российского гидрометеорологического университета. В работе [Биденко и др., 2019] была решена задача оценки обстановки в ближней морской зоне для выбора маршрутов или районов безопасного маневрирования судов с учетом различных территориальных факторов: ледовой обстановки, скорости и направления ветра и течения, экологических ограничений, хозяйственной активности и социальных факторов. Результаты, полученные в приведенных работах, признаны удовлетворительными. Автором в ряде статей рассмотрены вопросы прогнозирования характеристик стока с использованием искусственных нейронных сетей: в работе [Сумачев, 2018] был рассмотрен водный режим Северной Двины в условиях меняющегося климата; в продолжении [Sumachev et al., 2018] данной работы авторами была разработана методика прогнозирования максимальных значений расходов воды. В приведенной работе рассматривается возможность и практическая целесообразность прогнозирования гидрологических характеристик с использованием нейронных сетей, параллельное сравнение нейросетевых моделей и регрессионных уравнений показало увеличение точности выпускаемых прогнозов. В работе [Сумачев, 2019] метод обучения искусственных нейронных сетей был применен для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода на реке Сухоне в районе города Великий Устюг. Рекомендации по применению ИНС в практике гидрологических прогнозов даны автором в работе [Сумачев, 2019, (a)].

Обзор и анализ литературы, приведенный в данной главе, показал большое количество различных работ и подходов к решению изучаемой проблемы. При этом нужно отметить ряд оригинальных подходов при решении задачи прогнозирования образования заторов льда, но применение подобных подходов на практике не всегда возможно в силу недостаточности данных и неготовности сети Росгидромета к внедрению подобных методик. Прогнозирование факта

образования затора льда при этом представляет, несомненно, скорее научный, а не практический интерес, так как подобный прогноз не отвечает на вопрос о величине высших уровней воды за период весеннего ледохода с учетом влияния заторов льда. С практической же точки зрения большее значение имеет именно высший уровень воды и связанная с ним зона затопления территории. Применение методов математического моделирования в данном случае осложняется большой степенью неопределенности как в факте образования затора льда, так и его характеристик, что, в конечном счете, приводит к невозможности оперативного прогнозирования высших уровней воды за период весеннего ледохода с использованием подобных подходов. Поэтому наиболее оправдано с практической точки зрения применение эмпирических методик, которые, с одной стороны, обеспечивают простоту численной реализации, с другой стороны, высокое качество выпускаемых прогнозов и оптимальную заблаговременность. При этом надо иметь в виду, что все эмпирические зависимости имеют тенденцию к снижению качества выпускаемых прогнозов с течением времени. В настоящий момент ученые приходят к мнению, что наиболее надежными моделями прогнозирования типа «черного ящика» являются модели, основанные на возможностях машинного обучения.

Из всего вышесказанного видно, что вопросы, связанные с ледовым режимом рек хорошо изучены, но существует ряд нерешенных проблем, связанных с разработкой новых и совершенствованием существующих методик прогнозирования элементов ледового режима рек с учетом многолетних изменений как климатических параметров, так и гидрологического режима рек. Таким образом, в настоящее время существует ряд актуальных проблем и возникает необходимость решения целого ряда практических задач.

Глава 2. Климатическая характеристика изучаемого региона

2.1. Общие сведения о климате изучаемого региона

Большая протяженность Северного края, как в меридиональном, так и в широтном направлениях и наряду с этим некоторая неоднородность рельефа создают значительное различие климата отдельных его частей. Особенности климата определяются малым количеством солнечной радиации зимой, влиянием Северного Ледовитого океана, особенно заметным в северной части исследуемого региона, и интенсивным западным переносом воздушных масс.

Для Северного края характерна частая смена воздушных масс при прохождении циклонов со стороны Атлантики. С ними связана теплая и нередко с оттепелями погода зимой и прохладная летом. Циклоническая деятельность наиболее активно проявляется зимой и осенью, летом она ослабевает. Поступление воздушных масс арктического происхождения в любое время года сопровождается холодными и сухими северо-восточными ветрами, приносящими резкие похолодания. Наиболее часто их вторжения наблюдаются в летнее время. Со стороны Сибири зимой нередко поступает континентальный воздух, принося сухую морозную погоду. С юга и юго-востока поступают преимущественно континентальные массы воздуха, охлажденные зимой и прогретые летом. Частая смена воздушных масс придает погоде в течение всего года большую неустойчивость. Влияние морей сильно сказывается на распределении температуры воздуха по территории. Зимой температура воздуха на побережьях морей выше, чем в удалении от моря, а летом — ниже. Вглубь материка в направлении с запада на восток влияние Атлантики ослабевает. Следовательно, с севера на юг и с запада на восток нарастает континентальность климата, что можно проследить по изменению годовой амплитуды температуры воздуха. Она увеличивается от 23—28 °С на севере территории до 30—31 °С на юге и от 15 °С на западной границе края до 35 °С в предгорьях Урала. Наибольшей суровостью климата отличается северо-восточная окраина, особенно горные районы (Полярный Урал). Совокупность перечисленных факторов обуславливает длинную холодную зиму с устойчивым снежным покровом, более мягкую в западных районах Северного края и более суровую в восточных. Небольшие

местные различия климатических условий связаны с микро и мезоформами рельефа. Зима продолжается 5—6 месяцев на западе территории, шесть—семь месяцев на востоке. Снежный покров устойчив. Характерны частые метели; зимой преобладают ветры южного, юго-западного направлений, средняя скорость которых 3—7 м/сек.

Климат Кольского полуострова существенно отличается от климата других северных и заполярных районов нашей страны. Вторгающаяся с северо-запада Норвежская ветвь Северо-Атлантического течения приносит с собой тепло, благодаря чему на северном побережье полуострова зимой теплее, чем в средней полосе Европейской части Российской Федерации. Омывающее северные берега Баренцево море не замерзает круглый год, а на юге полуострова Белое море зимой скованно льдами. В районах центральной части климат континентальный, со сравнительно теплым летом и устойчивой зимой. От побережья вглубь континента среднегодовые температуры понижаются. Температура воздуха на Кольском полуострове подвержена частым изменениям: в любые зимние месяцы возможны оттепели, а летом — заморозки. Это объясняется тем, что над полуостровом сталкиваются массы холодного воздуха, приходящие с северо-востока, с теплыми воздушными течениями. Кольский полуостров относится к районам с избыточной влажностью (около 80%). Наименьшее количество осадков выпадает на севере (до 400 мм), наибольшее в горных районах (до 1000 мм). Весна довольно поздняя, снег сходит в конце мая — начале июня. Осень наступает в конце августа — начале сентября. Снег выпадает в конце сентября, а в горах даже раньше. Однако устойчивый снежный покров ложится только к первой декаде ноября. Температура воздуха в конце сентября быстро падает. Ноябрь — уже зимний месяц, когда возможны сильные морозы. День значительно сокращается, весь декабрь и начало января солнце не показывается из-за горизонта. Осадков зимой выпадает до 200 мм; наибольшее количество осадков наблюдается в горах и предгорьях Урала, а в пределах равнинной части территории — на наветренных склонах возвышенностей и уступах плато. В марте и апреле день удлиняется, погода становится довольно устойчивой, снег покрывается крепким настом, температура воздуха, особенно в горах, повышается, вечером и ночью, однако,

возможно значительное снижение температуры (до $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже). При этом стоит отметить большую микроклиматическую вариацию температуры воздуха на Кольском полуострове. В частности, в работе [Демин и др., 2017] отмечается большая микроклиматическая изменчивость: по данным микроклиматических съемок за 2014—2017 гг. установлено, что при тихой и ясной погоде в условиях холмистого рельефа температурное поле отличается высокой неоднородностью.

2.2. Многолетние колебания температуры воздуха за холодный сезон

Оценка многолетних колебаний температуры воздуха за холодный сезон необходима для изучения ледового режима рек, так как именно они определяют основные изменения климата, и, как следствие, характер и длительность ледовых явлений. Климатические характеристики прямо или косвенно используются во многих моделях прогнозирования элементов ледового режима, при этом большинство моделей предполагает стационарность климата.

Климатические изменения могут быть вызваны множеством факторов, включая деятельность человека и увеличенное поступление углекислого и других парниковых газов в атмосферу Земли. Проблемой изменения климата стали интересоваться, начиная с середины XX века, в то время и зародилась теория антропогенного воздействия на климат. На сегодняшний день, тем не менее, не существует однозначного ответа по поводу причин, влияющих на изменение климата. С одной стороны, множество данных свидетельствует о повышении концентрации парниковых газов в атмосфере Земли, с другой стороны, не совсем ясна степень влияния человека на процессы, происходящие в системе океан—атмосфера. Обоснованно можно отметить следующие тенденции, связанные с многолетними колебаниями температуры воздуха: наблюдается увеличение температуры воздуха, которое затрагивает как крупные города и центры производства, так и области свободные от активной деятельности человека. Климат ранее суровых регионов становится менее континентальным, с более теплым зимним сезоном, что оказывает влияние на ледовый режим. Увеличение количества оттепелей за зимний сезон является одной из причин перераспределения стока внутри года и изменений ледового режима рек. Таким образом, для разработки методик прогнозирования следует описать

происходящие изменения климата и дать им статистическую оценку, оценить степень влияния многолетних колебаний температуры воздуха за холодный сезон на элементы ледового режима рек исследуемого региона.

Для оценки многолетней вариации температуры воздуха за холодный сезон были проанализированы разномасштабные колебания температуры воздуха по 44 гидрометеорологическим станциям (18 метеорологических станций расположено в пределах Северного края, 26 в пределах Кольского полуострова) за период 1951–2018 год, разбиение всего периода наблюдений на базовый и контрольный выполнено с учетом нарушения стационарности рядов наблюдений, что было оценено аналитическим путем по разностноинтегральным кривым средней за холодный сезон температуры воздуха и сопоставимости длины периодов. Таким образом, базовый период выбран с 1950 по 1980 год, контрольный с 1981 по 2018 год. Климат Северного края и Кольского полуострова рассмотрен отдельно. Для исследования современного состояния климата Кольского полуострова в качестве исходной информации использованы данные 10 опорных метеорологических станциям, наблюдения на которых охватывают весь период с 1950 по 2018 год, данные остальных метеорологических станций, использованные в основном для картирования результатов исследования, были приведены к многолетнему периоду.

Выполненный анализ показал статистически значимое увеличение температуры воздуха за период отрицательных температур по большинству метеорологических станций. По данным за 1951—2018 год средняя по территории Северного края температура воздуха за холодный период составила $-7,3$ °С. По территории средняя температура воздуха за холодный сезон колебалась в предел от $-11,1$ °С на метеорологической станции Усть-Уса до $-4,6$ °С на метеорологической станции Вологда. За последнее 67 лет температурный режим региона претерпел значительные изменения, в частности температура воздуха за холодный сезон увеличилась на $1,1$ °С (с $-7,5$ до $-6,4$ °С) (рис. 2.2.1).

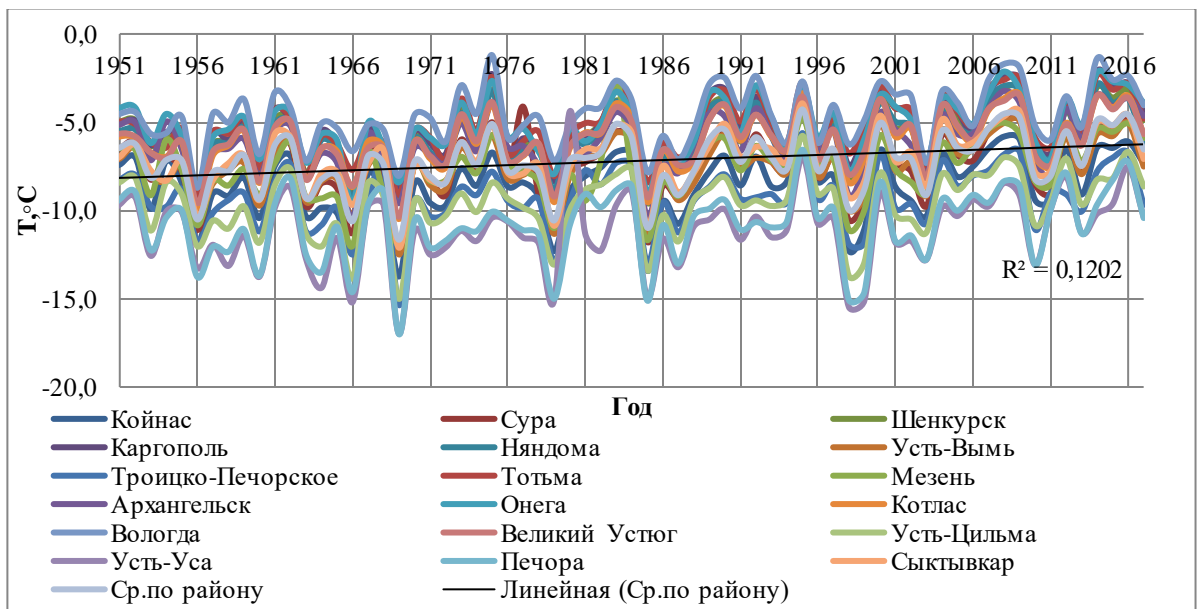


Рис. 2.2.1. Хронологический график хода средней температуры воздуха холодного сезона за 1951–2018 гг.

Пространственное увеличение температуры оказалось неравномерным, так, на метеорологических станциях в городах Каргополь, Тотьма, Печора зарегистрировано наибольшее увеличение температуры воздуха, равное 1,3 °С, на метеорологической станции Усть-Уса увеличение температуры наименее заметно и составило 0,7 °С, что не является статистически значимым. Внутри холодного сезона среднемесячная температура воздуха также увеличилась неравномерно (таблица 2.2.1).

Таблица 2.2.1

Осредненная оценка статистической значимости линейных трендов среднемесячной температуры воздуха Северного края за 1951–2018

Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	Ср. зимняя
T _{1950–2018} , °С	1,0	-6,3	-11,2	-14,7	-13,0	-6,7	0,4	-7,2
T _{1950–1980} , °С	0,3	-6,3	-11,4	-15,4	-13,9	-7,8	0,0	-7,8
T _{1981–2018} , °С	1,5	-6,3	-11,0	-14,1	-12,2	-5,8	0,8	-6,7
Разница, °С	1,2	0,0	0,4	1,3	1,7	2,0	0,8	1,1
R	0,19	0,12	0,07	0,11	0,17	0,31	0,16	0,34
Значимость	–	–	–	–	–	+	–	+

Тренд на повышение среднемесячной температуры воздуха отмечен за все рассматриваемые месяцы, однако лишь за март он является статистически

значимым, что и привело к статистически значимому увеличению температуры воздуха за весь холодный сезон. Рост температуры отмечается на всех метеорологических станциях исследуемого региона, что свидетельствует об эргодичности процесса, его явной однонаправленности на всех рассмотренных пунктах наблюдений. Известно, что на процессы замерзания рек сильное влияние оказывают температурные аномалии, которые могут быть рассчитаны как разность между значением температуры воздуха конкретного месяца или сезона и соответствующей нормой температуры воздуха за этот период. Анализ средней пространственно-временной аномалии температуры воздуха показал преобладание ее положительных значений.

Для многолетних колебаний среднемесячной температуры воздуха за холодный сезон на Кольском полуострове характерно наличие статистически значимых положительных трендов в марте—апреле, то есть в период вскрытия рек. Рассчитанное значение коэффициента асимметрии является отрицательным и составляет $-0,52$, что соответствует наличию в рядах наблюдений большого количества аномально холодных лет. Значения коэффициентов асимметрии и вариации, рассчитанные по Северному Краю и Кольскому полуострову, являются равными между собой коэффициенты асимметрии равняются $-0,52$; коэффициенты вариации — $0,23$, что свидетельствует о конгениальности климатических процессов, происходящих в исследуемых областях.

Анализ хронологического графика хода средней за холодный сезон температуры воздуха Кольского полуострова по опорным метеорологическим станциям показал статистически значимый положительный тренд (рис. 2.2.2).

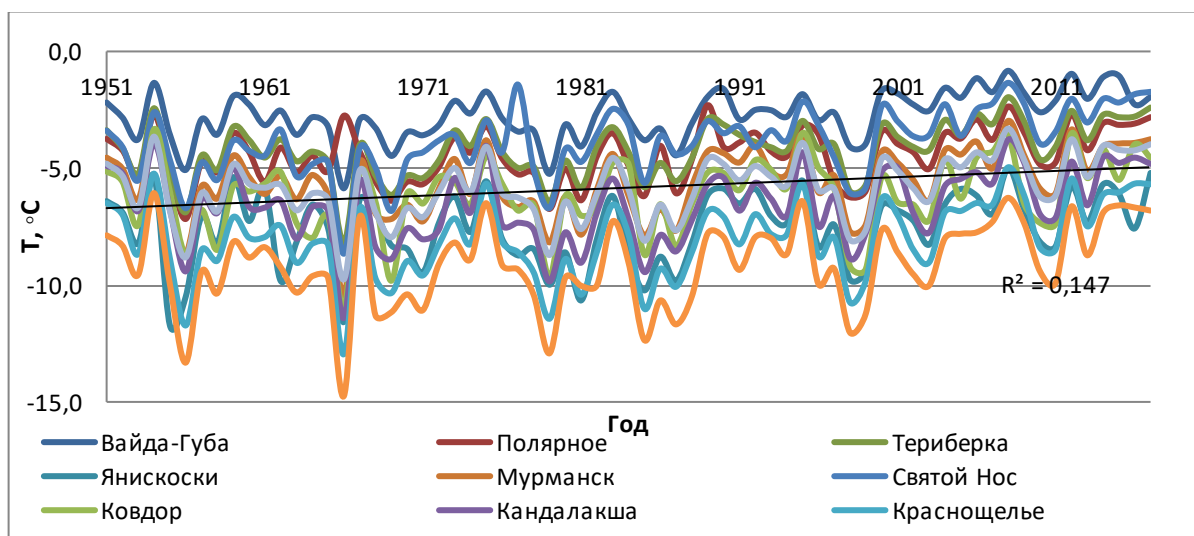


Рис. 2.2.2. Хронологический график хода средней температуры воздуха холодного сезона за 1951–2018 гг.

Из представленного графика видно, что средняя температура воздуха Кольского полуострова имеет выраженный положительный тренд, при этом повышаются в первую очередь минимальные значения температуры воздуха. Наиболее низкие температуры воздуха зарегистрированы на метеостанции Каневка, наиболее высокие на метеостанции Вайда-Губа. Среднее значение температуры воздуха за многолетний период составило $-5,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, среднеквадратическое отклонение $1,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Несмотря на то, что на всех метеорологических станциях исследуемого региона отмечен статистически значимый тренд только за март—апрель (таблица 2.2.2), увеличение температуры воздуха за другие месяцы произошло неравномерно, и для любого из них может наблюдаться статистически значимый положительный тренд на той или иной метеостанции.

Таблица 2.2.2

Осредненная оценка статистической значимости линейных трендов среднемесячной температуры воздуха исследуемого региона за 1951–2018

Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	Ср.зимняя
$T_{1950-2018},\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,9	-4,7	-8,0	-10,4	-10,4	-6,7	-2,0	-5,9
$T_{1950-1980},\text{ }^{\circ}\text{C}$	0,5	-4,7	-8,2	-10,6	-11,3	-7,7	-2,7	-6,4
$T_{1981-2018},\text{ }^{\circ}\text{C}$	1,4	-4,6	-7,7	-10,2	-9,5	-5,8	-1,3	-5,4
Разница, $^{\circ}\text{C}$	0,9	0,1	0,5	0,4	1,7	1,8	1,4	1,0
R	0,20	0,13	0,20	0,09	0,22	0,33	0,34	0,38
Значимость	-	-	-	-	-	+	+	+

Из представленных таблиц и графиков видно, что климат Кольского полуострова более мягкий по сравнению с климатом Северного края, что объясняется в первую очередь влиянием Норвежской ветви Северо-Атлантического течения, которое приносит с собой тепло.

Связь между температурой Кольского полуострова и Северного края носит линейный характер и характеризуется коэффициентом парной корреляции равном 0,85 (рис. 2.2.3).

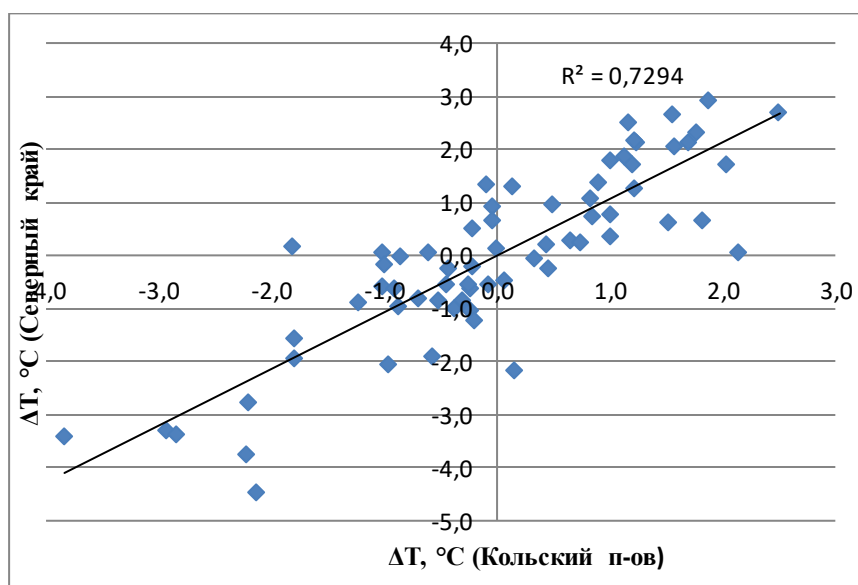


Рис. 2.2.3. График связи средней аномалии температуры воздуха за холодный сезон Кольского полуострова и Северного края.

Для анализа пространственной изменчивости средней температуры воздуха за холодный сезон, а также ее динамики, холодный сезон был разбит на осенний (октябрь—ноябрь) зимний (декабрь—февраль) и весенний (март—апрель) периоды, соответствующие основным фазам ледового режима. Пространственная изменчивость температуры воздуха в пределах Северного края, в целом, подчинена широтной закономерности с поправкой на увеличение континентальности климата. Наиболее низкие температуры воздуха наблюдаются в пределах водосбора реки Печоры, наиболее высокие реки в пределах водосбора реки Сухоны (рис. 2.2.4)

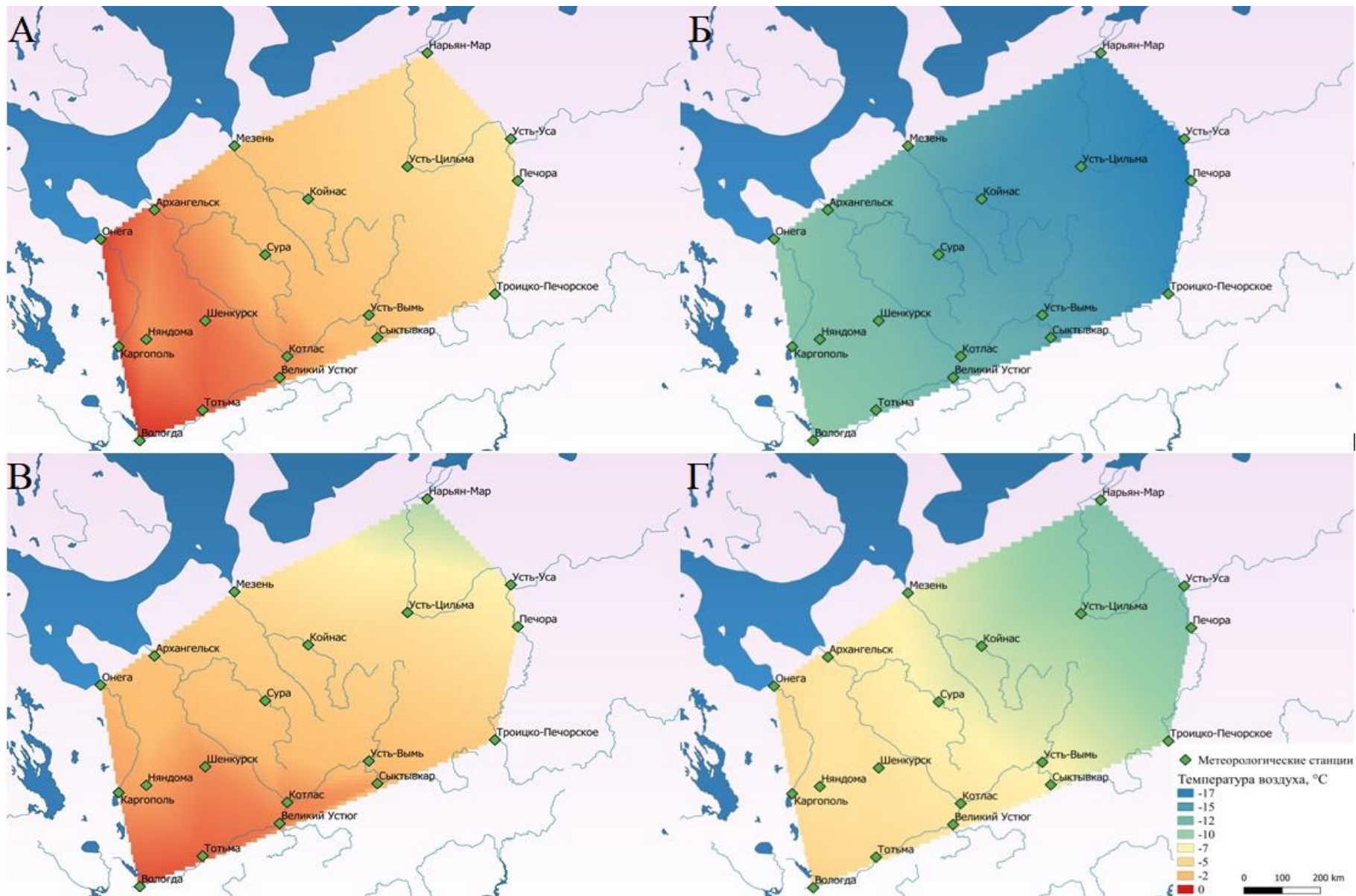


Рис. 2.2.4. Средние многолетние температуры воздуха за октябрь—ноябрь (А), декабрь—февраль (Б), март—апрель (В) и октябрь—апрель (Г).

Анализ пространственной изменчивости увеличения температуры воздуха выполнен с аналогичным разделением по периодам, при этом на карту наносилось увеличение температуры воздуха по сравнению с базовым периодом 1950—1980 гг. Выявлено неравномерное увеличение температуры воздуха по территории и по периодам: в осенний период наибольшее увеличение температуры воздуха характерно для наиболее холодной северо-восточной части изучаемой территории, в зимний период пространственная изменчивость имеет обратное распределение и максимальный прирост температуры воздуха отмечается уже в наиболее теплой юго-западной части исследуемой территории, при этом увеличение температуры хоть и велико в абсолютном выражении, но в относительном является незначимым, в весенний период увеличение температуры максимально как в абсолютном, так и в относительном выражении и распределено практически равномерно по всей исследуемой территории. В целом за холодный сезон температура воздуха наиболее заметно увеличивается в юго-западной и северо-восточной части изучаемого региона (рис. 2.2.5).

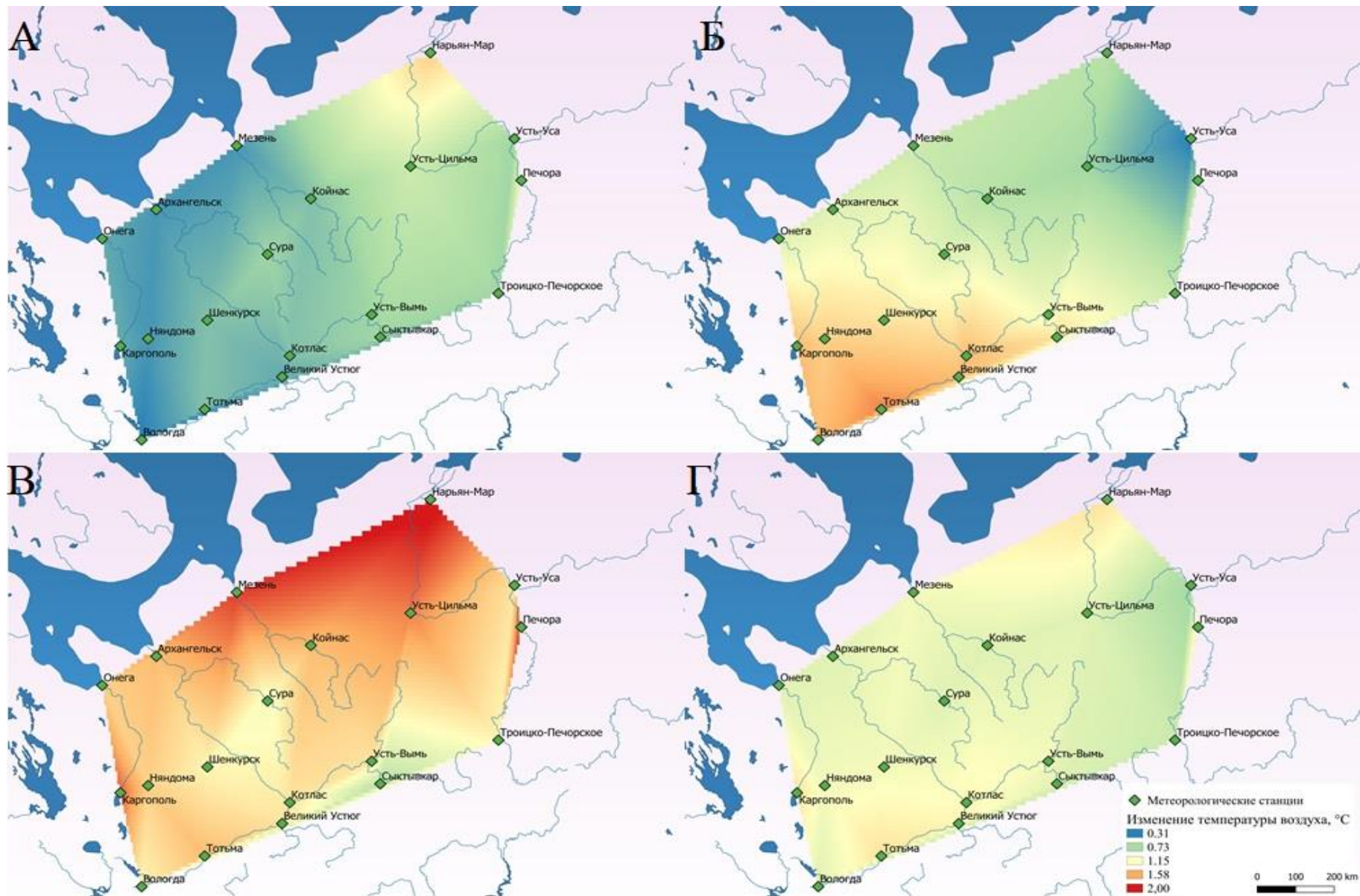


Рис.2.2.5. Изменение температуры воздуха за октябрь—ноябрь (А), декабрь—февраль (Б), март—апрель (В) и октябрь—апрель (Г).

Так как для Кольского полуострова характерна более сложная картина пространственного распределения температур воздуха, обусловленная влиянием теплого океанического течения и сильной расчлененностью рельефа, были использованы данные по всем доступным метеорологическим станциям, данные по которым были приведены к многолетнему периоду. В пространственном отношении по данным выбранных для анализа метеорологических станций можно выделить 3 однородных по температурному режиму района (рис. 2.2.6). Первый район с наиболее высокими температурами воздуха проходит по побережью Баренцева и Белого морей от Вайды Губы до Сосновца, второй, наиболее холодный район располагается в центре Кольского полуострова, где влияние теплого океанического течения минимально, наконец, третий район соответствует переходной области. В общей сложности методом кластерного анализа к первому району отнесено 7 метеорологических станций, ко второму району 9, к третьему 10. Средние значения температуры в пределах однородных районов составили – 4,3, –7,2, –6,2 °С соответственно, данные температуры воздуха отличаются статистически значимо. Осредненные по однородным районам увеличения температуры воздуха по отношению к базовому периоду в различных районах отличаются статистически незначимо.

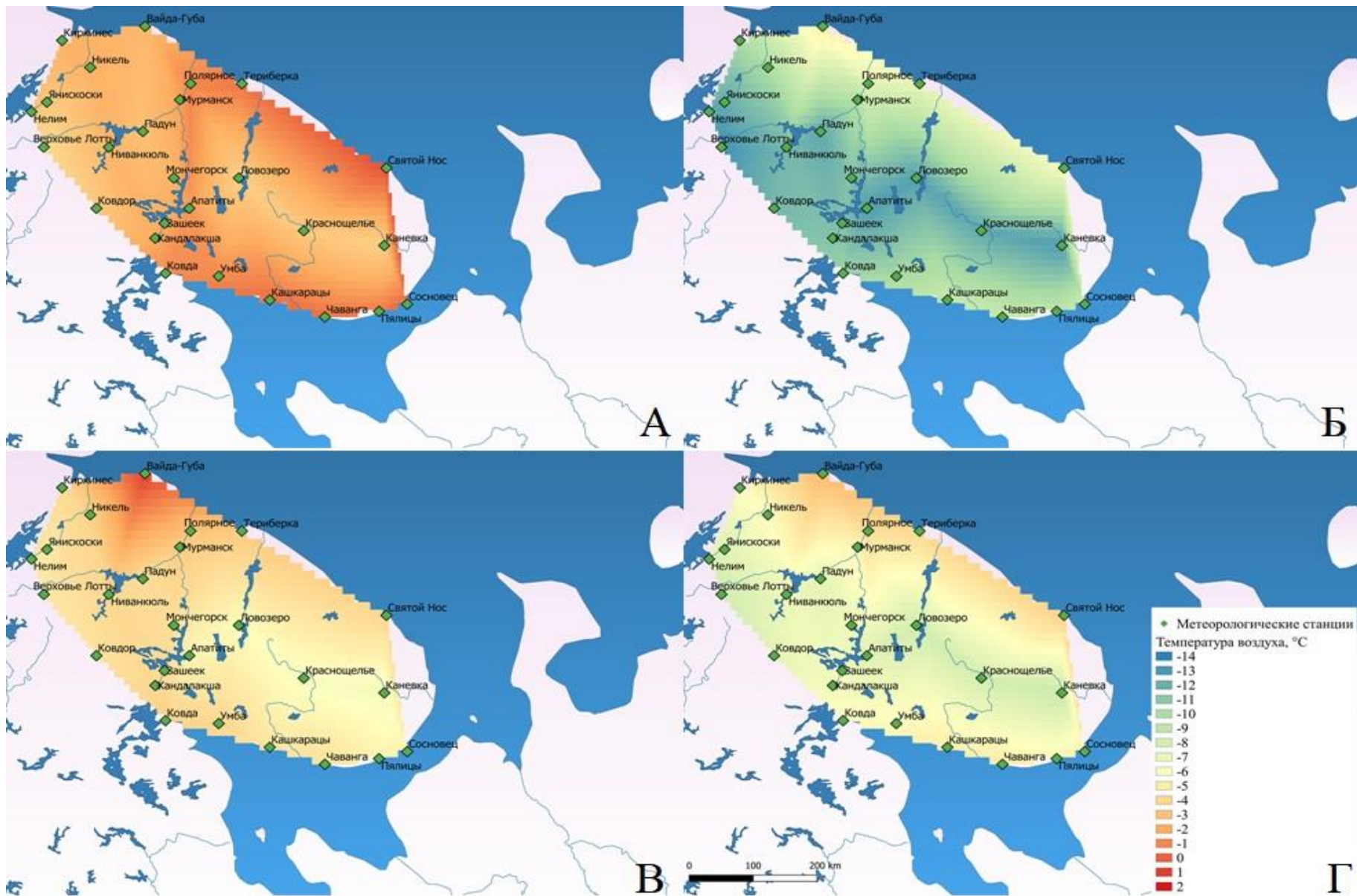


Рис. 2.2.6. Средние многолетние температуры воздуха за октябрь—ноябрь (А), декабрь—февраль (Б), март—апрель (В) и октябрь—апрель (Г).

Изменение температуры воздуха по территории Кольского полуострова выражено достаточно четко и определяется как природными, так и антропогенными факторами. Наибольшее увеличение температуры воздуха характерно для наиболее промышленно развитой его юго-западной части. По периодам, как и для Северного края, для Кольского полуострова характерно наибольшее увеличение температуры воздуха в весенние месяцы, однако, в отличие от Северного края, где нет четкой пространственной зависимости по периодам, увеличение температура воздуха на Кольском полуострове растет от осени к весне по всей его территории (рис. 2.2.7).

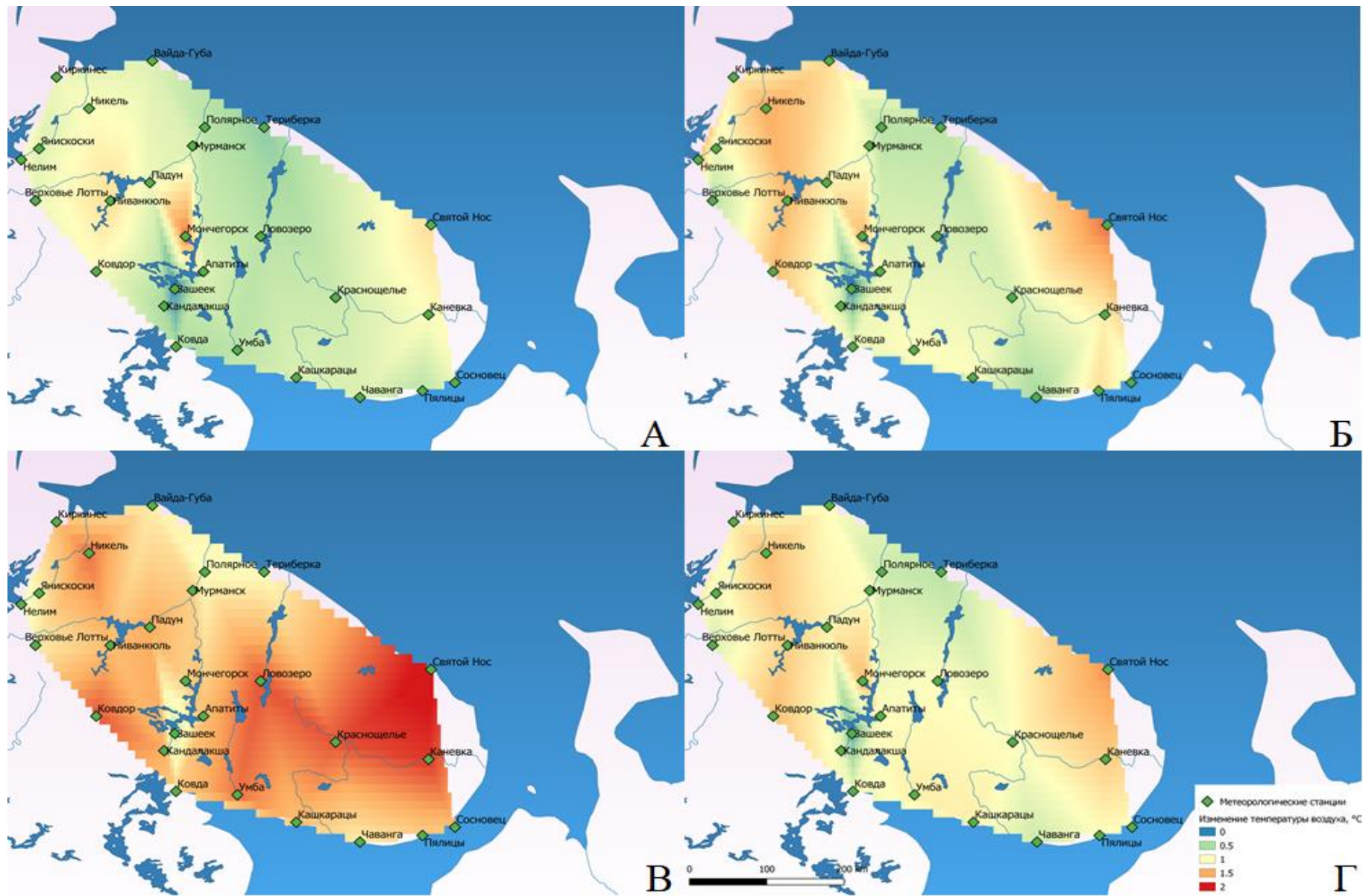


Рис. 2.2.7. Изменение температуры воздуха за октябрь—ноябрь (А), декабрь—февраль (Б), март—апрель (В) и октябрь—апрель (Г)

2.3. Перспективные климатические изменения

В настоящей работе проанализированы климатические изменения за 1950—2018 год на территории Двинско-Печорского бассейнового округа и Кольского полуострова. Климат исследуемых регионов отличается по абсолютным величинам температур воздуха и по интенсивности ее роста. В тоже время ряды средних температур воздуха имеют довольно близкую стабильную связь, одинаковые коэффициенты вариации и асимметрии. Увеличение температуры воздуха обусловлено в первую очередь увеличением температуры воздуха в наиболее холодные годы, в то же время максимальные температуры воздуха не претерпевают значительного изменения и остаются стабильными. Данное наблюдение позволяет связать изменение климата в первую очередь с изменениями в циклонической деятельности Земли и естественными климатическими колебаниями, а не с увеличением антропогенной нагрузки и выбросов диоксида углерода. В случае, если определяющую роль в изменении климата и увеличении температуры воздуха играл бы углекислый газ и другие парниковые газы, температура воздуха изменялась бы равномерно, то есть увеличение температуры воздуха произошло как по максимальным ее значениям, так и по минимальным, возможно, при этом в целом значительно бы увеличилась дисперсия из-за возникновения опасных атмосферных явлений. Но так как наблюдается лишь повышение минимальных температур воздуха, можно предположить, что данные изменения связаны с усилением циклонической деятельности в атмосфере Земли. В работе на соискание кандидатской степени в области физико-математических наук Топтуновой Ольги Николаевны [Топтунова, 2016] отмечается, что изменение тепло- и влагооборота, а также атмосферной циркуляции некоторые исследователи связывают с колебаниями эксцентриситета земной орбиты, наклоном оси вращения Земли к плоскости эклиптики и замедлением скорости вращения Земли, смещением магнитных полюсов. Причину изменения циркуляции, а, соответственно, и климата другие ученые видят в изменении интенсивности Гольфстрима. Некоторые предполагают, что циркуляция меняется из-за антропогенного изменения газового и аэрозольного состава атмосферы. Хотя парниковые газы уменьшают

амплитуду колебаний температуры у земной поверхности, сокращая ночное выхолаживание, но вместе с тем уменьшается и дневной нагрев. Немало исследователей видят ответ на вопрос об изменении циркуляции и климата во влиянии процессов, происходящих на Солнце и в межпланетной среде. Однако отношение ко всем этим утверждениям неоднозначно. Традиционно изменения циркуляции связывают с Северо-Тихоокеанским, Северо-Атлантическим, Арктическим колебаниями и Южной осцилляцией (Эль-Ниньо/Ла-Нинья), причину изменения которых многие исследователи также находят не только в антропогенном влиянии, но и в солнечно-земных связях [Монин, 1979, Будыко 1969].

Для антропогенного потепления климата характерно то, что именно возросшая деятельность человека оказывает заметное влияние на колебания климатической системы Земли, при этом зачастую упускаются из вида другие факторы или их комбинации, напрямую влияющие на температуру воздуха и климат тех или иных регионов, также недостаточное внимание уделяется роли авторегуляции системы океан-атмосфера: с накоплением углекислоты в атмосфере средняя температура поверхности Земли повышается, что обуславливает таяние ледниковых щитов, хоть и можно отметить, что на плавление ледяного щита толщиной 1 км потребуется не менее 15000 лет, во время плавления температура воздуха вблизи щита значительно не повышается, за счет того, что приходящая энергия расходуется на таяние льда. Большое же количество холодной воды, стекающей в океан способно долгое время поддерживать относительно низкую его температура. Когда основная масса ледяных щитов растает, температура океанов начинает повышаться, больший же объем океанической воды, испытывая дефицит карбонатов, постепенно поглощает избыток углекислоты из атмосферы, также углекислота удаляется из атмосферы за счет процессов выветривания, что в конечном счете вызывает понижение температуры воздуха и повтор данного климатического цикла [Солнечная активность..., 1966]. Таким образом, оценки повышения температуры воздуха за счет только увеличения концентрации углекислого газа нельзя считать достоверными. Любую же теорию изменений климата, если она основана на

рассмотрении только одного фактора, вряд ли можно считать удовлетворительной. Тем не менее нельзя недооценивать роль человеческой деятельности в изменениях климата, так как любое антропогенное воздействие на климат может привести к непредсказуемым последствиям для человечества и цивилизации.

Так как считается, что в настоящее время естественный цикл климатических колебаний был нарушен деятельностью человека, на практике перспективные климатические изменения оцениваются в зависимости от выброса парниковых газов. В частности, во Втором оценочном докладе Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации отмечается следующее: «Основной вклад в наблюдаемое повышение температуры на территории России во второй половине XX в. — начале XXI в. вносит влияние изменений концентрации парниковых газов. Однако и естественные внешние воздействия значимо проявляются в межгодовых колебаниях температуры» [Второй оценочный доклад..., 2014]. При подготовке данного оценочного проекта использовались климатические модели общей циркуляции атмосферы и океана: «В период подготовки Пятого оценочного доклада МГЭИК (2008—2014 гг.) международным научным сообществом был организован очередной проект по анализу расчетов климата с помощью глобальных климатических моделей. Основу этого проекта, получившего название *CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5: Проект взаимосравнения объединенных моделей (атмосферы и океана), пятая фаза)*, составили расчеты климата XX в. при заданных в соответствии с данными наблюдений концентрациях парниковых газов и аэрозолей, а также сценарные расчеты климата XXI в. для новой группы сценариев антропогенного воздействия на климатическую систему Земли — так называемые *RCP (Representative concentration pathways: репрезентативные траектории концентраций)*. Всего в проекте приняло участие более пяти десятков моделей, разработанных в разных исследовательских центрах мира. Наиболее высокую успешность воспроизведения средних климатических характеристик при сравнении с данными наблюдений, как правило, показывает результат осреднения по ансамблю моделей. Это связано с тем, что систематические

ошибки, присущие каждой модели в отдельности, часто являются случайными по отношению к ансамблю моделей и при осреднении по ансамблю взаимно компенсируются. Несмотря на значительный разброс результатов расчетов климата с помощью отдельных моделей *CMIP5*, удовлетворительное согласие средних по ансамблю расчетов основных характеристик приземного климата на территории России с данными наблюдений позволяет считать этот ансамбль пригодным для оценок будущих изменений климата на территории России. Сравнение моделей разных поколений указывает на постепенное улучшение воспроизведения моделями ряда характеристик приземного климата на территории России» [Второй оценочный доклад..., 2014]. Повышение температуры зимой на территориях всех федеральных округов Российской Федерации, кроме Северо-Кавказского и Южного, будет заметно превышать ее повышение в летний сезон. Россия остается регионом мира, где потепление климата в течение XXI в. будет существенно превышать среднее глобальное потепление. Согласно моделям *CMIP5* повышение средней зимней температуры воздуха на 2011-2031 год для исследуемого региона составит от +1,9 (рис. 2.3.1А) до 2,1 °С (рис. 2.3.1Б) в зависимости от принятого климатического сценария и от 3,1 (рис. 2.3.1В) до 9,2 °С (рис. 2.3.1Г) на 2080-2099 гг.

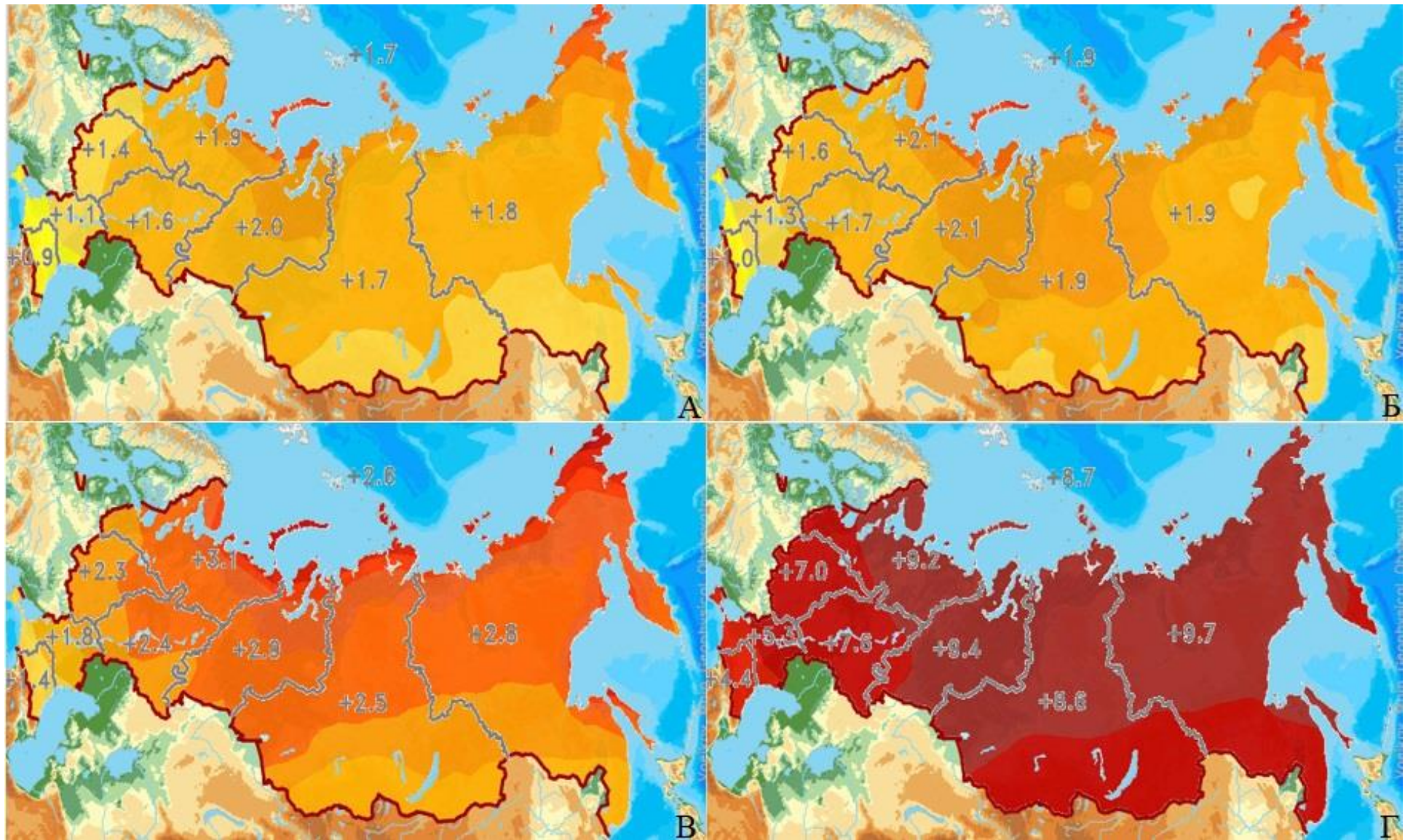


Рис.2.3.1 Перспективные изменения климата на 2011-2031 гг. (А, Б) и 2080-2099 гг. (В, Г) по данным моделей СМІР и климатическим сценариям RCP2.6 и RCP8.5 [Второй оценочный доклад..., 2014].

Таким образом, анализируя представленные во второй главе результаты исследования, можно заключить, что в настоящее время наблюдается активное, статистически значимое, увеличение средней за холодный сезон температуры воздуха (среднее по территории увеличение составляет порядка 1,1 °С). Полученные в настоящей работе оценки основываются на наиболее актуальных и достоверных данных о температуре воздуха за холодный сезон года в пределах исследуемой территории. Схожие оценки увеличения температуры воздуха за холодный сезон года для различных регионов были получены ранее в работе [Вуглинский, 2014], что свидетельствует о достоверности результатов и выводов, сделанных в настоящем исследовании. Климатические изменения, прогнозируемые на 2011-2031 гг., с учетом современных тенденций кажутся достоверными, однако бросается в глаза одинаковая величина повышения среднезимней температуры воздуха для всего Европейского Севера, что с учетом современных тенденций представляется маловероятным. Стоит также отметить, что долгосрочный прогноз изменения климата выглядит менее правдоподобно при жестком сценарии и достаточно правдоподобным при мягком. Так, при принятии жесткого сценария потепления климата окажется, что в отдельных районах среднезимняя температура воздуха окажется положительной, что представляется маловероятным. При дальнейшем анализе ледового режима в работе принято считать достоверным прогнозируемое значение изменения температуры воздуха в районе 2 °С.

Глава 3. Особенности ледового режима рек бассейнов Белого и Баренцева морей в условиях современного климата

Потепление климата как в глобальных, так и в локальных проявлениях отразилось на всех фазах ледового режима, особенно на фазах замерзания и вскрытия. Поэтому важна актуализация расчетных многолетних значений дат формирования фаз ледового режима и повторяемости опасных гидрологических явлений. Для совершенствования методов прогнозирования элементов ледового режима рек также необходимо количественно и качественно изучить и оценить ритмику годовой цикличности характеристик ледового режима, наравне с этим надо понимать и физические закономерности ледообразования и разрушения ледового покрова. Для решения поставленных задач в диссертационном исследовании рассмотрен ледовый режим рек в период замерзания, ледостава и вскрытия, что дает полноценную картину ледового режима рек. В целях совершенствования методик прогнозирования высшего уровня за период весеннего ледохода была разработана классификация рек.

Для количественной оценки элементов ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей были проанализированы следующие характеристики: даты начала ледовых явлений, даты и частота осенних ледоходов, даты начала и конца зажорных явлений, даты начала устойчивого ледостава, даты высшего уровня воды в начале ледостава и за весь период ледостава, даты конца ледостава и начала весенних ледовых явлений, даты высшего уровня воды за период весеннего ледохода, даты очищения реки ото льда и начала периода без ледовых явлений, даты высшего уровня воды за год; максимальные толщины льда и высота снега на льду. Все вышеперечисленные характеристики выписывались с уровнем воды над нулем графика, по возможности использовались срочные, а не среднесуточные высшие уровни воды.

3.1 Ледовый режим рек в период замерзания

Первичные ледовые образования различаются на реках исследуемого региона и зависят как от широты местности и интенсивности охлаждения воды, так и от размеров водосборной площади реки, ее естественной и антропогенной зарегулированности. На равнинных малых реках при первом предзимнем

похолодании у берегов и в зонах с малыми скоростями течения образуется тонкий прозрачный лед, который обычно называется заберегами. С постепенным выхолаживанием забереги все больше расширяются по глубине и ширине потока, образуя ледостав. Образование шуги на таких реках определяется их скоростями течения, наличием промоин и т.д. Чаще всего местами образования шуги являются пороги и перекаты рек, участки реки с повышенными уклонами и скоростями течения, места выхода теплых вод. Осенний ледоход на малых реках, как правило, не образуется. Весь период от появления заберегов до образования устойчивого ледостава на малых равнинных реках занимает не более пяти дней. Подобным ледовым режимом характеризуются и крупные реки в верхнем течении. Для рек, протекающих по преимущественно холмистому рельефу местности, к которым относятся все реки Кольского полуострова, образование устойчивого ледостава характерно после образования зазора льда и понижения температуры воздуха до критических отметок.

На больших реках забереги образуются главным образом из льда, принесенного течением во время ледохода. При охлаждении воды до 0°C на дне реки появляется донный лед — ноздреватая непрозрачная масса, состоящая из беспорядочно разросшихся кристаллов льда. Достаточно разросшиеся скопления донного льда всплывают. Всплывший донный лед и смерзшееся сало образуют шугу. С течением времени ледяные кристаллики сбиваются в комки, плывут, смерзаясь, и уплотняются, образуя шугоход различной интенсивности. Характер распределения шуги по водной поверхности, размеры и форма шуговых скоплений в какой-то мере являются отражением структурных особенностей потока: на прямолинейных участках шуга движется по всей ширине, а на извилистых — только у одного из берегов в виде полосы. Бесформенные комья шуги смерзаются вместе, образуя льдины, таким образом, шугоход сменяется ледоходом. В начале ледоход проходит спокойно, иногда при этом на постах существуют трудности в его идентификации, особенно в условиях плохой видимости, но по мере охлаждения воды и увеличения размеров льдин интенсивность ледохода резко возрастает, что позволяет достаточно надежно оценить его характеристики.

В литературе [Донченко, 1987] выделяют три характерных типа замерзания рек. Замерзание по первому типу характерно для малых и средних рек, отличающихся незначительной водностью в осенне-зимний период. Этот тип характеризуется большой интенсивностью ледообразования в поверхностном слое воды. Ледовый покров образуется путем роста и смыкания заберегов при малой толщине льда. К данному типу относятся реки Тиксна, Ема, Енанга и другие малые реки. Второй тип характерен для средних и больших рек, например, реки Вычегды. Ледообразование происходит в слое активного перемешивания толщиной 20—30 сантиметров. В период замерзания образуются забереги и льдины, перемещающиеся вниз по реке. Ледоход начинается через 2—3 суток после образования заберегов. Неоднородность гидрологических и морфологических характеристик по длине рек обуславливает значительные колебания ледотранспортирующей способности потока на отдельных участках. Тенденция увеличения ее сверху вниз нарушается на поворотах русла, в местах слияния рукавов и впадения притоков. Формирование ледового покрова происходит путем образования ряда перемычек в местах снижения ледопроемной способности потока. Между перемычками кромка ледового покрова смещается вверх по течению из-за образования и движения льда на участке, расположенном выше по течению и ограниченном ближайшей перемычкой. К третьему типу относятся реки с повышенными скоростями течения, большие и средние реки, особенно в годы повышенной водности рек и с неустойчивыми погодными условиями. К данному типу, в первую очередь, относятся крупнейшие водные артерии Северного края — Северная Двина и Печора. Для рек третьего типа характерно ледообразование по всей глубине потока. Замерзание сопровождается образованием шуги и движением ее вниз по течению. Ледовый покров образуется при остановке, сплочении и смерзании шуги. На участках с повышенными уклонами в отдельные годы могут образовываться зажоры льда. Формирование ледового покрова из шуги сходно с образованием его из льдин и происходит так же, как при втором типе, т.е. при постепенном заполнении водной поверхности льдом, поступающим с верхних участков, либо путем образования отдельных перемычек и последующим

замерзанием водной поверхности между ними. Скорость перемещения кромки льда на Северной Двине составляет 50 километров в сутки. Реки, текущие в широтном направлении, замерзают почти одновременно по всей длине. На участках с повышенными уклонами также могут образовываться зажоры. В этих случаях наблюдается наиболее длительный период замерзания рек, т.к. скорость перемещения кромки на зажорных участках составляет 3—6 километра в сутки [Донченко, 1987; Агафонова, 2009]. Данная классификация может быть дополнена средними реками Кольского полуострова, замерзание которых происходит при образовании зажоров льда и шуги. По способу ледообразования данные реки наиболее близки к третьему типу, однако устойчивый ледовый покров на них образуется не постепенно, что характерно для больших рек, а по всей ширине потока при образовании зажоров.

Неустойчивая погода в осенне-зимний период активизирует процесс зажорообразования [Козлов, 2000]. Зажоры — довольно частое явление для рек севера Европейской территории России, для большинства гидрологических постов повторяемость зажоров в осенне-зимний период достигает 100% [Агафонова, 2009]. Существует тенденция уменьшения повторяемости зажоров с запада на восток. Зажорные повышения уровней воды на реках севера Европейской территории России редко бывают опасны (не превышают 0,5—1,0 м), что связано с более низкой, по сравнению с весенним периодом, водностью рек [Агафонова, 2009].

Начало образования первичных ледовых явлений, как правило, заберегов, начинается с устойчивым переходом температуры воздуха через ноль градусов Цельсия и в целом подчиняется широтному закону, устойчивые ледовые явления наблюдаются при достижении суммы отрицательных температур в среднем -14 °С. Несмотря на то, что в осенний период повышение температуры воздуха выражено менее четко, наблюдается статистически заметное смещение сроков всех начальных ледовых явлений на более поздние. В настоящее время сроки появления первичных ледовых явлений на всех реках Северного края, кроме Емы и участка Северной Двины близ Усть-Пинеги, сместились на более поздние. При

этом стоит отметить, что смещение сроков появления первичных ледовых явлений произошло неравномерно по территории.

Так, для реки Печоры до 1980 года можно было выделить два участка: первый участок от с. Усть-Унья до с. Усть-Кожва, и второй участок от с. Усть-Уса до с. Оксина. Появление первичных ледовых явлений приходилось на третью декаду октября на первом участке и на вторую декаду октября на втором. В настоящее время, из-за неравномерного смещения сроков на более поздние, появление первичных ледовых явлений отмечается в третьей декаде октября по всей длине реки.

Река Онега, характеризуется сильной естественной зарегулированностью озером Лача. Появление первичных ледовых явлений на реке Онеге начинается с ледообразования на озере Лача, далее ледовые образования отмечаются вниз по течению, при этом позднее всего в устье реки. Сроки появления первичных ледовых образований сместились от 3 до 7 дней, что является типичным изменением для исследуемого региона. После 1980 года появление ледовых образований на реке Онеге обычно отмечается в первую декаду ноября. Смещение сроков появления первичных ледовых явлений на озере Лача чуть больше, чем в среднем течении и примерно соответствует смещениям сроков в устьевой области. Изменение сроков ледообразования на водоемах всегда в первую очередь связано с климатическими изменениями, так как в озерах нет активных динамических процессов перемешивания водных масс, возможно лишь относительно рек медленное ветровое перемешивание. Для появления ледовых образований на реках нужно значительно большая сумма отрицательных температур воздуха, что приводит к более поздним срокам появления всех ледовых образований.

На реках Мезень и Вашка первичные ледовые явления образуются в конце второй начале третьей декады октября по всей длине. И представляют собой сочетание заберегов с шугоходом или в среднем течении ледоходом разной интенсивности, который может продолжаться значительную часть переходного периода вплоть до образования ледостава. Даты образования первичных ледовых явлений и формирования высшего уровня воды за период осеннего ледохода

незначительно сместились на более поздние со средним коэффициентом корреляции +0,10. Смещение сроков появления первичных ледовых явлений в пределах водосбора Мезени выражено менее четко, чем на остальных реках исследуемого региона, несмотря на среднее для района увеличение температуры воздуха, что может быть объяснено недостаточной плотностью метеорологических станций в пределах водосбора реки, а также гидрологическими особенностями. Анализ трендов уровней воды в период замерзания показал незначимое падение уровней воды на реке Мезени (-0,11) и значимое на реке Вашке (-0,37). Падение уровней воды в период замерзания наблюдается на всех реках Северного края, что говорит об общей тенденции, вызванной изменением климата и, как следствие, перераспределением стока внутри года. Для реки Мезени по данным метеорологической станции и гидрологического поста, расположенных в городе Койнас, характерно начало образования первичных ледовых явлений в интервале сумм температур воздуха от 0 до -16 °С, после чего образуется устойчивый ледовый покров. Можно также отметить, что появление первичных ледовых явлений никак не зависит от водности реки и вне зависимости от уровня первые ледовые образования появляются в указанном температурном интервале.

Ледовые явления на Северной Двине, что типично для незарегулированных рек, текущих с юга на север, распространяются с севера на юг и позже всего наблюдаются на реке Сухоне. Средние за все время даты образования первичных ледовых явлений приходятся на конец октября начало ноября на всех рассмотренных реках бассейна Северной Двины. Смещение сроков появления первичных ледовых явлений более выражено в среднем и нижнем течении реки Сухоны, на Северной Двине и других притоках данное изменение выражено менее четко, а в районе Усть-Пинега даже наблюдается противоположная тенденция. Появление первичных ледовых образований на Северной Двине и ее притоках хорошо коррелирует между собой. Так, средний коэффициент корреляции между гидрологическим постом, расположенном в деревне Каликино, и всеми остальными пунктами составляет 0,62, а для ряда пунктов Северной Двины

превышает 0,80, еще большая связанность характерна для Печоры, где для отдельных пунктов коэффициент корреляции превышает 0,90.

Таким образом, установлено, что появление первичных ледовых образований на реках бассейнов Печоры, Онеги, Северной Двины и Мезени характерно в конце октября — начале ноября (рис. 3.1.1) и определяется широтой местности, скоростями течения, естественной и антропогенной зарегулированностью, а также величиной водосбора. Смещение сроков появления первичных ледовых явлений, вследствие изменения климата, является статистически значимым, тем не менее, можно отметить однородность рядов по критериям Стьюдента и Фишера, что свидетельствует о некритичности изменений в начальной фазе ледообразования.

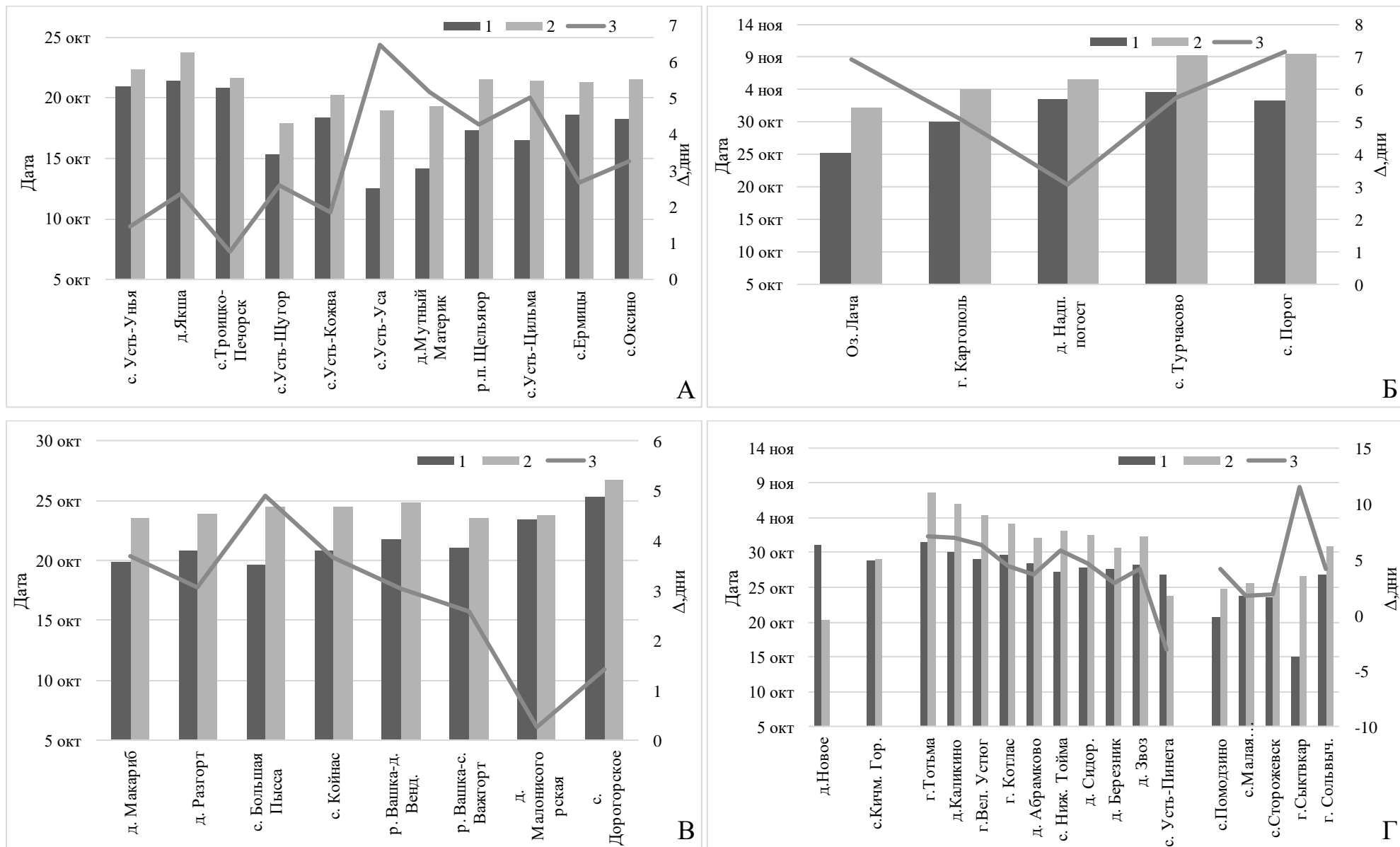


Рис. 3.1.1 График сроков появления ледовых явлений за период 1950–1980 гг. (1) и 1981–2018 гг. (2) и разница между ними (3) на реках Печора(А), Онега (Б), Мезень и Вашка (В); Сухона, Ема, Юг, Северная Двина, Вычегда (Г).

Пространственная взаимосвязанность постов достаточно высокая, что обусловлено низким влиянием локальных факторов на процессы ледообразования. Лишь малые реки могут вести себя независимо (рис. 3.1.2).

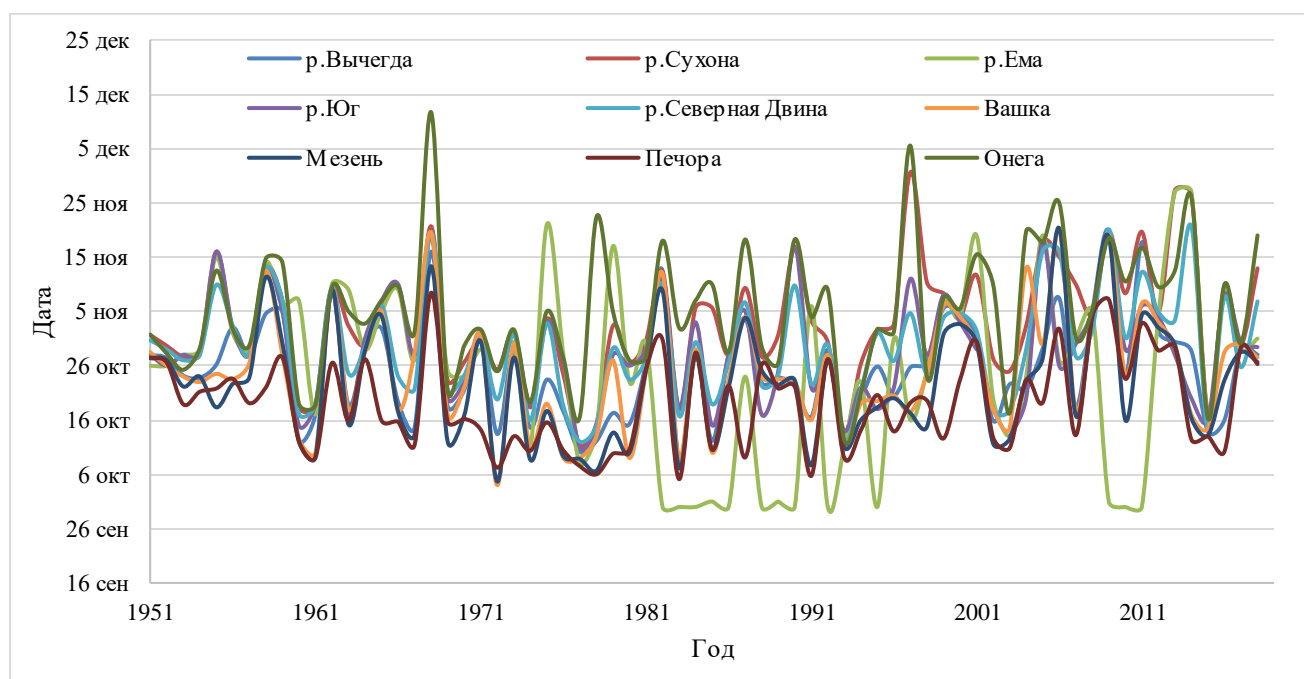


Рис. 3.1.2. Хронологический график дат образования первичных ледовых явлений на реках бассейна Северной Двины, Мезени, Печоры, Онеги.

Из данных, приведенных на хронологическом графике видно, что даты образования первичных ледовых явлений имеют когерентный ход и, в целом, повторяют друг друга. Построенная корреляционная матрица показывает статистически значимые коэффициенты корреляции, что дает возможность использовать уравнения связи между реками для восстановления пропусков в рядах многолетних наблюдений. Значимыми коэффициентами корреляции обладают как реки одного бассейна, так и реки разных бассейнов, что также свидетельствует о доминировании общих для территории климатических факторов, определяющих даты появления первичных ледовых явлений. При этом отмечается резкое снижение тесноты связи на малых водосборах. В целом, полученные зависимости не обладают прогностическим потенциалом из-за достаточно маленькой заблаговременности прогноза, в среднем до 5 суток, и того, что появление первичных ледовых явлений распространяется с севера на юг. Тем не менее, при необходимости полученные статистические зависимости являются

значимыми и могут быть использованы для оценки дат появления ледовых образований на неизученных водосборах.

Одной из важных характеристик осеннего ледового режима является уровень воды, при котором образовались первичные ледовые явления. Данный уровень является характеристикой водности реки в период замерзания и, как следствие, в ряде случаев, наравне с температурой воздуха, может определять даты образования устойчивого ледостава, вероятность образования зажоров льда и длительность переходного периода. Анализ хода уровней воды в период образования первичных ледовых явлений показал незначительный отрицательный тренд (рис. 3.1.3). Понижение уровней распределено неравномерно по территории, так, статистически значимый тренд, зарегистрированный на реке Мезени, коэффициент корреляции линейного тренда составил $-0,35$. При этом отмечается некоторая связь величины линейного тренда с площадью водосбора, так, на реках Юг и Ема коэффициент корреляции линейного тренда оказался наименьшим и составил $-0,10$ — $-0,09$, на других реках коэффициент линии тренда не превышал $-0,23$, что является статистически незначимым. Более того, на некоторых участках рек тренд может принимать положительные значения, так, для разных участков реки Печоры характерны разнонаправленные тренды: положительный тренд выявлен на участке от с. Усть-Унья до с. Усть-Щугор, ниже по течению тренд отрицателен до с. Ермицы. Это может быть объяснено морфологией русла, а также особенностями физико-географического положения и русловыми процессами. Снижение уровня в осенний период можно связать с изменением водности рек и перераспределение стока внутри года [Сумачев, 2018]. В Северном крае в настоящее время на зимний период приходится порядка 20% стока от годового, порядка 48% приходится на период весеннего половодья, оставшиеся 32% расходуются в период летне-осенней межени. При этом на реках бассейна Северной Двины наблюдалось снижение стока меженного периода примерно на 3%, что может в целом быть причиной понижения осенних уровней воды.

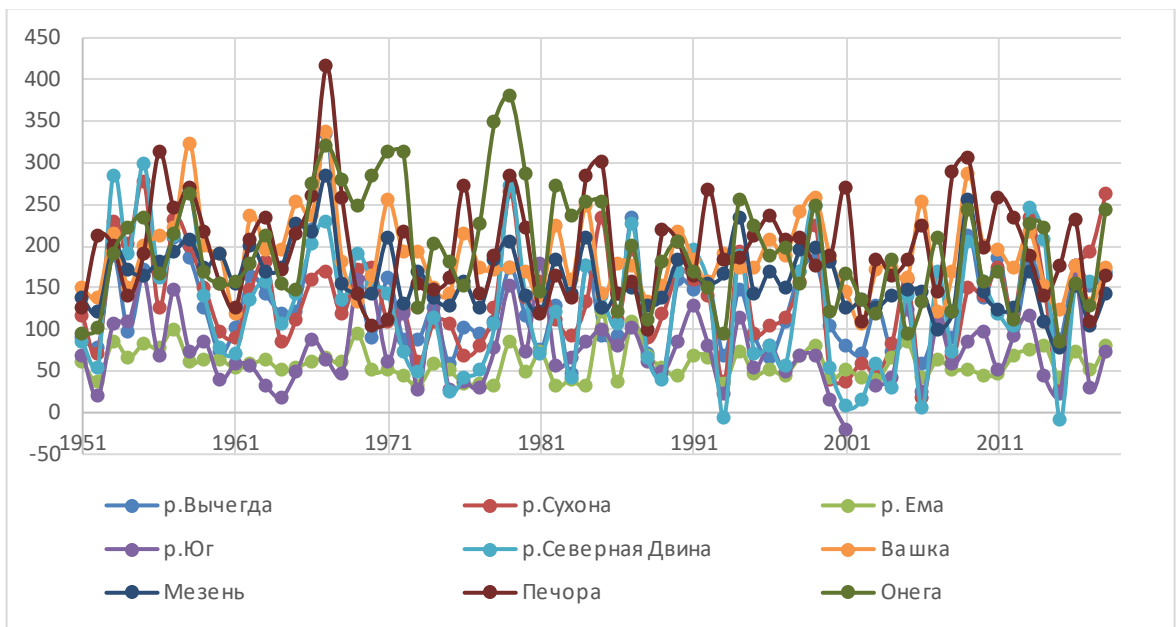


Рис. 3.1.3. Хронологический график характерных уровней воды, приуроченных к появлению ледовых явлений на реках бассейна Северной Двины, Мезени, Печоры, Онеги.

Также можно заметить в целом когерентный ход графиков, что также может подтвердить связь между климатическими факторами и уровнями воды. Рассчитанные коэффициенты корреляции в целом меньше, чем для дат, но, тем не менее, достаточно тесной связью обладают реки Сухона с Северной Двиной, Югом и Емой ($R > 0,70$).

По всему течению Печоры первичные ледовые явления выражаются как сочетания заберегов, редкого и густого шугохода и ледохода. Характеристики осеннего ледохода во многом определяют ледовый режим за весь осенний период. Эта особенность характерна для многих больших рек. Во время осеннего ледохода, как правило, наблюдаются высшие за переходный период уровни воды, обусловленные резким уменьшением пропускной способности русла. Для реки Печоры характерно увеличение повторяемости осеннего ледохода от истока к предустьевым участкам, так, по данным гидрологического поста, расположенном в селе Усть-Унья, многолетняя повторяемость формирования осеннего ледохода невысока и составляет 41%; продвигаясь вниз по течению, повторяемость осеннего ледохода увеличивается и на участке от с. Усть-Кожва до с. Усть-Цильма составляет 100%, к устью же происходит резкое снижение данной величины до 35%. Средняя продолжительность осеннего ледохода составляет 7—10 дней в

верхнем течении, в среднем течении — 13 дней, на участке от села Ермицы до села Оксина уменьшается до 4 дней, при этом максимальная продолжительность ледохода по данным многолетних наблюдений может достигать 30 дней и более. Уровни воды в период осеннего ледохода для большинства постов имеет положительный тренд за многолетний период, и только на участке от р.п. Щельяюр до с. Усть-Цильма — отрицательный. Следует также отметить, что наблюденный в 2006–2007 году в верхнем течении, а в 2013–2014 году в среднем течении высший уровень воды за период осеннего ледохода был максимальным за многолетний период.

На реке Онеге ледовые явления за переходный период в большинстве случаев являются комбинацией заберегов, редкого или густого шугохода и ледохода. Повторяемость осеннего ледохода значительно снизилась, и с 1980 годов осенний ледоход практически не наблюдается. Так, с 1950 до 1980 года в селе Турчасово зарегистрировано 28 лет (90%) с осенним ледоходом различной густоты, после 1980 — всего 2 года, то есть повторяемость осеннего ледохода после 1980 года составила 5%, подобная ситуация отмечается и в селе Порог. Снижение повторяемости осенних ледоходов могло быть вызвано как климатическими, так и гидрологическими факторами, более того не всегда возможно визуально отличить густой шугоход с отдельными льдинами от редкого ледохода. Высший уровень воды за переходный период отмечается, как правило, именно во время ледохода, в более редких случаях, как например в верховьях реки, где повторяемость осеннего ледохода небольшая, при шугоходе. Сроки формирования высшего уровня воды за осенний период на реке Онеге существенно сместились на более поздние ($R = +0,33$), и после 1980 года высший уровень воды за осень, как правило, наблюдался в конце второй — начале третьей декады ноября, значения высших за осенний период уровней воды не претерпели значительных изменений.

Реки Мезень и Вашка характеризуются густыми ледоходами высокой длительности. В нижнем течение длительность осеннего ледохода часто превышает 30 дней и в отдельные годы достигает 46 дней. В устьевых участках реки на фоне зажоров льда и шуги нередки ветровые нагоны с моря.

Повторяемость осеннего ледохода увеличивается от истока к устью и от города Койнас составляет 100%. Уровни воды в этот период также значительно повышаются, достигая максимальных отметок за осень.

Повторяемость осеннего ледохода на реке Сухоне равна 52 %, ниже по течению повторяемость ледохода значительно увеличивается и уже у деревни Абрамково составляет 90%, а у деревни Звоз — 100%, к селу Усть-Пинега повторяемость осеннего ледохода ожидаемо падает, что связано с более дружным замерзанием данного участка реки. Наибольшая продолжительность осеннего ледохода характерна для реки Вычегды, где в 1977 году ледоход продолжался в течение 64 дней, достаточно высокая продолжительность осеннего ледохода характерна и для самой Северной Двины, где длительность осеннего ледохода нередко превышает один месяц, средняя продолжительность осеннего ледохода на Северной Двине составляет 11 дней. Уровенный режим в период ледохода не претерпел значительных изменений, в целом, на пунктах со стопроцентной повторяемостью есть незначительная тенденция к снижению высших уровней за период осеннего ледохода.

В целом, можно заключить, что повторяемость осеннего ледохода вплоть до предустьевых участков растет с увеличением площади водосбора (рис. 3.1.4). Так, в истоках даже крупных рек повторяемость осеннего ледохода небольшая и приближается к нулю, на малых реках ледоходы и шугоходы, как правило, отсутствуют вовсе, а образование ледостава происходит путем смерзания заберегов. Уменьшение повторяемости ледоходов к устьям всех рек связано с более интенсивным процессом ледообразования и, как следствие, более дружным образованием ледостава.

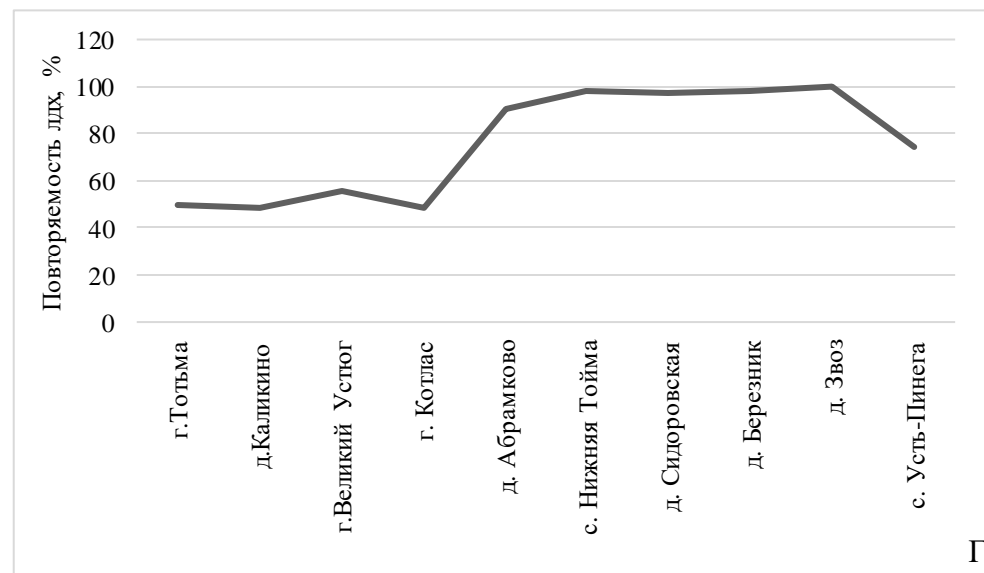
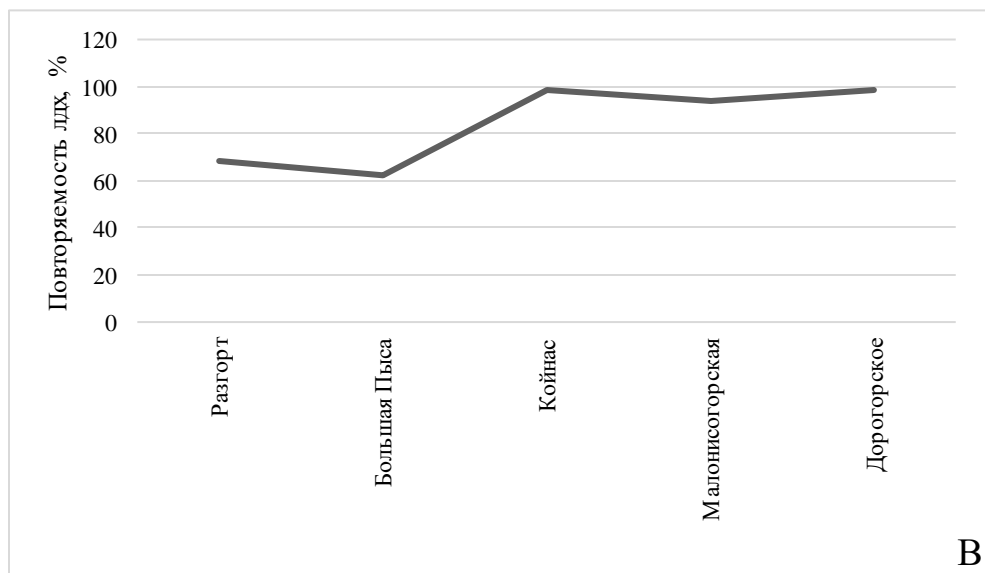
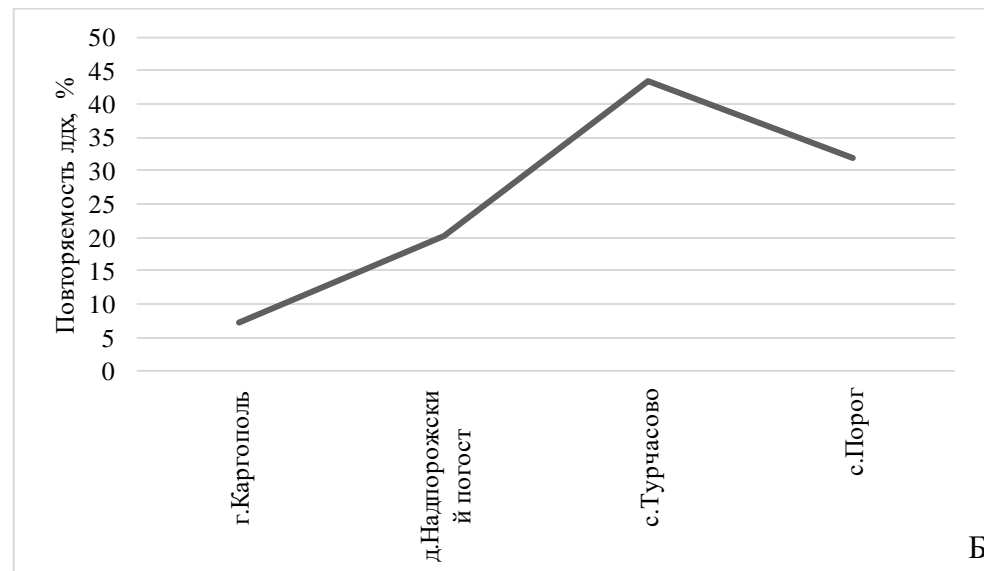
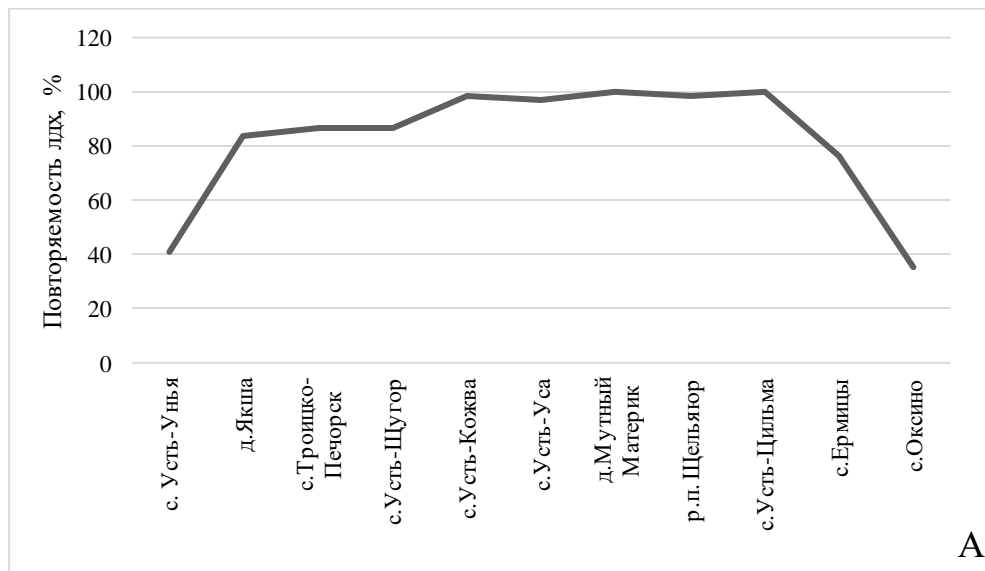


Рис. 3.1.4. График повторяемости осеннего ледохода от истока к устью на реках Печора(А), Онега (Б), Мезень и Вашка (В); Сухона, Ема, Юг, Северная Двина, Вычегда (Г).

Зависимость повторяемости осеннего ледохода от величины реки выражена достаточно четко и определяется величиной водосбора, широтой и долготой местности. Коэффициент множественной линейной регрессии для данной зависимости равен 0,65. Для расчета повторяемости осеннего ледохода на неизученных водосборах рекомендуется использовать нелинейные методы, основанные на возможностях обучения искусственных нейронных сетей.

Характеристики осеннего ледохода могут быть использованы при прогнозировании максимальной толщины льда, вероятности образования зажоров льда и шуги и, как следствие, вероятности образования опасных гидрологических явлений, связанных с затоплением территории. Максимальным за многолетний период значениям уровней воды при прохождении осеннего ледохода, соответствуют более поздние даты их образования, такие уровни, как правило, обусловлены зажорами льда. Это подтверждается результатами регрессионного анализа: коэффициент корреляции между датой формирования высшего уровня воды за период осеннего ледохода и величиной данного уровня воды для Северной Двины и Сухоны равен 0,51 и 0,56 соответственно, для Мезени 0,4, Вычегды 0,1. Одной из характеристик зашугованности русла в период замерзания может послужить разница между уровнем воды, наблюдаемым при первичных ледовых явлениях, и высшим уровнем воды за период осеннего ледохода (рис. 3.1.5). Данный уровень является характеристикой снижения пропускной способности русла и, как следствие, интегральной характеристикой зажорообразования.

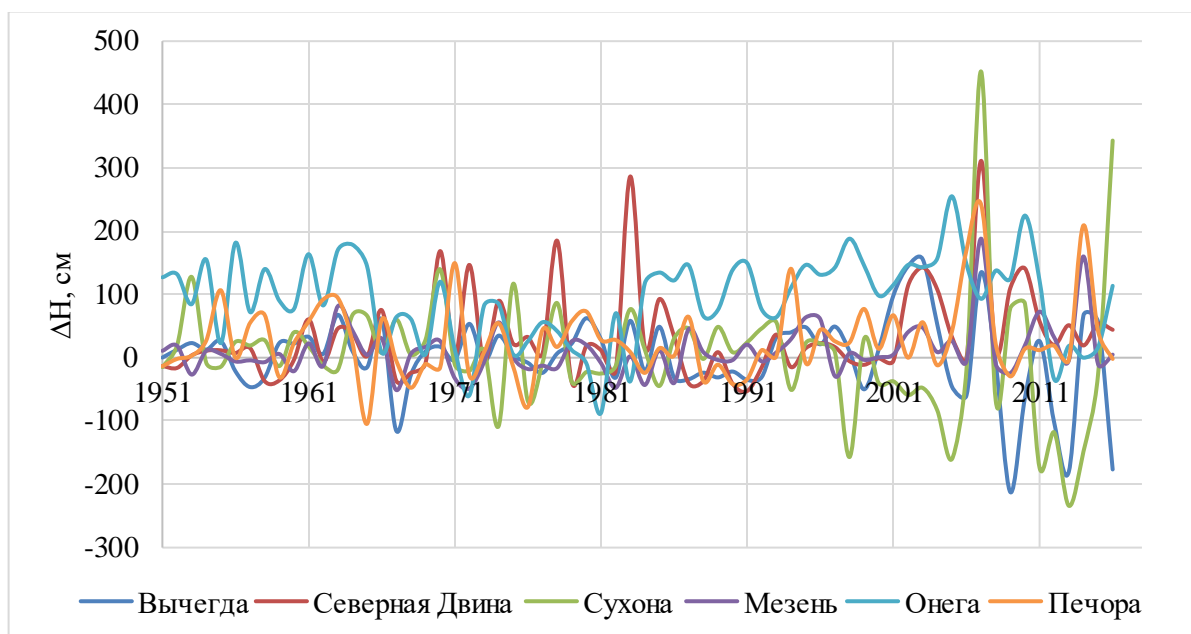


Рис. 3.1.5. Хронологический график хода разницы в значениях уровня воды при первых ледовых явлениях и высшего уровня воды за период осеннего ледохода.

Анализ хронологического графика показывает явную неоднородность по дисперсии, причем амплитуда колебаний равномерно увеличивалась с начала наблюдений и достигла своего максимума в последнее десятилетие. Также можно отметить, что данный ряд симметричен относительно среднего значения, которое изменяется от 2 см на реке Вычегда до 34 см на Северной Двине, что связано, по-видимому, с интенсивностью шугообразования. Тенденция к изменению данной характеристики имеет разнонаправленные тренды, так, на реке Мезень и Северной Двине наблюдаются статистически значимые положительные тренды с коэффициентами корреляции, равными 0,24 и 0,26. Анализ пространственных связей показал, что река Мезень находится в тесной статистической связи с рекой Вычегдой, Северной Двиной и Сухоной. Данная связь обусловлена климатической составляющей формирования осеннего ледохода. Так как климатическая составляющая играет значительную роль в формировании всех осенних ледовых явлений, наблюдается значимая статистическая связь между уровнями при первых ледовых явлениях и максимальными уровнями воды за период осеннего ледохода. Данная связь носит прогностический характер, так как обладает достаточной заблаговременностью для составления прогноза.

Период замерзания рек, называемый также переходным периодом, является периодом от образования первичных ледовых образований до устойчивого, длительностью не менее 10 дней, ледостава. За этот период, как правило, складываются условия определяющие ледовый режим начала ледостава, а иногда и весь ледовый режим конкретного года. Увеличение длительности этого периода приводит к повышению шугоносности рек, что наравне с падением уровней воды в этот период нередко приводит к формированию зажоров льда и шуги, которые могут сохраняться до начала весны, приводя к образованию заторов льда. Для крупных рек Двинско-Печорского бассейнового округа характерен достаточно длительный переходный период, что объясняется относительно высокой водностью рек.

К примеру, на реке Печоре от образования первых ледовых явлений до замерзания отдельных льдин и шуги, и образования устойчивого ледостава может пройти значительное время, вплоть до двух месяцев. В среднем это 10—12 дней в нижнем и верхнем течении, в среднем течении около 20 дней, сумма отрицательных температур при этом не должна быть выше -34°C , в целом же, ее точное значение зависит от площади водосбора и уровня воды в период замерзания. В нижнем и среднем течении отсутствуют статистически значимые тренды, в то время как в верхнем течении продолжительность переходного периода увеличивается в среднем на 3 дня, что является статистически значимым. На участке Усть-Уса—Усть-Кожва, наблюдается обратная тенденция, связанная, в том числе с падением уровней воды за этот период. Согласованность сроков замерзания высока и характеризуется средним коэффициентом корреляции, равном 0,81.

На реке Онеге длительность переходного периода сильно варьируется от года к году и зависит как от климатической составляющей, так и озерного регулирования. Наименьшая длительность переходного периода наблюдается на озере Лача и в низовьях, наибольшая — в верховьях реки. Большое количество порогов и озерное регулирование приводит к тому, что в верховьях реки переходный период может растянуться на многие месяцы, а ледостав не образоваться вовсе, что все чаще отмечается в последние годы наблюдений.

Длительный переходный период и сильная неравномерность замерзания повышает вероятность образования зажоров льда в среднем и нижнем течении.

Переходный период на реках Мезень и Вашка заканчивается смерзанием отдельных льдин и шуги и образованием ледового покрова, который может краткосрочно прерываться лишь в отдельные годы. Средняя продолжительность переходного периода от нескольких дней (в отдельные годы ледостав образуется сразу) до почти двух месяцев, что вызвано высокой водностью и, как следствие, длительным густым ледоходом на основной реке и ее притоках. Длительность переходного периода возрастает с течением времени, причем в верхнем и нижнем течении Мезени данное изменение статистически значимо. Увеличение длительности переходного периода объясняется как увеличением уровней воды в период осеннего ледохода, так и потеплением климата в этот период. Уровенный режим в предледоставный период на реках Мезень и Вашка сложен и многообразен из-за длительного ледохода, нередко наблюдаются зажоры и даже краткосрочные заторы льда, которые существенно повышают уровень воды, сам ход уровней различен от года к году и может как повышаться, так и понижаться к началу ледостава.

На Северной Двине и ее притоках длительность переходного периода увеличивается с севера на юг, для рек, текущих в меридиональном направлении, с увеличением площади водосбора. Так, для реки Вычегды характерно увеличение длительности переходного периода от истока к устью: близ села Помодзино длительность переходного периода составляет порядка 11 дней, у города Сольвычегодск — больше 20. Меньшая длительность переходного периода характерна и для мест слияния рек, так, относительно малая длительность переходного периода характерна для реки Сухоны в городе Великий Устюг, где она равняется порядка 18 дням, для сравнения у города Тотьма длительность переходного периода составляет уже более 20 дней. Средняя длительность переходного периода варьируется в достаточно широких пределах. Увеличение длительности данного периода происходит неравномерно по длине рек — наибольшее увеличение отмечается в местах, для которых до 1981 года характерно дружное замерзание. К примеру, на реке Еме длительность

переходного периода возросла с 6 до 22 дней, на Северной Двине у с Усть-Пинега с 15 до 24 дней. Таким образом, характерная длительность переходного периода после 1980 года для Северной Двины и ее притоков составила 21 день, а стандартное отклонение — 4 дня, для сравнения до 1980 года длительность переходного периода в среднем составляла 17 дней, а стандартное отклонение — 5 дней.

Для ледового режима рек Кольского полуострова в период замерзания не характерны тенденции смещения сроков, что обусловлено особенностями гидрологического режима [Банщикова, Сумачев, 2021]. Можно отметить статистически незначимые тренды к смещению сроков образования первичных ледовых явлений в зависимости от изменения температуры воздуха. Появление первичных ледовых образований на реках Кольского полуострова за счет озерного регулирования, несмотря на более высокие температуры воздуха, начинается несколько раньше, чем в Северном крае, в среднем приходясь на 23 октября. Уровенный режим по данным непрерывных многолетних наблюдений на реке Поной в период формирования первичных ледовых явлений так же, как и в остальной части изучаемого региона, претерпел значительные изменения — наблюдается падение уровней воды. Повторяемость осеннего ледохода на Кольском полуострове невысокая, что обусловлено большими уклонами водной поверхности и повышенным шугообразованием, что является также причиной неординарной повторяемости зажоров льда и шуги в осенний период, достигающей ста процентов.

Из всего выше сказанного можно заключить, что в период замерзания из-за изменения климата произошли существенные изменения ледового и уровенного режима. Для всех рек Северного края характерно смещение сроков образования первичных ледовых явлений и формирования высших уровней за период осеннего ледохода и, как следствие, увеличение длительности переходного периода, что повышает риск образования опасных гидрологических явлений. Изменения в ледовом режиме за данный период выражены неравномерно по территории. В целом наибольшие изменения характерны, для более малых значений характеристик ледового режима, так, наибольшее смещение сроков образования

первичных ледовых явлений характерно именно для рек и участков рек, где ледовые явления появлялись наиболее рано, увеличение длительности переходного периода тоже подчиняется данному правилу, что приводит к выравниванию сроков образования ледовых явлений по длинам рек. Для уровня режима в данный период характерно снижение уровней воды различной степени значимости. Отсутствие трендов к смещению сроков образования первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова обусловлено озерным регулированием и повсеместным образованием шуги, а также достаточности относительно небольших (по модулю) отрицательных температур воздуха для образования устойчивого ледостава, характерные значения и даты которых по результатам анализа за октябрь—ноябрь не претерпели значительных изменений.

3.2. Ледовый режим в период ледостава

Ледостав на реках исследуемого региона, как правило, устойчив и лишь в исключительных случаях может прерываться из-за неблагоприятных метеорологических и гидрологических явлений таких, как ветровые нагоны, сильные оттепели с подъемом уровня воды, зажоры и некоторые другие. В верховьях порожистых рек ледостав в отдельные годы может не образовываться, в данном случае на незамерзшем участке реки забереги на фоне продолжающегося шугохода сохраняются вплоть до начала весеннего половодья. При образовании устойчивого ледового покрова уровни воды в реке, как правило, возрастают, что связано с еще большим снижением пропускной способности русла. Дальнейшее увеличение или снижение уровней воды связано, как правило, с интенсивностью образования шуги и внутриводного льда, а также с зажорами шуги и льда под кромкой ледового покрова, при этом значительную роль играет местоположение головы зажора или затора льда.

В данной работе проанализированы уровни воды, приходящиеся на первый день устойчивого ледостава. За устойчивый принимался ледостав, длительность которого была не менее 10 дней, в случае, когда ледостав разрушался в осенний период, и длительность свободного русла превышала 10 дней, дата начала устойчивого ледостава пересчитывалась, исходя из тех же условий.

Ледостав на реке Печоре образуется в конце октября — начале ноября, замерзание при этом происходит с севера на юг, смещение сроков образования устойчивого ледового покрова сильнее выражено в верхнем течении (рис. 3.2.1А). Особенностью образования ледостава на реке Печоре является значительное увеличение уровня воды в первые 8 — 11 дней до отметок, близких или, например, в верховьях, равных высшему уровню воды за ледоставный период. Данный уровень воды является характеристикой зашугованности и уменьшения пропускной способности русла за счет образования ледостава. В случае, если данный уровень сформирован зажорными явлениями, то возрастает его влияние на формирование высшего уровня воды за период весеннего ледохода. По данным Каталога [Каталог..., 1976] на реке Печоре существует 12 зажорных участков. Анализ данных ледовой обстановки и характерных уровней за многолетний период наблюдений показал, что повторяемость этих явлений на всех постах практически не изменилась, зажорные скопления наблюдаются практически ежегодно — повторяемость порядка 90% и только в устьевом участке у с. Оксина около 50 %. Мощные зажоры характерны как для самой Печоры, так и для ее притоков Ижмы, Сулы, Цильмы. Зажорные подъемы уровней воды могут достигать 3,5—5 метров [Козлов и др., 2015]. Для реки Печоры в начальный период ледостава характерно образование краткосрочных зажоров льда, что обуславливает зависимость между уровнем, приходящимся на первый день ледостава, и высшим уровнем в начале ледостава ($R=0,95$). Зажоры льда при этом не оказывают значительного влияния на формирование весеннего ледохода, поэтому связь между высшим уровнем воды в начале ледостава и высшим уровнем воды за период весеннего ледохода не выражена, что делает невозможным прогнозирование весенних уровней воды с большой заблаговременностью. Анализ данных за многолетний период наблюдений не выявил каких-либо статистически значимых трендов, характерных для рассмотренных уровней воды, равно как и для величин нарастания уровня воды. Высший уровень за весь период ледостава, как правило, наблюдается в конце ледостава, лишь в истоках (с. Усть-Унья) в 40% случаев он может наблюдаться в начальный период ледостава. Связь между высшим уровнем в начале и за весь

ледостав различна, к примеру, на участке реки в селе Оксино данная связь отсутствует ($R=0,11$), а на участке в селе Ермицы и р.п. Щельяюр коэффициент корреляции равен 0,48. При этом отмечается статистически значимое падение высших за ледостав уровней воды — в среднем падение уровней воды составило 44 сантиметра.

Устойчивый ледостав на реке Онеге начинает образовываться с озера Лача, практически одновременно замерзают и низовья реки, среднее течение в районе деревни Надпорожский погост, как правило, замерзает на месяц позже, что обуславливается влиянием порогов (рис. 3.2.1Б). Устойчивый ледостав из-за сильного влияния озера Лача и порогов, расположенных по длине реки, может прерываться или даже в отдельные годы отсутствовать, что, например, все чаще отмечается в деревне Надпорожский Погост. Средние сроки образования устойчивого ледостава также существенно сместились ($R= +0,31$) и теперь приходятся на конец третьей декады ноября, таким образом, до декабря в большинстве случаев река Онега полностью покрывается льдом. Характер ледостава непостоянен и может меняться от года к году, но несплошной ледостав остается характерным для верховьев реки. В первые дни ледостава уровни воды, как правило, существенно повышаются, однако данный подъем в дальнейшем не оказывает значительного влияния на формирование весеннего ледохода и не может использоваться в качестве предиктора при прогнозировании его характеристик. Высший уровень воды за ледостав в низовьях отмечается в конце зимы, тогда как в верховьях он может совпадать с высшим уровнем воды в начале ледостава.

Ледовый покров на реках Мезень и Вашка образуется практически одновременно и подчиняется широтному закону. В целом, первый день устойчивого ледостава приходится на первую половину ноября и находится в обратной зависимости от широты местности, конкретная дата может варьироваться от 2 — 5 ноября в верховьях рек до 12 — 14 ноября в нижнем и среднем течении реки Мезени (рис. 3.2.1В), таким образом, река Мезень замерзает от истока к устью, что может одновременно объясняться сильными нагонными явлениями, впадением большого количества притоков, сильным увеличением

водности реки к устью и заболоченностью водосбора. Достаточно долгое время после образования ледостава могут сохраняться зажоры льда и шуги, значительно повышая уровень воды в ледоставный период. Сроки образования устойчивого ледостава на реке Мезень значительно смещаются на более поздние, тогда как на основном притоке реке Вашке данные изменения выражены менее четко. Интервал сумм отрицательных температур, при которых может образовываться ледовый покров, достаточно широк и изменяется в отдельные годы от -20°C до -174°C , при этом наблюдается хорошая связь относительно уровня воды. Высший уровень воды в начальный период ледостава наблюдается, как правило, в течение двух недель после образования ледостава, причем сроки его формирования еще более значительно смещаются уже не только для реки Мезень, но и для нижнего течения реки Вашки, что связано с подпорным влиянием основной реки.

Ледостав на Северной Двине образуется при постепенном смерзании отдельных ледовых полей и шуги. В отдельные особо холодные годы замерзание даже таких крупных рек может происходить в кратчайшие сроки. Замерзает река Северная Двина начинает на несколько дней позже своих притоков. Замерзание Северной Двины происходит с низовьев и истока, где на замерзание существенное влияние оказывает место слияние двух рек Юга, который замерзает на много раньше основной реки и Сухоны, позже всего происходит замерзание в среднем течении Северной Двины и Сухоны (рис. 3.2.1Г). Очередность замерзания притоков обуславливается их величиной и широтой местности, так, малые и более северные притоки замерзают раньше. Сроки образования устойчивого ледового покрова сместились на более поздние, причем на большинстве пунктов наблюдений данные изменения оказались статистически значимыми со средним коэффициентом корреляции, равном 0,28. На большинстве пунктов наблюдений также наблюдается падение уровней воды, приходящихся на первый день ледостава, но только в районе Великого Устюга данное падение является статистически значимым. В целом, для Северной Двины и ее притоков характерна высокая согласованность сроков образования устойчивого ледостава. Данная связь может учитываться при разработке моделей прогнозирования замерзания рек, но в данном случае следует отбирать посты с наибольшей разницей в сроках

образования устойчивого ледостава, а, следовательно, и заблаговременностью прогноза. С этой точки зрения наиболее информативна связь между малыми притоками и основной рекой. Так, парная корреляция между образованием ледостава на реке Еме в деревне Новая и Северной Двиной в деревне Абрамково составляет 0,74, ошибка регрессионного уравнения при этом составляет порядка 8 — 9 дней, природная вариация и заблаговременность 14—19 дней, связь сроков образования устойчивого ледостава на реке Онеге и озере Лача также может быть использована как прогностическая — более подробно данный вопрос рассмотрен в V главе. Таким образом, теоретически возможна разработка моделей прогнозирования образования устойчивого ледостава на основной реке по ее малым притокам или озеру, из которого она вытекает. При этом нецелесообразно использовать данные по суммам отрицательных температур воздуха, так как реальная заблаговременность метеорологического прогноза не столь высока, а информация об образовании ледового покрова на притоках уже несет в себе информацию об сумме отрицательных температур воздуха. Северная Двина, как и другие крупные шугоносные реки изучаемого региона, проявляет склонность к образованию зажоров льда и шуги в осенне-зимней период, при этом зажоры льда в большей степени оказывают влияние на процессы вскрытия, так, значения уровней воды близкие к высшим уровням воды в начале ледостава могут сохраняться достаточно долгое время, что свидетельствует об образовании мощного зажора льда. На Северной Двине высшие уровни в начале ледостава, как правило, отмечаются в течение двух недель после образования устойчивого ледового покрова. Их влияние на процессы вскрытия и формирование высшего уровня весеннего ледохода на Северной Двине и Сухоне является заметнее чем на остальных реках исследуемого региона, а парный коэффициент корреляции в ряде случаев может достигать 0,6 и выше, к примеру, данная связь используется в работах В.А. Бузина для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода с большой заблаговременностью. Даты образования устойчивого ледостава на реках исследуемого региона также находятся в тесной зависимости, что определено климатической составляющей.

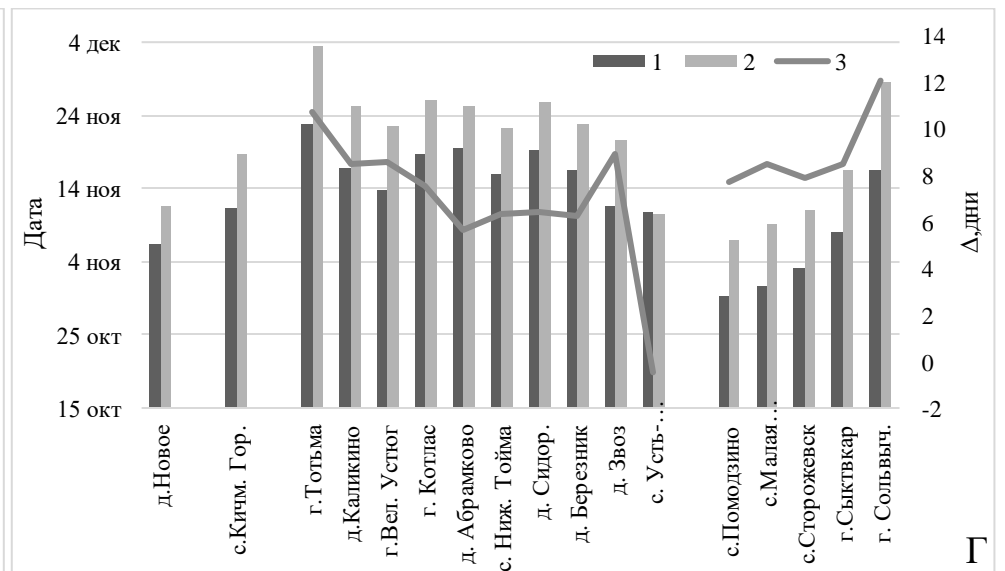
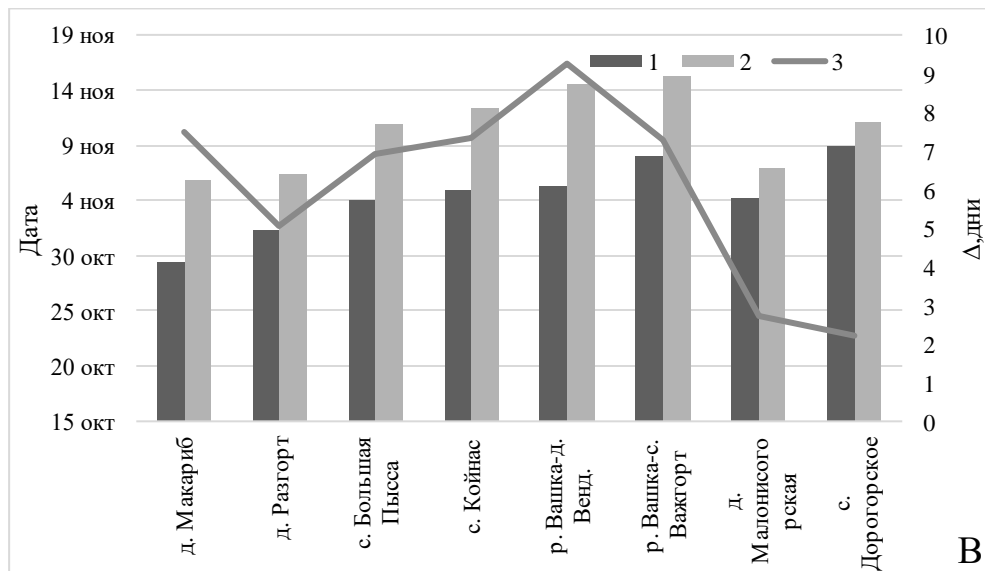
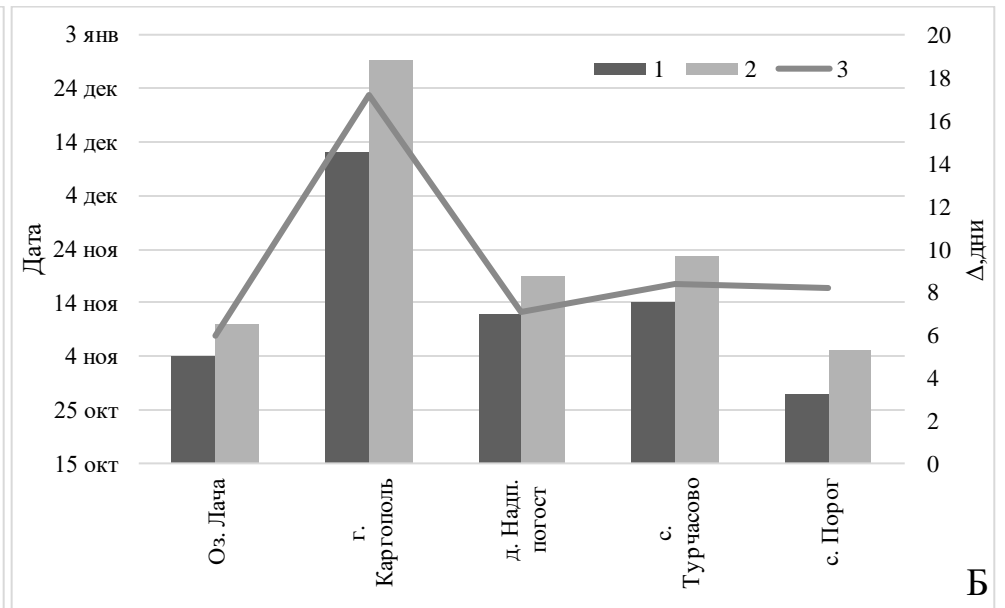
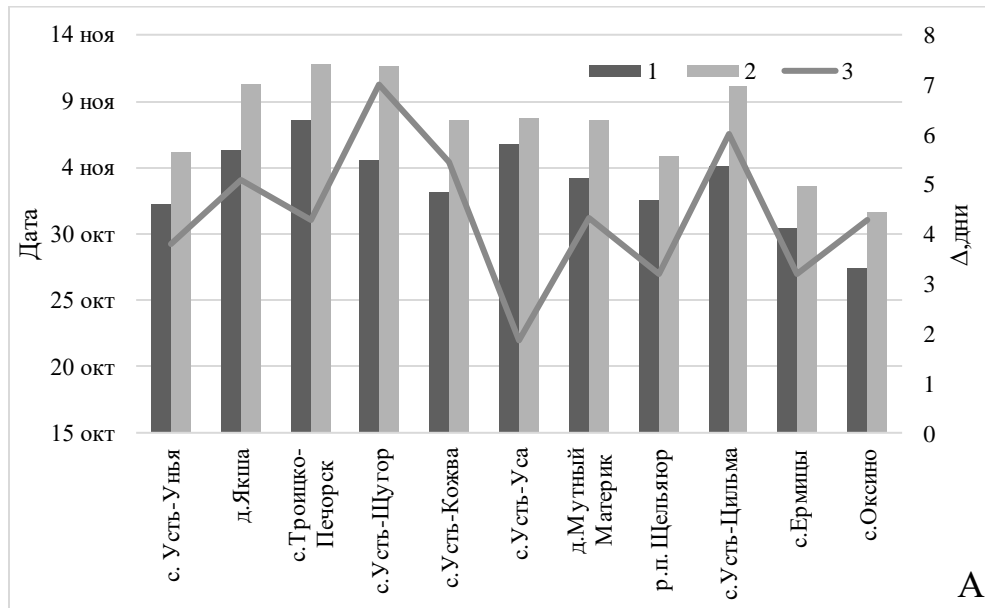


Рис. 3.2.1. График сроков образования устойчивого ледостава за период 1950–1980 гг. (1) и 1981–2018 гг. (2) и разница между ними (3) на реках Печора(А), Онега (Б), Мезень и Вашка (В); Сухона, Ема, Юг, Северная Двина, Вычегда (Г)

В работе произведен анализ высших уровней воды в начале ледостава (рис. 3.2.2), а также изменения уровня воды с момента образования первичных ледовых явлений и ледостава. На высшие уровни в начале ледостава значительное влияние оказывает как климатическая, так и гидрологическая составляющая, поэтому в отдельные годы наблюдаются выбросы, которые на ряде рек стали причиной нестационарности рядов по дисперсии. При этом ярко выраженные тренды отсутствуют, только на реке Вычегде наблюдается статистически значимая тенденция снижения высших уровней воды в начале ледостава — коэффициент корреляции линии тренда равен $-0,32$. Причиной выбросов послужило долгое, многоэтапное замерзание реки, с образованием зажоров льда и шуги, которые вызвали максимальные в ряду наблюдений значения уровней воды в 2007 году.

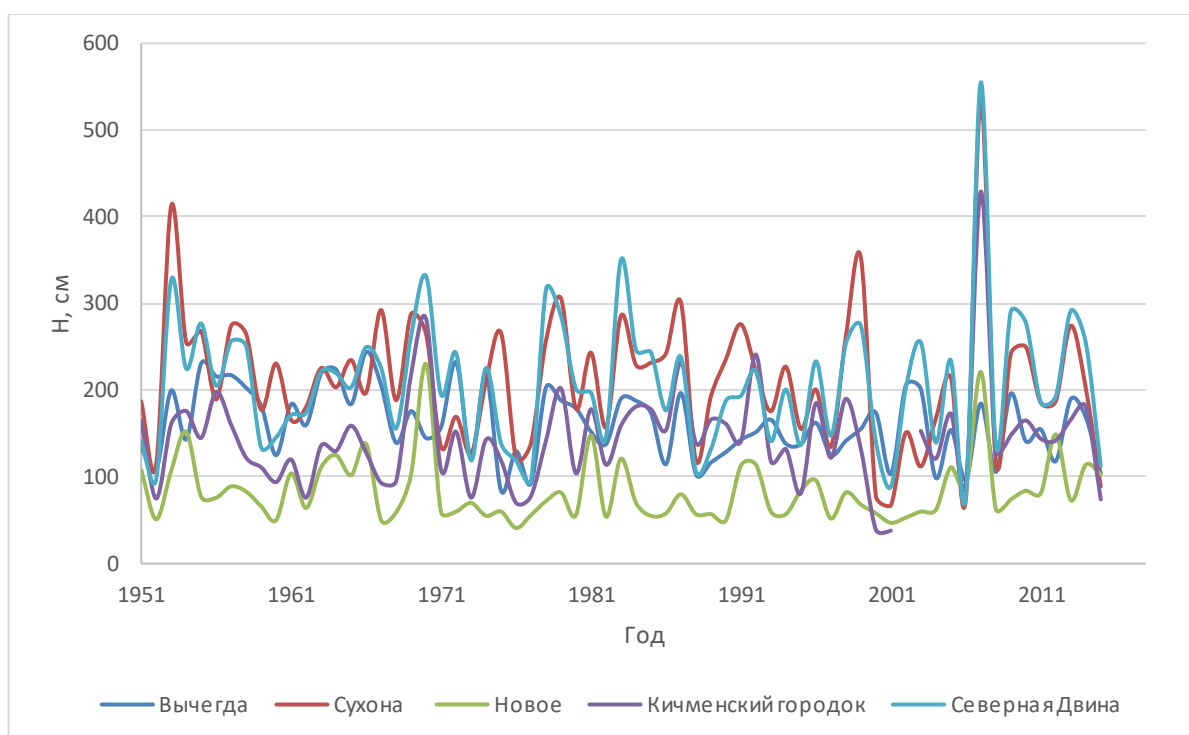


Рис. 3.2.2. Хронологический график хода высшего уровня воды в начале ледостава.

Высший уровень воды в начале ледостава находится в тесной зависимости с высшим уровнем воды за период осеннего ледохода, что объясняется процессами, действующими на оба этих уровня (рис. 3.2.3).

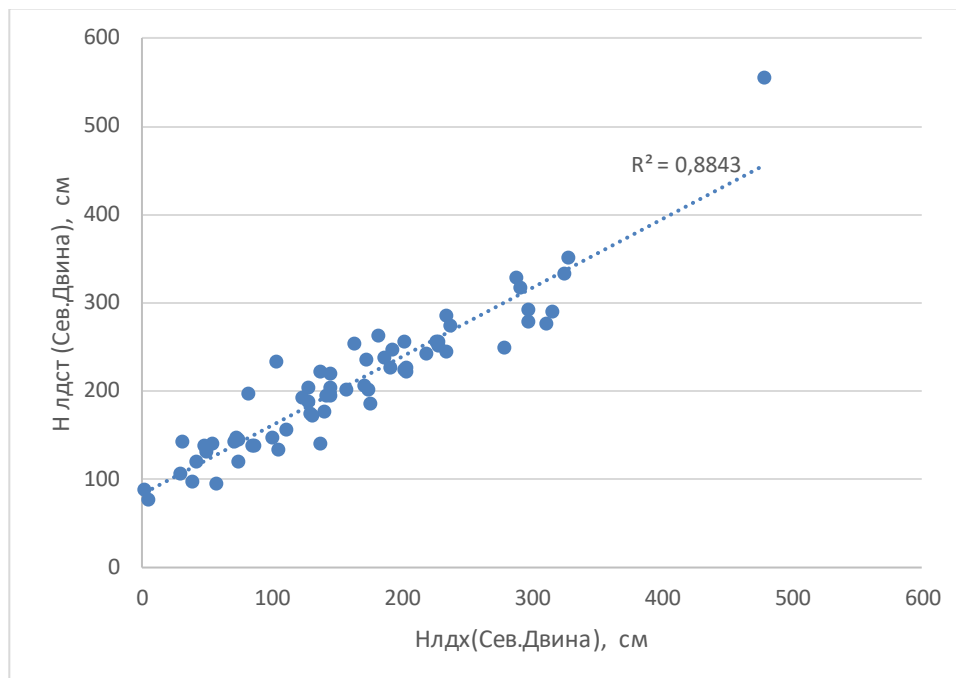


Рис. 3.2.3. Связь между высшими уровнями осеннего ледохода и высшими уровнями в начале ледостава на Северной Двине.

С первого дня образования устойчивого ледостава начинается интенсивный процесс нарастания ледового покрова. Распределение максимальных толщин льда, что естественно, подчиняется широтному закону. Толщина льда и его прочность, являются основными характеристиками, определяющими несущую способность ледового покрова, возможность его сопротивления на изгиб и сжатие. В зимний период толщину ледового покрова рек, водоемов, каналов и болот необходимо знать для множества технических и других целей. Особое внимание изучению несущей способности льда уделялось в военный и послевоенный периоды. Особый вклад в изучение строения и физико-механических свойств льда внес Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, где проводились экспедиционные и лабораторные исследования, направленные на изучение свойств льда с целью определения его характеристик, которые могут использоваться при расчете грузоподъемности ледового покрова или напротив при разработке или применении методов борьбы с ним. Важная роль отводится максимальной толщине льда и в уравнениях, полученных эмпирическим путем, для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода [Бузин, 2015]. Достаточно подробно рассмотрено

применение максимальных толщин льда в качестве предиктора при прогнозировании высших уровней воды за период весеннего ледохода на примере Северной Двины в работе [Сумачев, 2019], где было предложено использовать разницу в максимальных толщинах льда как характеристику, косвенно описывающую градиент прочности льда.

Процесс нарастания ледового покрова сильно зависит от суммы отрицательных температур, теплообмена между льдом и водными массами, теплоизоляционными свойствами снега, его толщины. Таким образом, определение величины нарастания ледового покрова и тем более его прогнозирование является довольно сложной задачей, так как стандартные формулы, или формулы, полученные из решения уравнения теплового баланса [Винников, Проскуряков, 1988, с. 182-201] практически не учитывают теплообмен между водой и ледовым покровом, а также механическое воздействие воды на ледовый покров, что в известной степени ограничивает их применение лишь озерами и некоторыми реками, где разрушение ледового покрова происходит под воздействием лишь теплового фактора.

Максимальных значений толщина льда достигает в конце зимы — начале весны, когда суммы отрицательных температур становятся наибольшими. В начале образования устойчивого ледостава лед стремительно нарастает до образования снежного покрова на льду определенной высоты, после чего скорость нарастания льда значительно уменьшается из-за теплоизоляционных свойств снега. При различиях в датах образования ледостава и при характерном для северных рек замерзании от устья к истоку часто наблюдается торошение льда, что обуславливает различия в толщинах льда при замерзании, далее эта разница нивелируется. Большая толщина льда характерна для северных участков, в местах слияния рек, а также в местах, где образование ледового покрова происходит путем смерзания отдельных льдин и шуги.

Анализ данных по реке Печоре позволил выявить наличие статистически значимых трендов к снижению максимальной толщины льда на большинстве пунктов наблюдений, уменьшение максимальной толщины льда при этом составило до 15 сантиметров. Анализ статистической взаимосвязанности в

данных показал отсутствие какой-либо значимой связи ($R=0,21$), что свидетельствует о том, что на нарастание льда большее влияние оказывают локальные факторы мест измерения толщины льда (рис. 3.2.4А.)

На реке Онеге снижение максимальной толщины льда составило от 7 до 10 сантиметров (по данным постов с устойчивым ежегодным ледоставом), характерная максимальная толщина льда составила 54 сантиметра. На озере Лача максимальная толщина льда снизилась на 6 сантиметров, характерная толщина льда равняется 67 сантиметрам (рис. 3.2.4Б).

На реках Мезень и Вашка снижение максимальной толщины льда составило от 1 до 8 сантиметров. Наибольшее снижение максимальной толщины льда отмечается в среднем течении реки (рис. 3.2.4В).

На Северной Двине за период с 1950 по 1918 год значения максимальных толщин льда заметно уменьшились, что напрямую связано с увеличением средней за холодный период температуры воздуха. Уменьшение средней максимальной толщины льда составило порядка 20 — 30 сантиметров, что является статистически значимым (рис. 3.2.4Г).

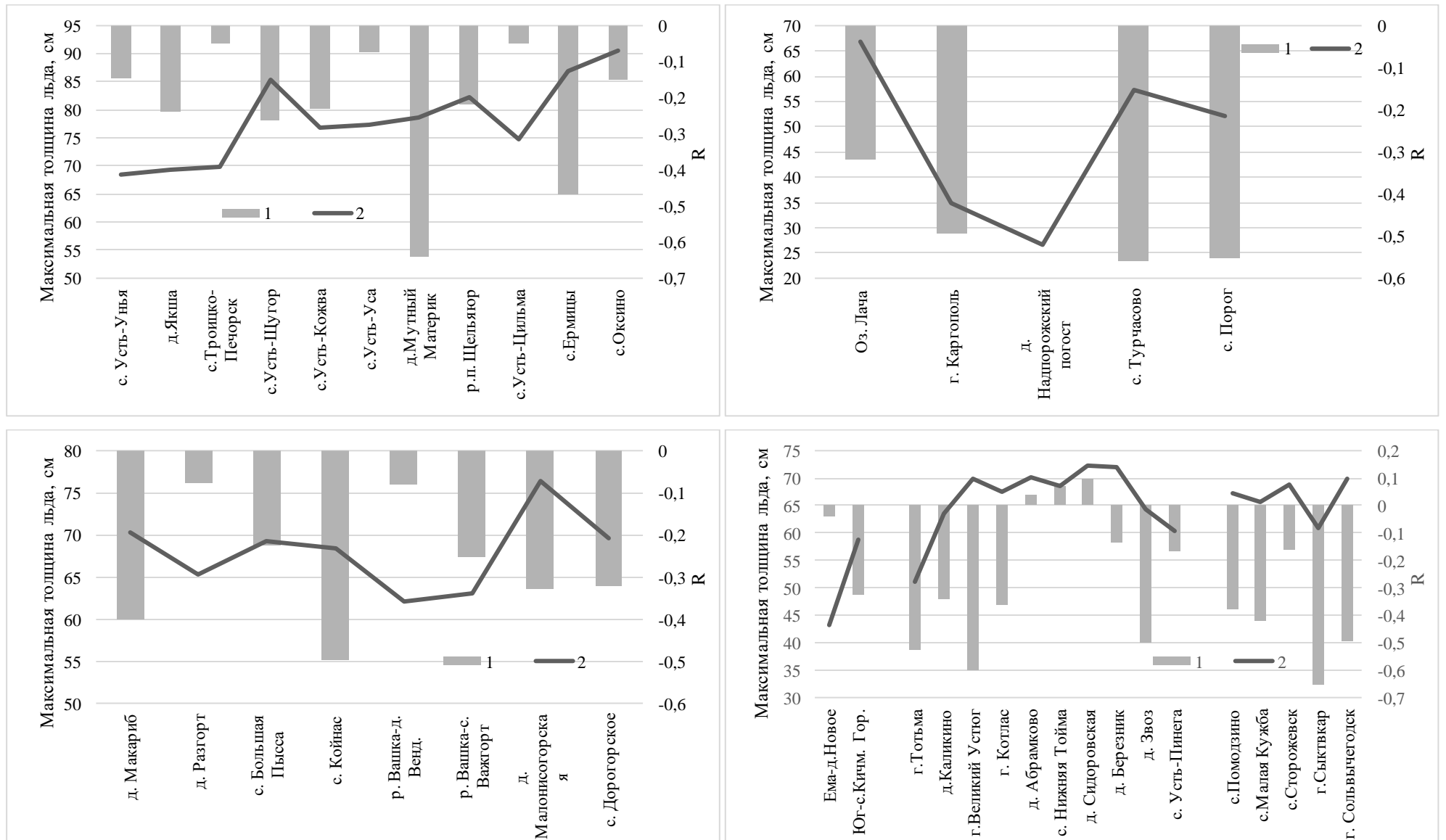


Рис. 3.2.4. Изменение максимальной толщины льда (1) и средняя за многолетний период толщина льда (2) на реках Печора(А), Онега (Б), Мезень и Вашка (В); Сухона, Ема, Юг, Северная Двина, Вычегда (Г)

С переходом температуры воздуха через 0 градусов Цельсия в область положительных значений начинается процесс деградации ледового покрова и его постепенное разрушение, начинающееся с подвижек и закраин. Таким образом, деградация ледового покрова начинается задолго до его разрушения и появления подвижности, поэтому говорить лишь об механическом факторе разрушения ледового покрова весной не совсем корректно [Панов, 1960], всегда имеет место группа факторов, основным из которых для северных рек, действительно, является механическое разрушение ледового покрова под воздействием прибывающей воды. Однако, в последнее время в связи с изменением климата наметилась тенденция к усилению роли теплового воздействия на ледовый покров, что обусловлено увеличением температуры воздуха и уменьшением водности рек в начальный период вскрытия за счет стаивания части снежного покрова в зимний период. Таким образом, в условиях дефицита водности период интенсивного воздействия солнечной радиации на ледовый покров увеличивается, что отражается в увеличении периода времени от первых подвижек льда до начала ледохода. В целом, начало деградации ледового покрова сместилось на более ранние сроки, что наравне со смещением сроков замерзания на более поздние привело к существенному уменьшению длительности ледостава на всех реках исследуемого региона.

На реке Печоре в зависимости от широты местности последний день устойчивого ледостава приходится на конец апреля — первую половину мая. В редких случаях при раннем вскрытии притоков и вышележащих участков реки возможны ситуации вскрытия конкретного участка реки на фоне отрицательных температур воздуха. Таким образом, средняя продолжительность ледоставного периода составляет 183 дня. Продолжительность ледостава за счет смещения сроков замерзания и вскрытия уменьшается на всех пунктах наблюдений, но наибольшее ее уменьшение отмечается в среднем течении реки; в истоке и устье эти изменения минимальны, в связи с гораздо большим влиянием локальных факторов. При этом можно отметить тесную статистическую связь между датой первого дня ледостава и длительностью ледостава, характеризуемую средним коэффициентом корреляции, равном 0,76, что может быть использовано для

долгосрочного прогнозирования. Период от начала деградации ледового покрова до его разрушения и начала весеннего ледохода занимает всего несколько дней. Как правило, за этот период уровни значительно возрастают, в отдельные годы наоборот, может наблюдаться их снижение, что приводит к достаточно низким уровням воды весеннего ледохода. После того, как уровни воды достигли критического значения, при которых ледовый покров уже более не в состоянии сдерживать прибывающую воду начинается период весеннего ледохода.

Разрушение ледостава на реке Онеге начинается в начале третьей декады апреля, при этом из-за существенного повышения температуры воздуха в весенний период происходит еще более значимое смещение сроков вскрытия ($R = -0,41$). В большинстве случаев разрушение ледового покрова начинается на реке Онеге в обратном замерзанию порядке: первым вскрывается среднее течение у д. Надпорожский погост, затем со средней с разницей 20 дней вскрывается исток и устье. На реке Онеге средняя продолжительность ледостава заметнее всего уменьшилась на порожистых участках реки. Изменение продолжительности ледостава в устье и на озере Лача не столь заметны, но остаются статистически значимыми. Средняя продолжительность ледостава на реке Онеге составила 167 дней в нижнем и 134 в верхнем течении, на озере Лача средняя продолжительность ледостава составила 176 дней.

Последний день ледостава на реках Мезень и Вашка, предшествующий подвижкам льда и ледоходу, с разницей в несколько дней приходится на конец апреля — начало мая по всей длине реки. Высший уровень за весь ледостав наблюдается, как правило, в конце зимы лишь для верховьев и в отдельные годы, когда образуются мощные зажоры льда, он может наблюдаться в начале ледостава. К концу ледостава уровни значительно повышаются, и после серии подвижек начинается ледоход. Сроки начала разрушения ледового покрова смещаются на более ранние, уровни воды при этом незначительно падают, лишь в деревне Большая Пыса данное падение оказалось статистически значимым. Продолжительность ледостава из-за смещения сроков замерзания и вскрытия сократилась на всех гидрологических постах Мезени и Вашки. В среднем продолжительность ледостава составляет 175 дня за весь период наблюдений и

170 дней после 1980 года, изменение составило от 7 до 18 дней, более затронув верхнее и среднее течение реки.

Для Северной Двины и ее притоков характерно статистически значимое уменьшение длительности ледоставного периода до двух недель, в среднем 10 дней. Длительность ледостава изменяется от истока к устью, где она достигает наибольших значений, так, средняя многолетняя продолжительность ледостава в Усть-Пинеги — 168 дней, тогда как на Сухоне в районе Готьмы — 137 дней.

Таким образом, следствием изменения сроков замерзания и вскрытия рек стало уменьшение продолжительности ледостава на всех рассмотренных пунктах наблюдений в среднем на 10 дней (рис. 3.2.5).

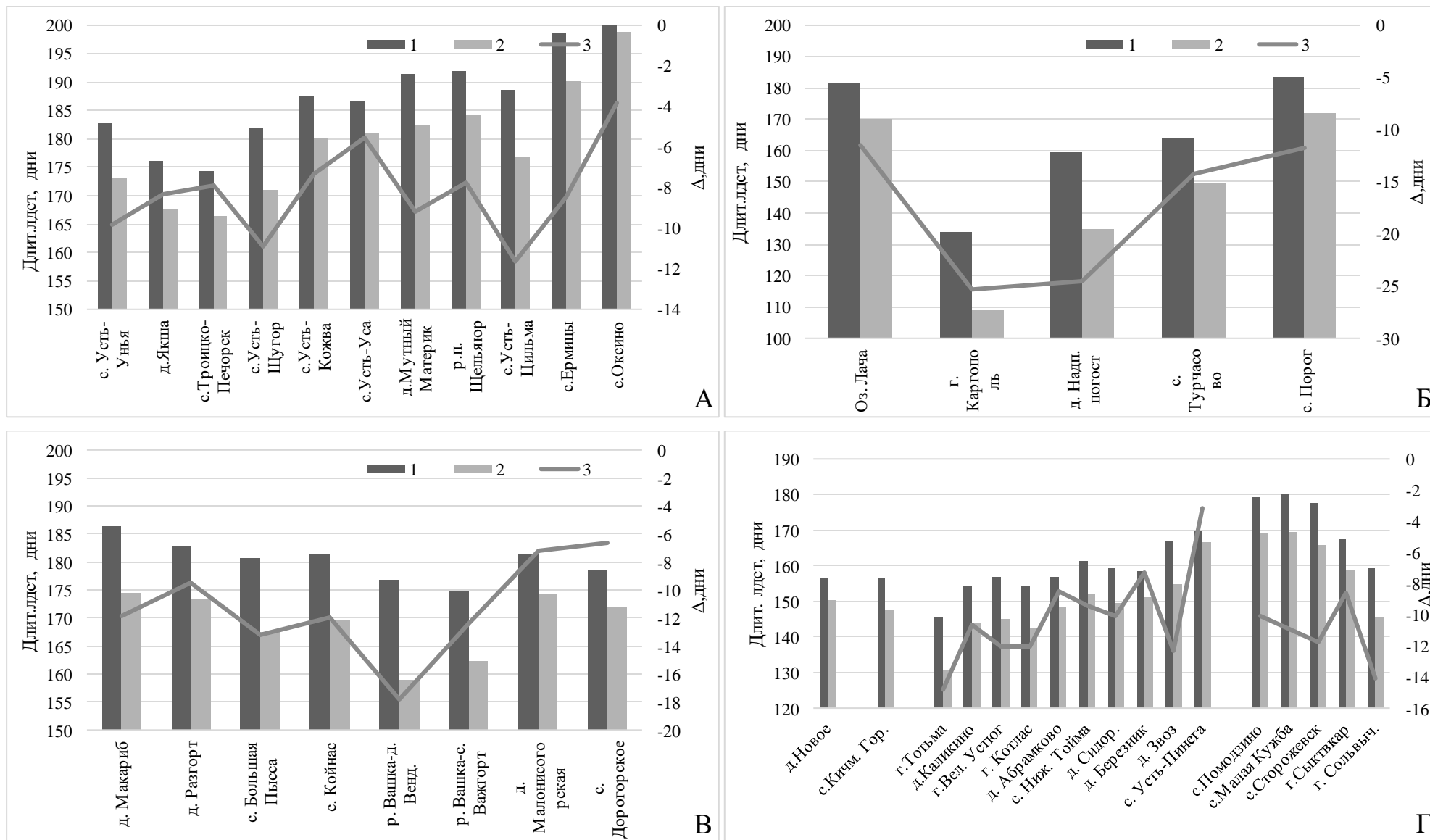


Рис. 3.2.5. График изменения продолжительности ледостава за период 1950–1980 гг. (1) и 1981–2018 гг. (2) и разница между ними (3) на реках Печора(А), Онега (Б), Мезень и Вашка (В); Сухона, Ема, Юг, Северная Двина, Вычегда (Г)

Регрессионный анализ показал, что средняя продолжительность ледостава находится в тесной зависимости от температуры октября—ноября и апреля (множественный коэффициент корреляции 0,80, средняя абсолютная ошибка регрессионного уравнения 7 суток).

Устойчивый ледостав на реках Кольского полуострова начинается с смерзания шуги. При этом образование ледостава происходит не постепенно по мере накопления отрицательных температур воздуха, а с понижением температуры до критических значений и смерзанием шуги в ранее образовавшихся зажорах, которые могут сохраняться до самой весны. Сроки образования устойчивого ледостава незначительно смещаются на более поздние, хоть это смещение и не является статистически значимым (рис. 3.2.6).

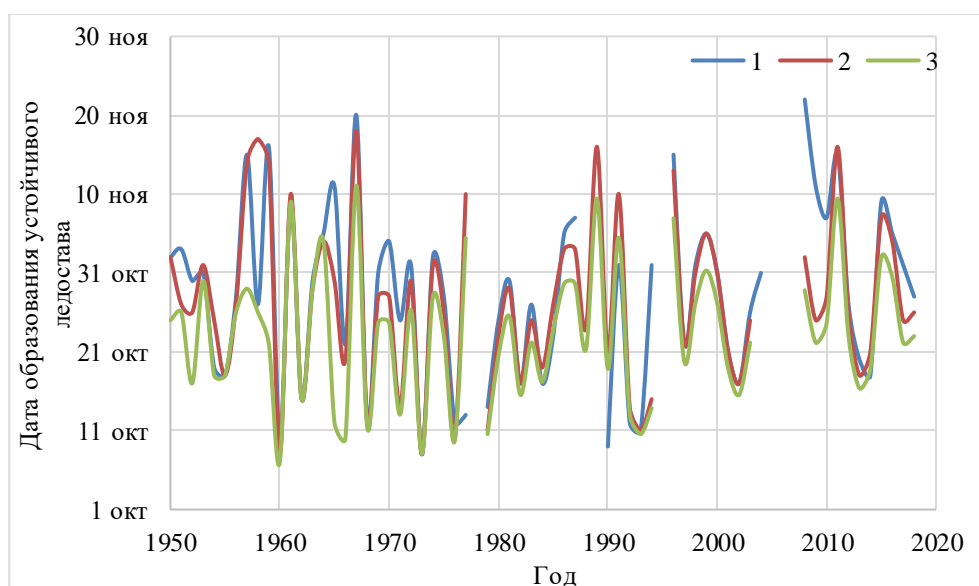


Рис. 3.2.6. Изменение сроков образования устойчивого ледостава на р. Поной — с. Краснощелье (1), р. Коле — 1428 км Октябрьской железной дороги (2) и р. Вороньи — с. Воронье (3).

Точная дата образования устойчивого ледостава сильно зависит от водности рек и метеорологической обстановки, таким образом, вариация дат относительно высока. В первые дни ледостава уровни воды значительно повышаются, достигая зачастую высшего значения за весь период ледостава, что обусловлено влиянием зажоров льда. В отдельные годы с мощными зажорами и оттепелями повышение уровня воды может продолжаться вплоть до середины зимы и дольше. Можно отметить, что ледовый режим рек Кольского полуострова в осенний и начало

зимнего периода очень разнообразен и обусловлен влиянием группы факторов, основными из которых являются относительно высокие температуры воздуха, большие уклоны водной поверхности, озерное и антропогенное регулирование. Нарастание толщины льда достаточно интенсивное, особенно на реке Поной и в истоке реки Колы, которые находятся вне влияния теплых течений, из-за чего максимальная толщина льда нередко может достигать метровых отметок, на других реках толщина льда редко превышает 60 сантиметров (рис. 3.2.7).

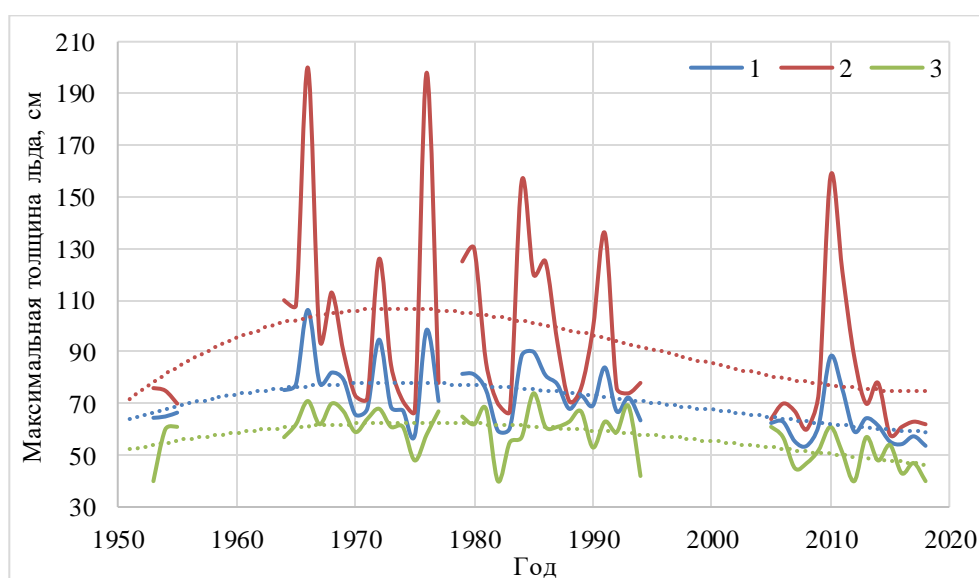


Рис. 3.2.7. Изменение средней (1), максимальной (2) и минимальной (3) наибольшей толщины льда по территории Кольского п-ова.

Продолжительность ледостава на реках Кольского полуострова составляет в среднем 182 дня. За счет смещения сроков вскрытия выявлено статистически значимое уменьшение продолжительности ледостава, которое в пределах Кольского полуострова составляет в среднем 7 дней. Наибольшая продолжительность ледостава отмечается в восточной части Кольского полуострова [Банщикова, Сумачев, 2021].

3.3. Ледовый режим в период вскрытия

При устойчивом переходе температуры воздуха через 0 °С на реках начинается деградация снежного, а затем и ледового покрова, увеличивается приток воды с поверхности водосборных бассейнов. По мере развития этих процессов начинается деградация ледового покрова сверху под воздействием солнечной радиации и снизу под воздействием теплообмена с теплыми водными

массами, происходит таяние льда и вдоль берега, что приводит к образованию закраин.

Таяние снега приводит к появлению воды на поверхности льда. Подъем уровней воды в следствие продолжающегося половодья приводит к увеличению механического воздействия на лед, который, будучи еще крепко связанным с берегами реки, испытывает колоссальные нагрузки на изгиб, в случае образования промоин вода может выходить на лед и течь по нему. Испытывая колоссальные нагрузки на изгиб, лед вспучивается, в его структуре появляются растущие трещины, продолжающаяся деградация ледового покрова с берегов приводит к образованию растущих закраин и, в конечном счете, лед, не выдерживая напора прибывающей воды, отрывается от берегов и происходит подвижка льда. Подвижки льда являются первым свидетельством об утрате ледовым покровом целостности и монолитной структуры и предвестником полного его разрушения и образования весеннего ледохода. При подвижках происходит раскалывание сплошного ледового покрова, торошение льда, подныривание льдин под сохранившийся ледовый покров.

Дальнейшее увеличение расходов воды, равно как и уменьшение прочности ледового покрова под влиянием солнечной радиации, приводит к нарастающим деформациям льда. Разрушенный ледовый покров приходит в движение с образованием ледохода различной густоты, как правило степень густоты ледохода зависит от степени деградации ледового покрова на момент его начала, так, на крупных реках, где ледоход под действием механических факторов начинается при относительно крепком ледовом покрове, в первые дни, как правило, наблюдается густой ледоход, на средних реках, где тепловая деградация ледового покрова вносит более значимый вклад в его разрушение, может наблюдаться средний или редкий ледоход, для малых и истоков крупных рек, где ледовый покров тает на месте, весенний ледоход не является обязательным элементом ледового режима. После ледохода на крупных реках на берегах могут оставаться навалы льда, которые сохраняются достаточно долгое время [Донченко, 1987]

Процесс вскрытия на большинстве рек определяют, как тепловые, так и динамические факторы. Обычно выделяют три основных типа вскрытия рек

[Донченко, 1987]. Для первого типа (малые и средние реки, отличающиеся небольшой водностью в этот период, а также реки, промерзающие до дна – верхнее течение Сухоны) характерно разрушение ледового покрова из-за поверхностного и внутреннего таяния льда под влиянием солнечной радиации, теплообмена с атмосферой и водной массой. Лед тает на месте с интенсивностью 0,3–4,5 см/сут в зависимости от структуры и строения ледового покрова.

На реках второго типа (средние и большие реки – Пинега, Вычегда, нижнее течение Сухоны) разрушение ледового покрова происходит как путем таяния, так и в результате динамического напряжения, превышающего предел прочности льда и возникающего под воздействием энергии потока и ветра. Вскрытие сопровождается образованием закраин, подвижками, расчленением ледового покрова на поля и льдины, ледоходом различной интенсивности и продолжительности.

Для рек третьего типа (большие и средние реки в годы повышенной водности — Северная Двина, Печора, Мезень) характерно разрушение ледового покрова в основном под влиянием динамического воздействия потока при достаточно большой интенсивности и скорости движения волны половодья. Вскрытие сопровождается образованием заторов при взломе мощного и прочного ледового покрова или при движении льда в местах недостаточной ледопропускной способности русла в результате потери устойчивости, торшения и сжатия ледяных полей и льдин.

Высший уровень воды за период весеннего ледохода в зависимости от погодных условий и характера вскрытия наблюдается либо в его середине, либо в конце, в устьях крупных притоков не редки случаи, когда наблюдаемый максимум отмечается при вторичном ледоходе. В начале весеннего ледохода высшие уровни формируются редко и, как правило, связаны с заторами льда. Процесс вскрытия рек подробно описан в научной литературе и зависит от множества факторов, определенных географическими особенностями и процессами, развивающимися в предледоходный и ледоходный периоды. Для крупных рек, текущих с севера на юг, конец ледостава и начало весеннего ледохода, который определяется потерей ледоставом монолитности и приобретением подвижности, определяется

прочностью ледового покрова, величиной нарастания и абсолютными значениями уровней воды, предшествующими ледоходу. Таким образом, на северных реках в большинстве случаев ледовый покров не всегда успевает сколько-нибудь значительно подвергнуться воздействию положительных температур воздуха и, как следствие, его разрушение происходит в большей степени под воздействием прибывающей воды. Из-за неравномерного вскрытия на реках, текущих с юга на север, нередко заторы льда, которые образуются в местах сужения русел рек или в местах, где ледовый покров наиболее прочен и, как следствие, не может быть разрушен водой и льдом прибывающими сверху. Местоположения образования заторов льда, как правило, постоянны и определяются морфометрическими характеристиками русла.

Эмпирические распределения высших уровней воды за период весеннего ледохода на реке Печоре зачастую имеют положительную асимметрию, что связано с влиянием заторов льда. Дисперсия увеличивается от истока к среднему течению, достигая в этой области максимальных значений, немного уменьшаясь к устью реки. Мощные заторы льда, характерные для Усть-Щугра, приводят к появлению выбросов, с их учетом, данный пост имеет наибольший размах (рис. 3.3.1).

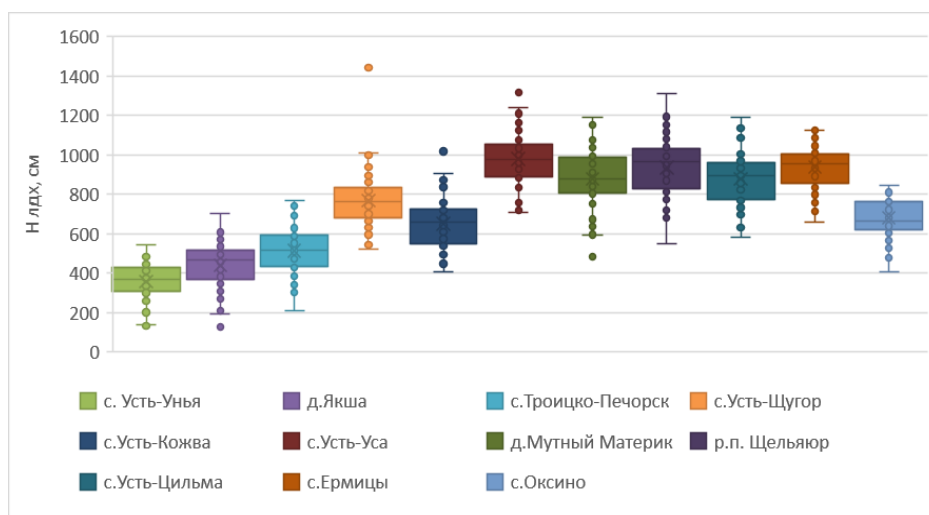


Рис. 3.3.1. Эмпирические распределения высших уровней воды за период весеннего ледохода реки Печоры за 1950-2018 гг.

По данным каталога заторных участков рек [Каталог..., 1976] на реке Печоре 15 заторных участков. При анализе ледовой обстановки и уровенных характеристик за многолетний период выявлено уменьшение повторяемости и

мощности этих явлений, так, для села Усть-Унья повторяемость образования заторов льда составляет 23%, деревни Якша — 39%, на участке у села Троицко-Печорск и у села Усть-Цильма повторяемость практически не изменилась 39% и 35% соответственно, села Усть-Щугор — 39%, села Усть-Кожва — 61% (наибольшая повторяемость заторов на всем течении реки), села Усть-Уса — 17%, д. Мутный Материк — 31%, в нижнем течении повторяемость составляет для села Ермицы — 47%, села Оксина — 20%. Сроки очищения реки от льда различны, как вследствие широтной зависимости, так и по причине влияния крупных притоков, некоторые из которых могут вскрываться значительно позже основной реки, формируя вторичный ледоход, зачастую с еще большими уровнями воды. К примеру, река Уса формирует вторичный ледоход на реке Печоре, увеличивая сроки очищения реки ото льда на основной реке на 2 дня по сравнению с участком реки вблизи деревни Мутный Материк.

Река Онега вскрывается крайне неравномерно. Формирование высшего уровня воды за период весеннего ледохода, в первую очередь, зависит от уровня воды и его нарастания в озере Лача. Из-за подобного характера вскрытия реки заторы льда характерны только для района реки ниже с. Турчасово, где повторяемость заторов льда достигает по многолетним данным о режиме и ресурсах поверхностных вод суши и водного кадастра 30%, при этом с учетом непродолжительных заторов льда их общая повторяемость может быть значительно выше приведенной цифры. Высший уровень воды за период весеннего ледохода в верховьях реки в подавляющем большинстве случаев имеет смешанный генезис и обуславливается как продолжающимся половодьем, так и ледоходом с озера Лача, при этом можно отметить, что весенний ледоход в верховьях реки не имеет стопроцентной повторяемости и в отдельные годы может отсутствовать вовсе. Формирование высшего уровня воды за период весеннего ледохода также начинается с села Турчасово, затем с разницей в несколько дней высший уровень отмечается в селе Порог. Высший уровень воды за период весеннего ледохода до деревни Надпорожский погост отмечается при вторичном ледоходе, первичный ледоход отмечается редко и может вызывать заторы льда ниже по течению. Небольшая повторяемость весеннего ледохода и непостоянная

заблаговременность, которая в том числе часто может быть отрицательной в случаях, когда высшие уровни на озере Лача отмечаются позже, чем в верховьях Онеги, осложняет прогнозирование высших уровней воды за период весеннего ледохода, поэтому в верховьях более целесообразно прогнозирование высшего за год уровня воды, который наблюдается на несколько дней позже прохождения вторичного ледохода и находится в тесной зависимости с высшими за год уровнями воды в озере Лача при заблаговременности 2—5 дней. Высший уровень за период весеннего ледохода в низовьях реки Онеги имеет стопроцентную повторяемость и наблюдается в конце апреля, при этом отмечается хорошая связь с уровнями воды, приуроченными к концу ледостава и подвижкам льда, так, парный коэффициент корреляции между высшим предледоходным уровнями воды и высшими уровнями воды за период весеннего ледохода составляет в селе Турчасово +0,81 со средней заблаговременностью 2 дня, +0,59 в селе Порог со средней заблаговременностью 4 дня. Эмпирические распределения высших уровней воды за период весеннего ледохода на реке Онеге имеют положительную и отрицательную асимметрию, но все же близки к нормальному распределению, наибольший разброс характерен для заторного участка близ с. Турчасово (рис. 3.3.2).

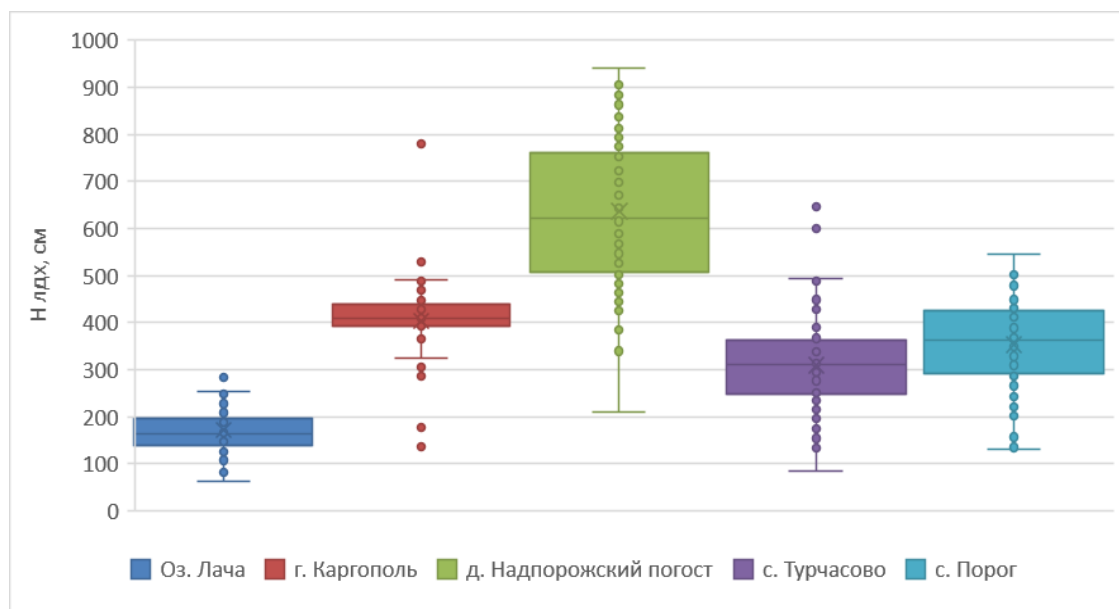


Рис. 3.3.2. Эмпирические распределения высших уровней воды за период весеннего ледохода реки Онеги за 1950-2018 гг.

Ледоход на реках Мезень и Вашка, как и на большинстве крупных рек изучаемого региона, начинается с серии подвижек льда. Естественно, начало подвижек льда и, как следствие, ледохода связано с прочностью льда, которая может быть приближенно оценена как его максимальная за зиму толщина, степень деградации ледового покрова, которая обусловлена повышением температуры в начале весны, а также характером весеннего снеготаяния и объемом прибывающей воды. В редких случаях, после подвижек из-за возвращения холодов, ледоход может не развиться, таяние льда при этом будет проходить более интенсивно с нижней поверхности, с образованием промоин и закраин, густой ледоход при этом может не сформироваться. Высшие уровни воды за период весеннего ледохода на реках Мезень и Вашка наблюдаются, как правило, на несколько дней (в среднем от 2 до 5 дней) позже подвижек льда. Сроки формирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода незначительно сместились на более ранние, а значения высших предледоходных и ледоходных уровней воды уменьшились, на некоторых постах значительно, что связано со стаиванием части снегозапасов в зимний период. Данная тенденция приводит к тому, что из-за недостаточной для вскрытия кинетической энергии водного потока, увеличивается, пока статистически незначимо, но повсеместно весенний переходный период, а значит среди факторов, определяющих характер вскрытия, возрастает значимость теплового воздействия на ледовый покров, следовательно, в настоящее время на реках Мезень и Вашка, несмотря на доминирование механических факторов вскрытия, наметилась четкая тенденция к усилению влияния процессов таяния льда от теплового воздействия в весенний переходный период. Эмпирические гистограммы распределение высших уровней воды за период весеннего ледохода в большинстве случаев имеют незначительные отклонения от нормального распределения (рис. 3.3.3). Особо большие значения высших уровней воды за период весеннего ледохода, сопряженные, как правило, с заторами льда, являются высшими за год.

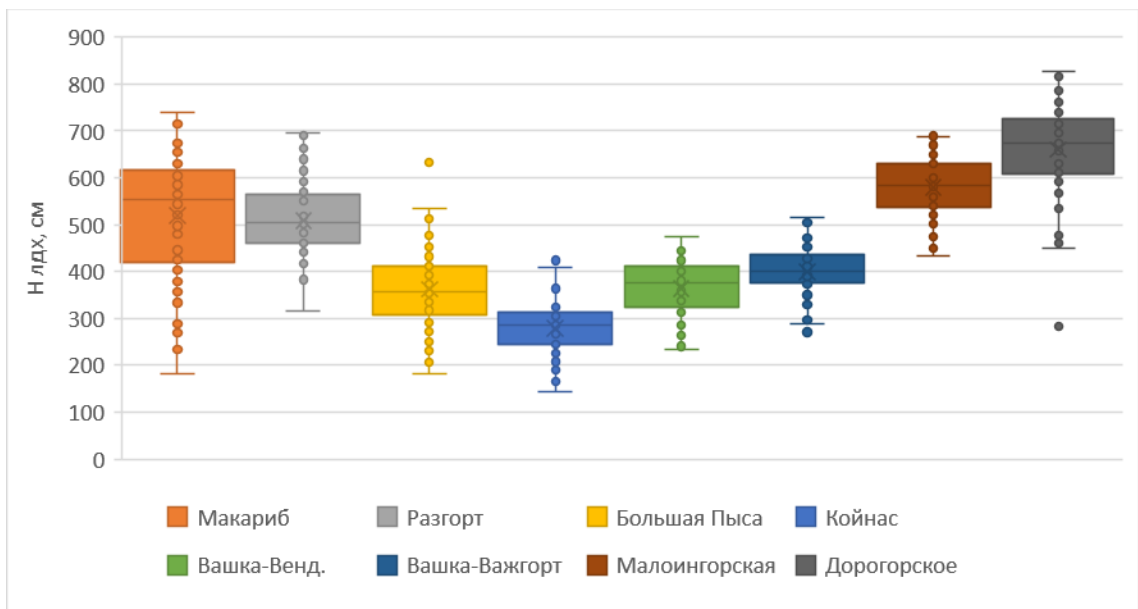


Рис. 3.3.3. Эмпирические распределения высших уровней воды за период весеннего ледохода рек Мезень и Вашка за 1950-2018 гг.

Корреляция между высшими уровнями воды за период весеннего ледохода на реке Мезень относительно невысокая и, как правило, не превышает 0,65, а в среднем составляет 0,48, что объясняется сильным влиянием отдельных притоков, так, парный коэффициент корреляции между рекой Вашкой — Вендинги и рекой Мезень — Разгорт, достигает 0,77 при средней заблаговременности 2 дня. Прогнозирование высшего уровня воды за период весеннего ледохода с большой заблаговременностью, например, по данным высших уровней воды в начале ледостава затруднительно или даже невозможно по причине низких коэффициентов корреляции, которые не превышают 0,4, тем не менее, высшие уровни в начале ледостава могут быть использованы в качестве дополнительных предикторов.

Для Северной Двины и ее основных притоков характерно быстрое вскрытие после серии подвижек с образованием густого ледохода, который в ряде случаев, особенно в местах слияния и сужения рек, может становиться причиной заторов льда. Также мощные заторы льда образуются в районе дельты, так, в 1961 году в результате мощного затора была затоплена половина Архангельска [Бужин, 2015]. Для Северной Двины и Сухоны характерны высокие коэффициенты корреляции для связи высших уровней в начале ледостава с высшими уровнями весеннего ледохода, что может быть использовано при прогнозировании. Эмпирические

гистограммы распределения высших уровней воды за период весеннего ледохода на Северной Двине также близки к нормальному распределению, а разброс точек возрастает к среднему течению реки (рис. 3.3.4).

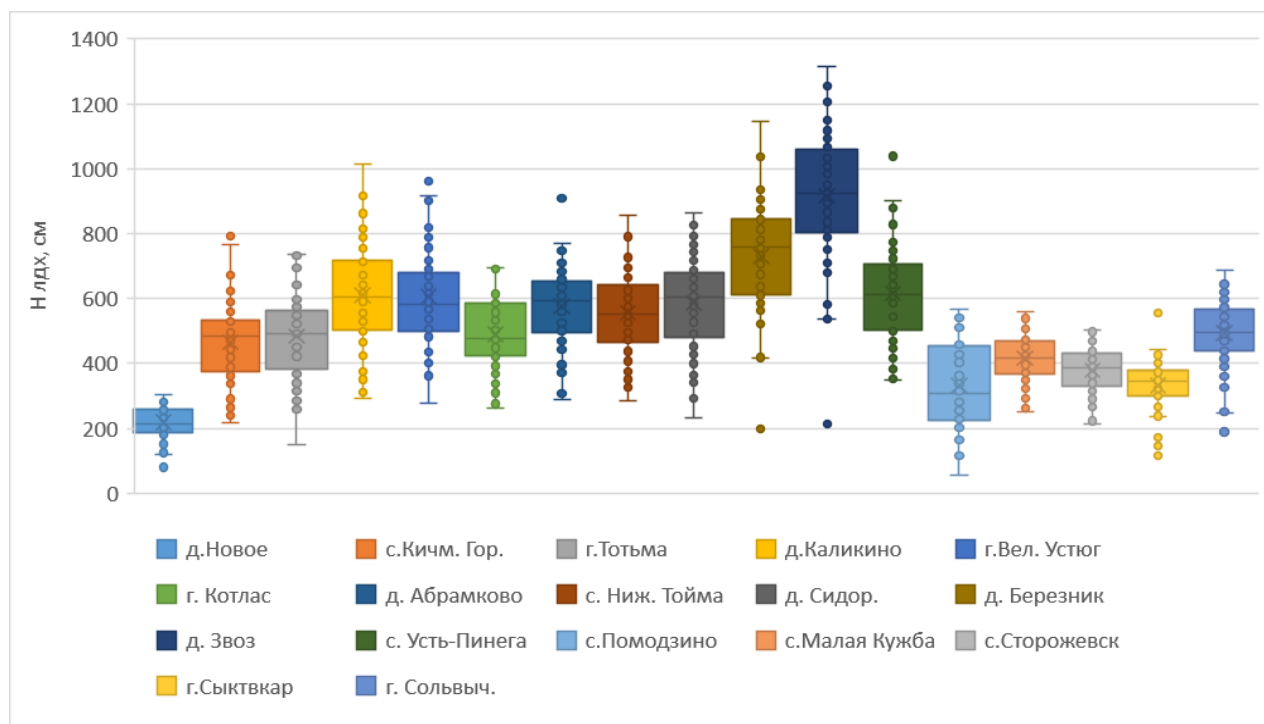


Рис. 3.3.4. Эмпирические распределения высших уровней воды за период весеннего ледохода рек Емы, Юг, Сухоны, Северной Двины, Вычегды за 1950-2018 гг.

Очищение рек ото льда происходит в течение нескольких дней после формирования высшего ледоходного уровня воды, однако еще долгое время могут сохраняться навалы льда на берегах, представляющие определенную опасность.

В среднем очищение реки Печоры ото льда происходит с 10 мая в верхнем течении по 24 мая в нижнем, исключением является участок реки близ д. Усть-Уса, где очищение реки ото льда в среднем происходит 27 мая (рис. 3.3.5А). Наблюдаемые тренды к смещению дат на более ранние и к снижению уровней воды являются статистически незначимыми. Также можно отметить хорошую статистическую связанность дат и уровней воды.

Очищение реки Онеги ото льда происходит в первой половине мая. Таким образом, продолжительность всех ледовых явлений составляет порядка 180 дней (рис. 3.3.5Б). Повторяемость опасных ледовых явлений на реке Онега в целом не претерпела значительных изменений, так зажоры или заторы льда в районе с.

Турчасово наблюдаются практически ежегодно, тогда как для остальных рассмотренных участков реки данные явления не столь часты [Бузин, 2015].

После формирования высшего ледоходного уровня ледоход на реках Мезень и Вашка в отдельные годы может продолжаться достаточно долго, но в среднем не превышает 5 дней. Таким образом, в среднем полное очищение реки Мезень и Вашка ото льда происходит до 12 мая, однако еще достаточно долгое время могут сохраняться навалы льда на берегах. Продолжительность всех ледовых явлений составила порядка 198 дней (рис. 3.3.5В).

На Северной Двине и притоках в силу географического положения и большей протяженности в южном направлении длительность всех ледовых явлений меньше и составляет порядка 183 дней (рис. 3.3.5Г).

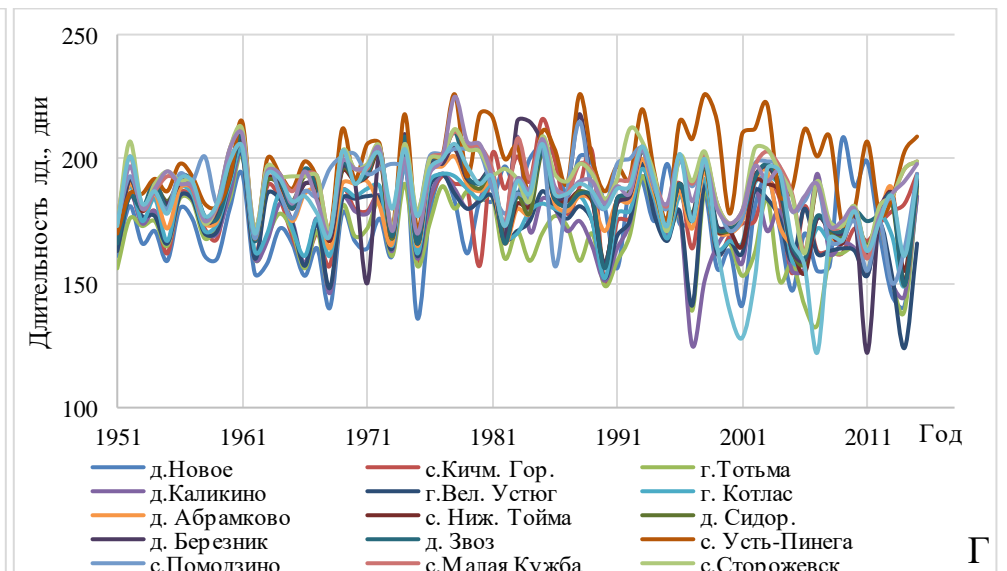
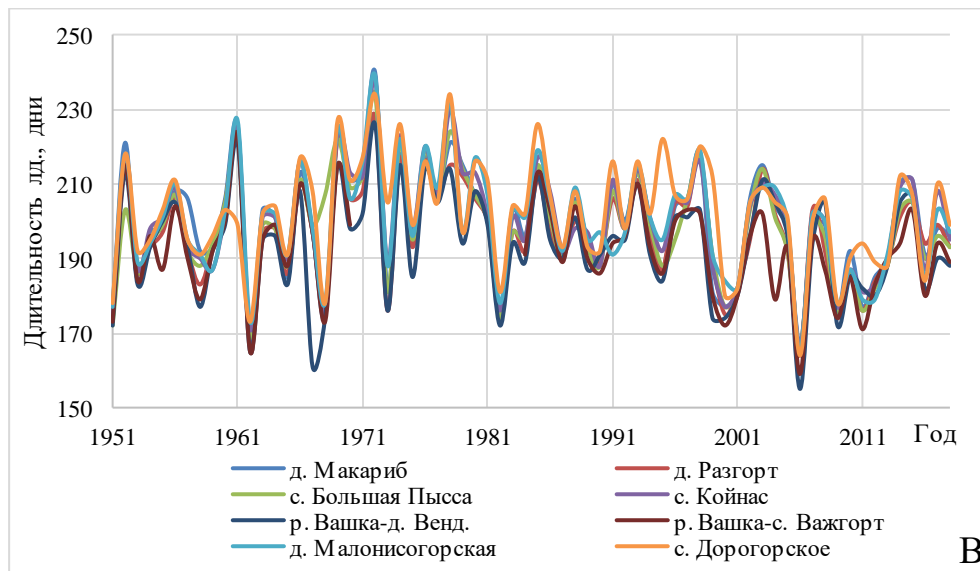
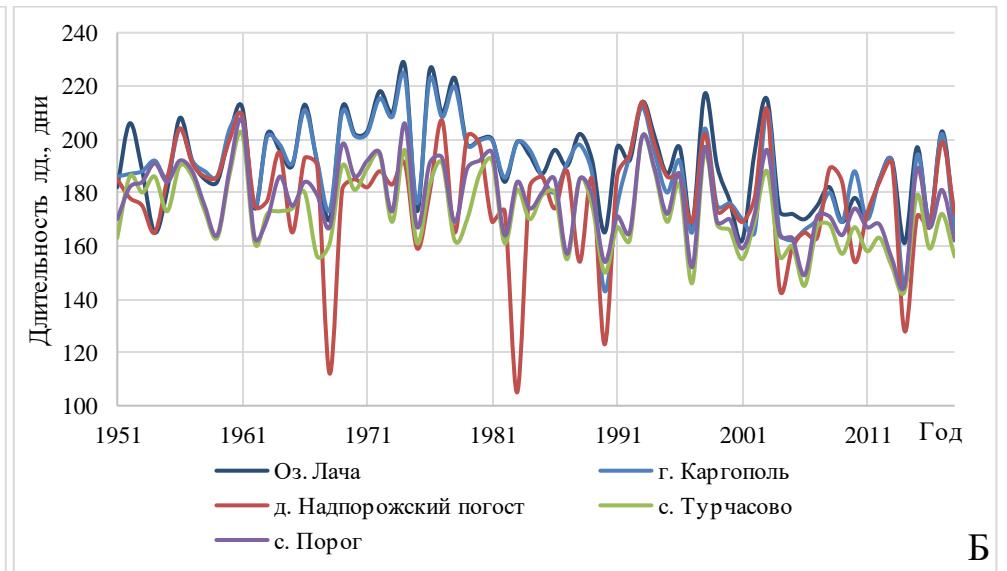
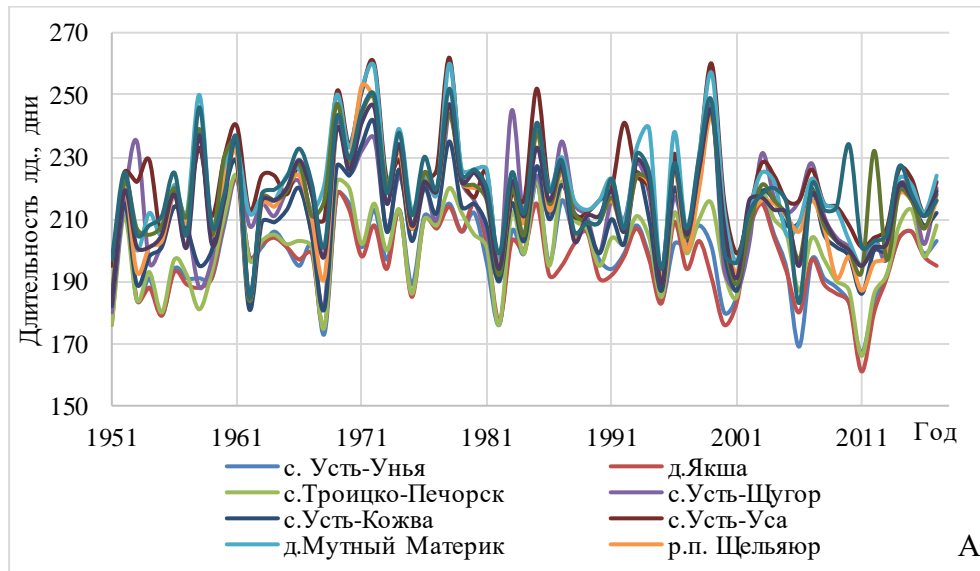


Рис. 3.3.5. Средняя продолжительность всех ледовых явлений на реках Печора (А), Онега (Б), Мезень (В) и Северная Двина(Г) за 1950-2018 гг.

Пространственное распределение средней продолжительности всех ледовых явлений в пределах Двинско-Печорского бассейнового округа повторяет распределение средних за холодный сезон температур воздуха, что дополнительно свидетельствует об взаимосвязанности климатических и гидрологических процессов в глобальном масштабе (рис. 3.3.6)

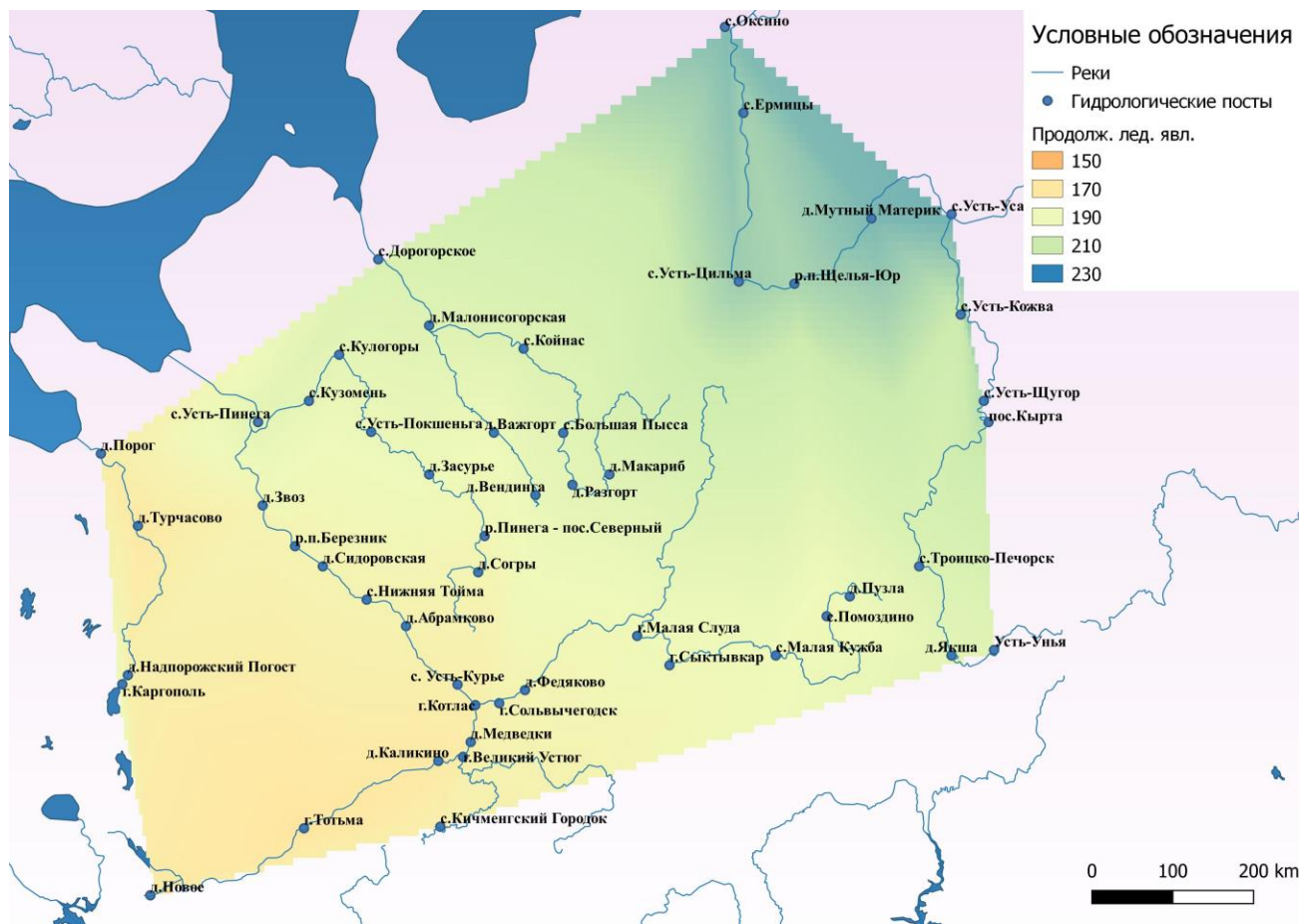


Рис. 3.3.6. Распределение средней продолжительности всех ледовых явлений в пределах Двинско-Печорского бассейнового округа.

Основными характеристиками ледового режима рек Кольского полуострова в период вскрытия являются высший уровень воды за период ледохода и вероятность образования заторов льда. Вероятность образования заторов льда не претерпела значительных изменений, и на многих реках Кольского полуострова заторы льда наблюдаются повсеместно. При этом в силу особенностей рельефа, высоких берегов и отсутствия поймы заторные подъемы уровня могут быть значительны, к примеру, на реке Поной в селе Поной заторы льда наблюдаются ежегодно с началом ледохода, при этом подъемы уровня составляют порядка 4 метров по отношению к предледоходному периоду. Отсутствие пойменных

земель, ежегодная повторяемость и, как следствие, осведомленность населения о рисках минимизирует наносимый ущерб. Так как заторы льда образуются практически ежегодно и не влияют на асимметрию рядов, высшие уровни за период весеннего ледохода (включая заторные) имеют близкое к нормальному распределение (рис. 3.3.7), при этом отмечаются статистически незначимые тренды к снижению высших уровней воды за период ледохода, что может быть объяснено перераспределением стока внутри года.

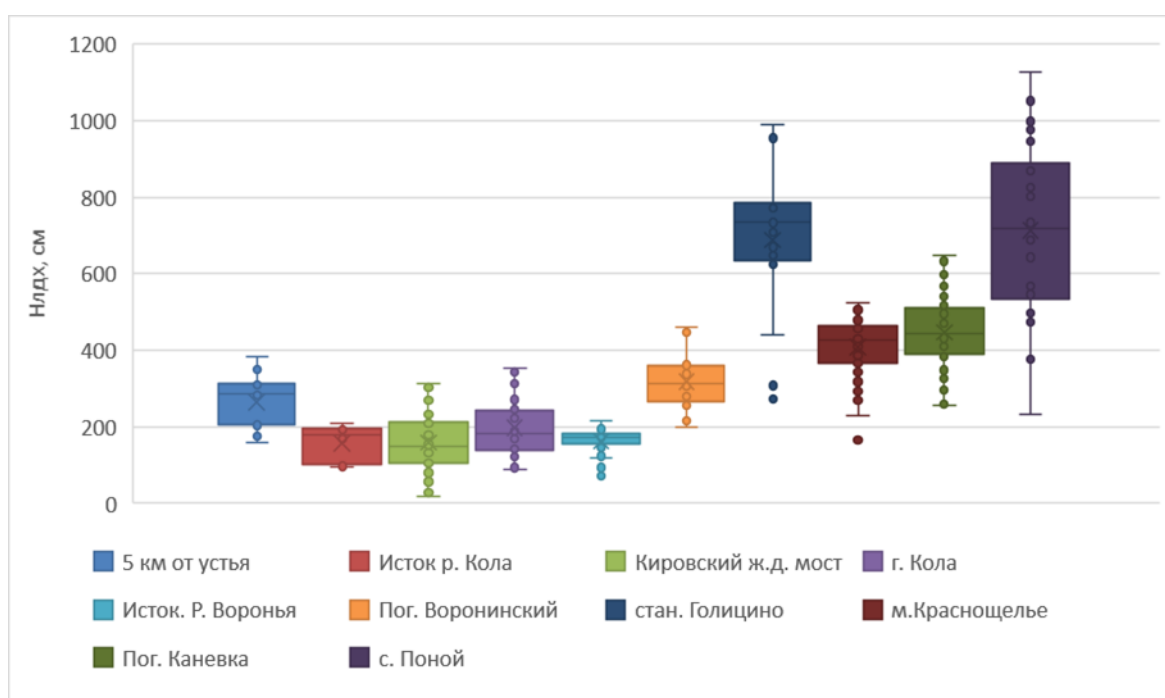


Рис. 3.3.7. Эмпирические распределения высших уровней воды за период весеннего ледохода рек Кольского полуострова за 1950-2018 гг.

Высшие уровни воды при ледоходе на большинстве рек Кольского полуострова не приводят к подтоплению объектов инфраструктуры. При этом можно отметить, что высшие уровни весеннего ледохода характеризуются достаточно высокими коэффициентами автокорреляции (к примеру, связь между ледоходными и предледоходными уровнями достигает на реке Поной в районе г. п. Краснощелье 0,72) и даже пространственной взаимосвязанностью (связь высших уровней на реке Поной и реке Воронья по данным 25 лет совместных наблюдений характеризуется коэффициентом корреляции равном 0,80). Таким образом, развитие процессов вскрытия рек практически детерминировано,

стохастичность в этот процесс вносят в первую очередь характеристики заторов льда (мощность заторных скоплений, длительность и т.д.).

3.4. Влияние изменений климата на ледовый режим и долгосрочный прогноз характеристик ледового режима

Ледовый режим, как было рассмотрено, выше сильно зависит от климатических условий, в частности, все основные фазы ледового режима начинаются с накоплением определенной суммы отрицательных или положительных температур в зависимости от водности. В настоящей работе по данным метеорологических станций, расположенных в тех же местах, что и гидрологические посты были рассчитаны суммы отрицательных температур воздуха, необходимые для образования тех или иных ледовых явлений.

В разделе 3.4 рассмотрены четыре основные фазы ледового режима, свойственные всем водотокам — первичные устойчивые ледовые явления, начало устойчивого ледостава, подвижки, начало ледохода. В хронологическом ходе сумм температур воздуха отмечаются разнонаправленные линейные тренды: сумма отрицательных температур заметно снижается по модулю, сумма же положительных температур незначительно повышается.

Для реки Мезени характерно начало устойчивых ледовых явлений в интервале сумм температур от 0 до – 16 °С, после чего образуется устойчивый ледовый покров. Весенние ледовые явления начинаются с переходом среднесуточной температуры воздуха через 0°С. При этом для точного разделения характерных фаз возрастает значимость, как предиктора, уровня воды.

В качестве примера на рисунке 3.4.1 приведен график зависимости характерных фаз ледового режима реки Мезень — Койнас от уровня и суммы отрицательных температур.

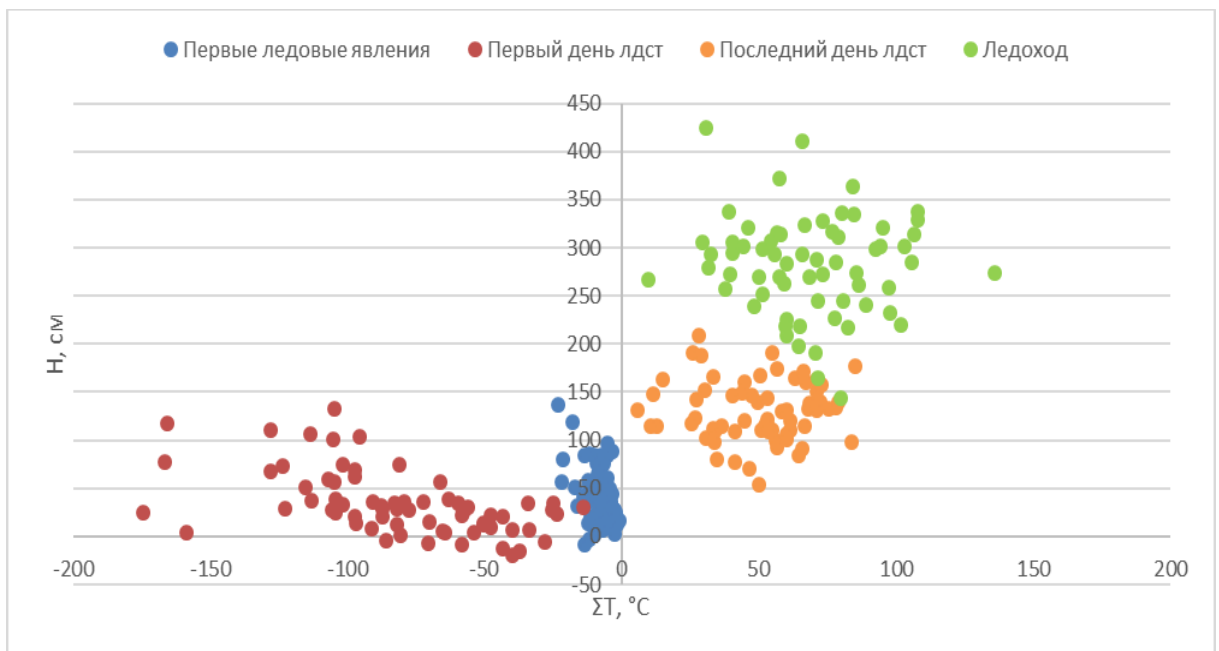


Рис. 3.4.1. График зависимости характерных фаз ледового режима реки Мезень — с. Койнас от уровня и суммы отрицательных и положительных.

На реке Сухоне устойчивый ледостав образуется, когда сумма температур воздуха достигает $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, очищение же реки ото льда в среднем происходит при достижении отметки сумм температур порядка $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.4.2).

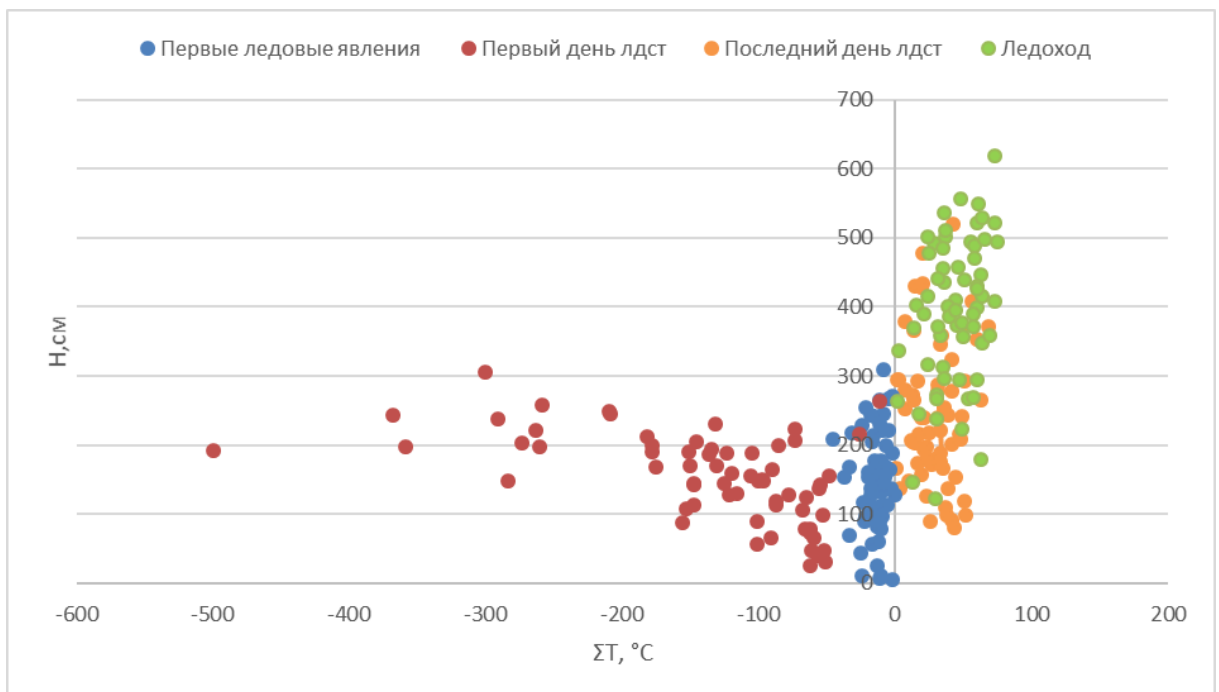


Рис. 3.4.2. График зависимости характерных фаз ледового режима реки Сухона — г. Тотма от уровня и сумм отрицательных и положительных температур.

Несмотря на то, что из графика для реки Сухоны следует, что последний день ледостава и ледоход практически неразделимы, во все отдельно взятые годы сумма температур воздуха и уровень воды ледохода превышает данные характеристики, полученные для ледостава, таким образом, используя дополнительные предикторы, возможно разделить данные явления. Аналогичный метод можно использовать для выделения фазы очищения реки ото льда.

Можно отметить, что при повышенной осенней водности, сумма отрицательных температур, необходимая для образования устойчивого ледостава значительно повышается. Также для реки Сухона характерна линейная зависимость уровня воды в весенний период от суммы температур воздуха (коэффициент корреляции более 0,60).

Влияние многолетней вариации температуры воздуха на образование первичных ледовых явлений рассмотрено на примере всех рек исследуемого региона. Для этого за 2 климатических периода рассчитаны средние температуры воздуха октября и средние даты образования ледовых явлений, аналогичный расчет произведен по длине основных рек, текущих в широтном направлении. Полученная зависимость является линейной и может быть использована для долгосрочного прогнозирования смещения сроков образования и разрушения ледовых образований относительно нормы в зависимости от принятого климатического сценария.

Рассчитав разницы в датах и средних за октябрь температурах воздуха, можно заключить, что при повышении средней за октябрь температуры воздуха на 2 °С сроки появления устойчивых ледовых образований смещаются на 7 день (рис. 3.4.3).

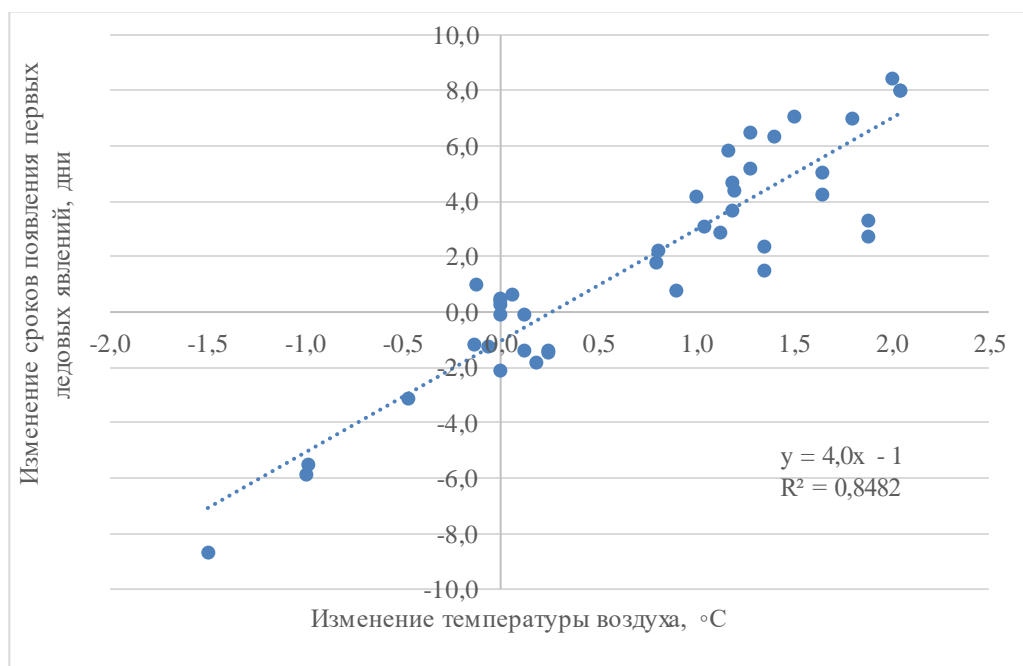


Рис. 3.4.3. Зависимость величины смещения сроков появления первичных ледовых явлений от изменения температуры воздуха.

Для образования устойчивого ледостава данная зависимость практически не выражена, но для последнего дня ледостава снова становится значимой (рис. 3.4.4).

Изменение сроков разрушения ледового покрова рассчитано в зависимости от среднемесячной температуры марта, предшествующей разрушению ледового покрова. Зависимость дат разрушения ледового покрова от температуры воздуха в марте также подтверждает гипотезу об том, что в настоящее время роль теплового фактора на разрушение ледового покрова усиливается.

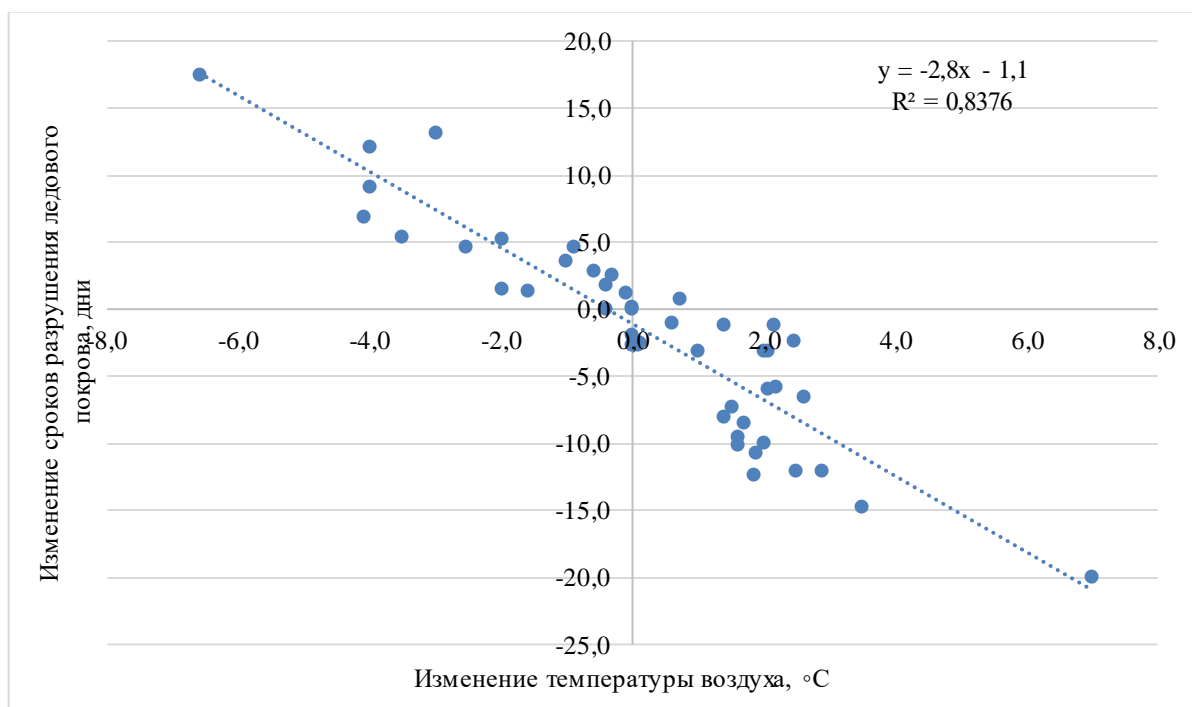


Рис. 3.4.4. Зависимость величины смещения сроков разрушения ледового покрова от температуры воздуха.

Из графика видно, что изменение среднемесячной температуры воздуха за март на 2 °C приводит к смещению сроков разрушения ледового покрова на 7 дней, что является статистически значимым, при этом можно отметить, что данная зависимость также имеет линейный характер.

Резюмируя все вышесказанное о ледовом режиме рек исследуемого региона, можно сделать вывод, что в ближайшее время можно ожидать сохранения или даже усиление выявленных тенденций.

3.5. Классификация участков рек по степени стохастичности формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода

Формирование стока рек и уровней воды происходит в зависимости от множества постоянно и переменного действующих и взаимодействующих факторов, детерминированную связь между которыми выявить чрезвычайно сложно или даже невозможно, что свидетельствует о вероятностной (стохастической) природе формирования стока [Евстигнеев, Магрицкий, 2016], а следовательно, и уровня режима. Там же упоминается и о влиянии динамических факторов формирования стока, к которым авторы относят сезонные и циклические колебания, при этом стоит отметить, что динамические

факторы тем более значимы, чем более зарегулирован речной сток. Преобладание же тех или иных факторов определяет особенности формирования, а значит, и методов прогнозирования характеристик стока и уровенного режимов.

Так как считается, что условия и факторы формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода зачастую имеют стохастическую природу, в настоящее время принято разрабатывать локальные методики прогнозирования высшего уровня воды за этот период в зависимости от наиболее информативных предикторов, при этом не учитываются постояннодействующие факторы, так как они не вносят вклад в вариацию высших уровней. При этом разделение всех рек на несколько групп по условиям формирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода, несомненно, способно значительно облегчить задачу определения наиболее информативных предикторов и позволило бы разрабатывать единые методики прогнозирования для участков рек со схожими условиями формирования высших уровней воды. Классификация при этом может выполняться исходя из множества факторов: относительных величин высшего уровня воды, степени вариации высших уровней (через стандартное отклонение), асимметрии высших уровней воды и, наконец, их связи с высшими предледоходными уровнями воды. Исходя из перечисленных факторов, все реки исследуемого региона по степени стохастичности условий формирования высшего уровня за период весеннего ледохода могут быть разделены на две основные группы и одну промежуточную: реки и участки рек с преимущественно стохастическим механизмом формирования высшего уровня за период ледохода, участки рек с преимущественно динамическим механизмом формирования высшего уровня ледохода. К промежуточной группе относятся участки рек, для которых несмотря на стохастическую природу формирования высшего уровня ледохода значительное влияние имеют динамические факторы и наоборот.

Для первого типа характерны достаточно высокие парные коэффициенты корреляции высших ледоходных уровней с высшими предледоходными. Половодье на них развивается динамическим образом, и высшие уровни воды за период весеннего ледохода не являются высшими в году. Повторяемость заторов льда на данных реках также носит неслучайный характер и варьируется примерно

от 0 до 10% и от 90 до 100%. Коэффициент асимметрии высших уровней для данного типа рек, как правило, отрицателен или близок к 0, вариация уровней невысока. К данному типу рек относятся реки, вытекающие из озер: Онега (с. Турчасово, с. Порог), большинство рек Кольского полуострова, отдельные бесприточные участки крупных рек. Для таких рек возможно создание единой инерционной методики прогнозирования.

Второй тип — это участки рек с сильным влиянием стохастических факторов на формирование высшего уровня воды за период весеннего ледохода. К данному типу, в первую очередь, относятся крупнейшие водные артерии Северного края, особенно в местах слияния рек, где половодье зачастую развивается асинхронно во времени, а высший ледоходный уровень воды зависит от множества факторов, взаимодействие которых сложно учесть при разработке прогностических методик без снижения заблаговременности прогноза. Для данного типа характерен случайный характер образования заторов льда, что само по себе определяет высокую степень неопределенности при прогнозировании высших уровней воды. В случае, если на участке поста периодически образуются мощные заторы льда, для высших уровней воды характерна сравнительно высокая положительная асимметрия. Парные коэффициенты корреляции между высшими предледоходными и ледоходными уровнями воды в большинстве случаев невысоки и требуется нахождение дополнительных предикторов по длине реки на основе метода соответственных уровней при гарантированной заблаговременности прогноза.

К промежуточному, третьему, типу относятся предустьевые участки рек, где повсеместно наблюдается значительно меньшая амплитуда колебаний уровней воды и более высокие парные коэффициенты корреляции с высшими предледоходными уровнями воды, а волна половодья имеет распластанный вид. Особенностью данных участков рек за счет отсутствия боковой приточности и распластанной во времени волны половодья является достаточно инерционный характер нарастания уровня воды, тем не менее, интенсивность нарастания уровня воды зависит от величины и интенсивности поступления воды с вышележащих участков реки. Прогнозирование высшего уровня воды за период весеннего

ледохода на участках, отнесенных к третьему типу, необходимо производить с учетом высшего предледоходного уровня воды на участке поста с добавлением характерных уровней воды вышележащих постов.

Несмотря на то, что данная классификация является во многом условной, так как каждый участок реки имеет свои особенности формирования высшего уровня воды за период ледохода, можно отметить, что отнесение участка реки к одному из классов может осуществляться на основе и географических признаков. К примеру, для рек первого типа характерно озерное регулирование стока и доминирование гидрологических факторов над климатическими, также к первому типу можно отнести бесприточные участки рек большой протяженности. Ко второму типу относятся в первую очередь места слияния крупных рек, включая участки на некотором протяжении ниже по течению, к третьему типу относятся, морские устьевые участки рек, так как волна половодья в замыкающих створах имеет распластаный вид, слабоприточные участки рек. Таким образом, можно заключить, что предложенная классификация участков рек по условиям формирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода может применяться к рекам и характеристикам ледового режима, не рассмотренным в рамках данной работы.

Комплексный анализ гидрометеорологических данных в третьей главе позволил установить статистически значимое влияние изменений климата на ледовый режим, которое заключается в статистически значимом уменьшении длительности ледостава (среднее уменьшение длительности ледостава в пределах Двинско-Печорского бассейнового округа составляет 14 дней, в пределах Кольского полуострова — 7 дней) за счет смещения сроков замерзания и вскрытия в пределах Двинско-Печорского бассейнового округа и за счет сроков вскрытия в пределах Кольского полуострова, уменьшении максимальной толщины льда до 30 сантиметров и периода со всеми ледовыми явлениями (от 2 до 16 дней). Разработана классификация участков рек в зависимости от условий формирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода, которая может применяться как при разработке прогностических методик высшего уровня

воды за период весеннего ледохода, так и других характеристик уровня воды за холодный сезон года.

Глава 4. Повторяемость и риски опасных ледовых явлений

4.1. Современное представление об опасных ледовых явлениях

Изменения, происходящие в климате, существенно повлияли на повторяемость и масштаб опасных гидрологических, в частности, ледовых явлений. Стоит отметить, что материальный ущерб могут наносить не только ставшие традиционными опасные гидрологические явления, связанные с ледовым режимом реки, к которым в первую очередь относятся зажоры и заторы льда, высокие уровни воды в период весеннего ледохода, но и навалы льда на берегу, повреждающие объекты городской инфраструктуры, низкие уровни воды, особенно при ледоходе, способном в данном случае повредить водозаборы и другие гидротехнические сооружения, малая толщина льда и, как следствие, технические сложности при сооружении ледовых переправ, осенние и весенние переходные периоды неблагоприятной продолжительности.

Оценка повторяемости заторов льда в условиях недостаточности наблюдений за ледовым режимом остается достаточно сложной задачей. По данным ежегодных изданий Государственного водного кадастра отмечается резкое снижение повторяемости заторов и зажоров льда после 1968 года, при этом по косвенным данным повторяемость заторов и зажоров не могла резко сократиться. В это же время произошло изменение условных обозначений Государственного водного кадастра, и информация о заторах и зажорах льда стала публиковаться не в примечании, а в таблице ежедневных уровней воды. При этом на начальном этапе реформирования заторы и зажоры льда обозначались одним и тем же знаком, и лишь в XXI веке произошло их разделение. Можно отметить, что сокращение повторяемости зажоров и заторов льда, совпавшее с реформированием условных обозначений, скорее всего, неслучайно. При этом, с одной стороны, более достоверная информация содержится в изданиях до 1968 года и каталогах, так как часто указывалось точное положение головы затора или зажора, с другой стороны, в данных изданиях не указывались точные даты явления. По данным каталога [Каталог..., 1976] заторных и зажорных уровней воды повторяемость заторов и зажоров оценена в сто процентов, что тоже кажется маловероятным для некоторых рек и участков, так как в данном случае бы заторы

и зажоры льда были бы независимы от условий замерзания и вскрытия. Такая картина в силу горного рельефа местности, действительно, характерна для рек Кольского полуострова, что находит сильное отражение в уровненном и вообще всем ледовом режиме, но не для Северного края, где перепад высот не столь велик.

В настоящее время опасные и неблагоприятные природные явления разделены по принципу ожидаемого материального урона. К неблагоприятным явлениям (НЯ) относятся явления, которые по своим характеристикам (величине уровня воды, продолжительности, площади распространения) не достигают критериев опасных явлений, но значительно затрудняют деятельность отдельных отраслей экономики. К опасным явлениям (ОЯ) относятся природные явления, которые интенсивностью, продолжительностью и временем возникновения представляют угрозу безопасности людей, а также могут нанести значительный ущерб отраслям экономики. Как правило, к неблагоприятным и опасным гидрологическим явлениям относятся высокие уровни воды в период вскрытия рек и формирования волны весеннего половодья, низкие уровни воды в период летне — осенней межени, при которых прекращается судоходство, раннее образование ледостава, угрожающее плановому завершению навигации. Анализируя отметки неблагоприятных и опасных явлений, можно заключить, что большинство отметок имеет вероятность превышения около 4–5 % [Каталог, 2017].

4.2. Расчетные формулы для определения потенциальных рисков опасных гидрологических явлений

В виду большого количества угроз и рисков, исходящих от неблагоприятных явлений и процессов, происходящих на водных объектах, актуальной является задача разработки методики оценки потенциального риска различных опасных гидрологических явлений. В работе [Бужин, 2015] предложена методика оценки потенциального риска заторного наводнения. В предложенной автором формуле потенциальный риск заторного наводнения складывается из высоты превышения уровня однопроцентной обеспеченности над поймой и вероятности затопления поймы, то есть вероятности наступления неблагоприятного события. При этом автор отмечает, что чем реже в данной

местности пойма подвержена затоплению, тем больше потенциальный риск и опасность наводнения. При низкой пойме и мощных заторах, наводнения могут быть почти ежегодно. В этом случае даже при высоких уровнях воды ущерб от наводнений, как правило, невелик, поскольку они ожидаются. И наоборот, в случае редкого, но потенциально возможного сильного затопления поймы из-за неосведомленности населения о потенциальных рисках ее хозяйственная освоенность возрастает и, как следствие, материальный урон, наносимый наводнениями, может быть велик. Именно поэтому крайне важно оценить потенциальный риск затопления поймы и в случае его наличия отказаться от хозяйственной деятельности на затопляемой территории. Исходя из выше сказанного, в указанной работе представлена формула (4.2.1) для оценки потенциального риска заторного наводнения однопроцентной обеспеченности:

$$R_{1\%} = (H_{1\%} - H_{\text{поймы}}) * (1 - P_{\text{затопл. поймы}}), \quad (4.2.1)$$

где $R_{1\%}$ — потенциальный риск опасного гидрологического явления однопроцентной обеспеченности, $H_{1\%}$ — значение заторного уровня воды однопроцентной обеспеченности, $H_{\text{поймы}}$ — отметка начала затопления поймы, $P_{\text{затопл. поймы}}$ — вероятность затопления поймы.

Данная формула представляет собой произведение превышения уровня воды однопроцентной обеспеченности над поймой и вероятности незатопления поймы. Данная формула подразумевает область реальных допустимых значений от нуля до бесконечности, что не очень удобно при сравнении потенциальных рисков на разных водных объектах. Неограниченность верхнего предела и сильная чувствительность к величине затопления не вполне справедлива, так как представляется логичным, что при достижении определенной величины затопления ее дальнейшее гипотетическое увеличение не приводит к увеличению потенциального ущерба от затопления, поэтому допустимую величину затопления следует ограничить величиной уровня той обеспеченности для которого рассчитывается риск, а область допустимых значений должна располагаться от 0 до 1. Введя соответствующие корректировки в формулу (4.2.1) можно получить формулу (4.2.2):

$$R_{p\%} = \frac{(H_{p\%} - H_{\text{Небл}})}{(H_{p\%})} * (1 - P_{\text{Небл}}), \quad (4.2.2)$$

где $R_{p\%}$ — потенциальный риск опасного гидрологического явления заданной обеспеченности, $H_{p\%}$ — значение характеристики опасного гидрологического явления заданной обеспеченности, $H_{\text{Небл}}$ — отметка начала опасного гидрологического явления, $P_{\text{Небл}}$ — вероятность наступления опасного гидрологического явления.

Данная формула, имея диапазон значений от 0 до 1 (или от 0 до 100%), предназначена для расчета и сравнения потенциального риска различных опасных гидрометеорологических событий. В общем виде данная формула представляет собой произведение превышения уровня заданной обеспеченности над неблагоприятным, отнесенного к величине однопроцентного уровня и вероятности ненаступления неблагоприятного события. Подобная запись формулы позволяет оценить риски различных опасных гидрометеорологических явлений и, выбрав наиболее опасные, разработать для них систему прогнозирования и мониторинга. Одним из недостатков формулы (4.2.2) можно назвать необходимость использования уровней воды над нулем поста, а не в абсолютной системе отсчета. Можно отметить, что для формулы (4.2.1) было рекомендовано использовать превышения однопроцентного уровня воды над уровнем поймы, однако это не совсем верно, так как в отдельных случаях отметки поймы могут быть заданы не совсем корректно, а затопление объектов инфраструктуры может начинаться при значительно меньших уровнях. Например, затопление поймы на реке Сухоне в городе Великий Устюг происходит при уровне воды 940 см над нулем поста [Бузин, 2015], а вероятность затопления поймы составляет 1%, при этом угроза затопления города возникает уже при уровне воды 690-700 см над нулем поста, а вероятность превышения данных уровней составляет порядка 28% [http://www.geogr.msu.ru/news/news_detail.php?ID=11495]. Поэтому в настоящей работе рекомендовано, где это возможно и целесообразно, использовать не отметки затопления поймы, а отметки начала затопления каких-либо объектов инфраструктуры (уровни воды при ОЯ). При этом можно отметить, что обе

формулы оценивают потенциальный, а не фактический риск опасных гидрометеорологических явлений, при этом не учитываются превентивные меры борьбы с опасными гидрологическими явлениями и фактический экономический ущерб.

Потенциальные риски были рассчитаны для величины высшего уровня воды за период весеннего ледохода и длительности осеннего переходного периода, когда невозможна организация паромных и ледовых переправ. Потенциальные риски рассчитаны для высших уровней ледохода однопроцентной обеспеченности, а не для высших заторных уровней воды однопроцентной обеспеченности, потому что весенний ледоход имеет стопроцентную повторяемость, а уровни воды заторного генезиса, являются неотъемлемой частью периода весеннего ледохода и в отдельные годы, формируя высшие уровни воды, равнозначны высшим уровням ледохода этих лет и учитываются в рамках данного анализа. Для расчета потенциальных рисков, связанных с высшим уровнем ледохода, по данным ежегодных изданий была оценена величина высшего уровня ледохода однопроцентной обеспеченности, отметка начала затопления поймы и объектов инфраструктуры, а также вероятность затопления поймы и объектов инфраструктуры, рассчитанная как число лет с высшим уровнем ледохода превышающем отметку начала затопления поймы и объектов инфраструктуры к общему числу лет. Так как расчет потенциального риска, связанного с весенним ледоходом, имеет смысл только в условиях наличия периодически затапливаемой поймы и объектов инфраструктуры, общее число постов с ненулевым риском составило 31. Анализ потенциальных рисков, рассчитанных по обеим формулам, показывает хорошую связанность, что характеризуется парным коэффициентом корреляции, равном +0,84. Основные различия связаны с завышенной чувствительностью формулы (4.2.1) к превышению воды над уровнем поймы и отсутствием верхнего предела. Значения потенциального риска, рассчитанные по формуле 2, имеют разброс от 0 до 31%. Наибольшим расчетным потенциальным риском характеризуются село Усть-Щугор, село Помодзино, город Великий Устюг, село Большая Пысса, деревня Порог и село Усть-Пинега (рис. 4.2.1), при этом можно отметить, что фактический

риск наибольший для города Великий Устюг, так как отметка затопления города начинается при гораздо меньших уровнях, чем затопление поймы, что было учтено в работе, а сам город представляет большую историческую ценность. Для остальных постов фактический риск определяется хозяйственным и промышленным использованием поймы. Естественно, при относительно высоких потенциальных рисках какая-либо хозяйственная деятельность в пойме не рекомендуется.



Рис. 4.2.1. Карта потенциальных рисков (в процентах) высшего ледоходного уровня однопроцентной обеспеченности.

Расчет потенциальных рисков для других опасных гидрологических явлений может выполняться по формуле 4.2.2 при условии возможности расчета характеристик опасного явления заданной обеспеченности, а также возможности определения или назначения неблагоприятного уровня той или иной характеристики. Для расчета потенциального риска переходного периода неблагоприятной продолжительности было принято назначить неблагоприятной продолжительностью переходного периода 30 дней. Строго говоря, неблагоприятная продолжительность переходного периода может быть назначена из различных соображений для разных участков рек и в условиях развитой

городской инфраструктуры отсутствовать вовсе. В условиях арктической зоны, где ледовые переправы играют важную инфраструктурную роль, длительный ледоход и отсутствие ледостава, с одной стороны, нарушают навигацию, а с другой, не позволяют организовать ледовое сообщение, что наносит экономический ущерб и даже может привести к человеческим жертвам. Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что продолжительность переходного периода свыше 30 дней можно признать неблагоприятной для инфраструктуры отдельных сел и городов.

Результаты расчетов позволили выявить надежную статистическую зависимость между коэффициентом потенциального риска, рассчитанного по формуле 4.2.1 и 4.2.2. Обозначенная зависимость является нелинейной, теснота связи характеризуется коэффициентом парной корреляции 0,91. По результатам расчетов по формуле 4.2.2 потенциальный риск переходного периода неблагоприятной продолжительности находится в пределах от 1 до 54, медиана равна 6. Наибольшим риском характеризуются деревня Надпорожский Погост на реке Онега, а также город Кола и г. п. Исток на реке Кола (рис. 4.2.2). Среднее значение продолжительности переходного периода однопроцентной обеспеченности составляет 59, минимум 39, максимум 125 в деревне Надпорожский погост, средняя повторяемость превышения продолжительности переходного периода 30 дней составляет 16%.



Рис. 4.2.2. Карта потенциальных рисков продолжительности переходного периода однопроцентной обеспеченности.

Минимизировать фактические риски для населения можно путем мониторинга ледовой обстановки и проведения превентивных мероприятий, развитием современных методик прогнозирования. Широкое распространение получила концепция управления рисками. Управление природными рисками базируется на комплексном подходе, основанном на мониторинге природных процессов. Управление природными рисками сводится к следующим задачам:

1. Задача определения опасностей для жизнедеятельности населения;
2. Задача оценки угрозы, как меры возможности для конкретных объектов подвергнуться воздействию поражающих факторов от источников опасностей;
3. Задача долгосрочного прогнозирования угроз на заданный интервал времени;
4. Задача оценки риска чрезвычайных ситуаций на рассматриваемой территории и его прогноз на заданный момент (интервал) времени;
5. Задача анализа индивидуального риска смерти;

6. Задача сравнения с приемлемыми рисками;
7. Задача обоснования мер защиты для снижения риска до приемлемого уровня.

Система управления рисками может быть эффективной только при осуществлении непрерывного мониторинга состояния окружающей среды, включающего в себя систему наблюдений, сбора и обобщения информации об опасных природных процессах и явлениях. Таким образом, одной из главных задач модернизации сети является повышение эффективности управления природными рисками. Развитие наблюдательной сети осуществляется за счет комплексного решения задач по расширению различных видов наблюдений. В целях повышения качества информационного обеспечения осуществляется увеличение количественного состава пунктов государственной наблюдательной сети, техническое перевооружение. Техническое перевооружение подразумевает внедрение автоматических гидрологических комплексов и автоматических станций, оснащение современными приборами, аналитическим и вспомогательным оборудованием, надежными системами связи, а также создание центров сбора, хранения, обработки и передачи информации, в том числе по опасным гидрологическим явлениям. Важным, с точки зрения развития научных исследований опасных гидрологических процессов, является создание баз данных, содержащих сведения об ущербах, последствиях, проведенных предупредительных мероприятиях и прочее. К примеру, применяемые в Гидрометцентре России «прогностические карты гидрометеорологических предупреждений», позволяют оценить опасные гидрологические явления по округам с заблаговременностью до 36 часов, но в части, касающейся гидрологических явлений, приводится только степень интенсивности явления.

Таким образом, оценка потенциальных рисков опасных гидрологических явлений с использованием разработанной в настоящей работе методики позволяет выявить наиболее уязвимые участки рек и пойм для различных опасных гидрологических явлений, где разработка моделей прогнозирования является наиболее востребованной и целесообразной, что способствует снижению ущерба, наносимого опасными и неблагоприятными гидрологическими явлениями.

Глава 5. Особенности прогнозирования элементов ледового режима рек различных типов, разработка и верификация нейросетевых моделей прогнозирования

5.1. Особенности прогнозирования сроков формирования фаз ледового режима

Целесообразность прогнозирования элементов ледового режима зависит от потенциальных рисков для населения, наносимого урона и запроса на тот или иной вид ледового прогноза. При этом, несомненно, ледовые прогнозы, как и любые другие, могут быть разделены по заблаговременности на долгосрочные и краткосрочные. В первом случае, как правило, прогнозируется изменение сроков наступления интересующих ледовых явлений в зависимости от принятого климатического сценария. Использование в качестве предиктора изменение водности рек является нерациональным, так как на сегодняшний день не существует надежных моделей прогнозирования ее изменения. Таким образом, в подобных моделях целесообразно использование лишь ожидаемого изменения температуры воздуха за соответствующие месяцы года. При этом дается прогноз изменения средних многолетних значений дат наступления фаз ледового режима. Подобные зависимости рассмотрены и графически представлены в третьей главе диссертации. В аналитическом виде зависимость изменения сроков появления первичных ледовых явлений в зависимости от ожидаемого изменения температуры воздуха выглядит следующим образом:

$$\Delta Y_1 \approx 4 * \Delta t_1 - 1, \quad (5.1.1)$$

Изменения сроков разрушения ледового покрова в зависимости от ожидаемого изменения температуры воздуха:

$$\Delta Y_2 \approx -3 * \Delta t_2 - 1, \quad (5.1.2)$$

где ΔY_1 — изменение сроков образования первичных ледовых явлений, ΔY_2 — изменение сроков разрушения ледостава, Δt_1 — ожидаемое изменение температуры воздуха за октябрь, Δt_2 — ожидаемое изменение температуры воздуха за март.

Краткосрочное прогнозирование образования ледового покрова возможно с учетом водности реки и температуры воздуха. При этом заблаговременность и качество прогноза будет сильно зависеть от метеорологического прогноза. Более

утилитарный и достаточно точный прогноз можно получить с использованием даты образования ледостава на наиболее раннезамерзающем участке реки, что отмечалось в третьей главе настоящего исследования. К примеру, озеро Лача, из которого вытекает река Онега, в среднем замерзает на 19 дней раньше реки Онеги у села Порог, для которого характерен высокий риск осеннего переходного периода неблагоприятной продолжительности. Данная зависимость имеет вид:

$$Y_d = 0,85 * X_d + 62, \quad (5.1.3)$$

где Y_d — дата образования устойчивого ледостава на реке Онеге у села Порог, X_d — дата образования устойчивого ледостава на озере Лача у села Нокола.

Средняя заблаговременность прогнозирования по данной методике равна 19 дням, стандартная ошибка прогнозирования — 13 дням; S/σ_{Δ} — 0,68, что соответствует требованиям Гидрометцентра России. Введение в данную методику значений уровней воды нецелесообразно из-за существенного снижения заблаговременности.

В целом, можно отметить, что разработка новых методик прогнозирования сроков формирования фаз ледового режима должна зависеть от потребности населения в конкретных видах прогнозов и потенциальных рисков опасных гидрологических явлений.

5.2. Используемые подходы к прогнозированию высшего уровня воды за период весеннего ледохода и критерии оценки качества выпускаемых прогнозов

Наибольший фактический ущерб населению наносят опасные ледовые явления в период вскрытия рек, основной характеристикой которых является высший уровень воды за период весеннего ледохода различного генезиса. Поэтому разработка методик прогнозирования данной характеристики ледового режима является актуальной задачей гидрологии.

При прогнозировании высшего уровня воды за период весеннего ледохода чаще всего используются эмпирические подходы на основе регрессионных моделей, которые могут быть реализованы в виде регрессионных уравнений или моделей, построенных на возможностях обучения искусственных нейронных сетей. При этом к вновь разрабатываемым методикам необходимо предъявлять

ряд требований, обусловленных современным развитием гидрологической сети и уже разработанными методиками:

1. Число предикторов должно быть минимально;
2. Предикторы должны однозначно определяться;
3. Предикторы должны измеряться непосредственно на сети Росгидромета.

Одним из важнейших требований к прогностическим моделям, предназначенным для внедрения на сети Росгидромета, является простота в практическом применении — все предикторы должны определяться непосредственно наблюдателями в штатном режиме. При этом очевидно, что с учетом высокой рабочей нагрузки наблюдателей сети, невозможно использование каких-либо неоднозначных предикторов, определение которых может занять не один день, что, в конечном счете, приведет к невозможности прогнозирования гидрологического события в оперативном режиме. Мировой опыт [Руководство...2012] практического прогнозирования указывает на необходимость использования наиболее простых, но эффективных моделей, которые могут быть реализованы в виде регрессионных уравнений, нейросетевых моделей или специальных номограмм.

Вне зависимости от реализации основной прогностической задачей является определение надежных предикторов. Основным методом при этом является метод соответственных уровней воды, которые определяются корреляционным анализом по характерным, в основном экстремальным, значениям. Данный подход широко используется при прогнозировании уровней и расходов воды за период весеннего половодья, однако при прогнозировании высшего уровня за период ледохода данный подход сильно ограничен по заблаговременности, которая часто носит случайный характер. Случайный характер заблаговременности прогноза обусловлен, в первую очередь, влиянием заторов льда, образование которых приводит к нарушению связи соответственных уровней и, как следствие, заблаговременность может принимать даже отрицательные значения, то есть высший уровень воды за период весеннего ледохода на нижележащих гидрологических постах может отмечаться раньше,

чем на вышележащих. В связи с этим при прогнозировании высшего уровня воды за период весеннего ледохода имеет смысл использовать характерные уровни, приуроченные к концу ледостава, подвижкам льда и тому подобным событиям с учетом необходимой заблаговременности. Данный подход, как правило, может гарантировать стабильную заблаговременность прогноза, при удовлетворительном качестве выпускаемых прогнозов. При использовании парных регрессионных связей для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода возможно использование уравнения парной линейной или нелинейной регрессии, при использовании множественных связей, в том числе нелинейных, целесообразно использовать методы обучения искусственных нейронных сетей. При этом использование нелинейных методов аппроксимации подразумевает необходимость обеспечения возможности использования исходных данных, определяемых точно так же, как и в разработанной методике. Данные, необходимые для прогноза, не могут быть определены приближенно, так как нелинейные зависимости могут оказаться достаточно чувствительными к подобным изменениям входной информации. При этом линейные регрессионные модели в этом отношении гораздо более устойчивы. Для обеспечения большей устойчивости решения при использовании методов обучения искусственных нейронных сетей необходимо выполнять обучение максимально простых искусственных нейронных сетей, не допуская их переобучения.

Критерии оценки качества прогнозов изложены в работах [Попов Е.Г., 1968; Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В., 2007], более полный список критериев качества можно найти в статье [Виноградов А. Ю., Никифоровский А. А., 2015]. Исходя из того, что распределение погрешностей прогнозов и распределение отклонений гидрологических величин от нормы близки к нормальному, за критерий применимости и качества методики принято отношение стандартной ошибки прогнозирования (S) к стандартному отклонению прогнозируемой величины от нормы (σ) в случае долгосрочного прогнозирования, в случае краткосрочного прогнозирования в знаменателе используется стандартное отклонение изменения прогнозируемой величины от среднего ее изменения за период заблаговременности прогноза (σ_{Δ}). В качестве критерия качества

выпускаемых прогнозов также может быть использован критерий Нэша-Сатклиффа, в процедурах регрессии коэффициент Нэша – Сатклиффа эквивалентен коэффициенту детерминации (R^2). [Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970].

Все эти отношения являются показателями эффективности и точности прогнозирования и показывают выигрыш в распределении погрешностей, который дает метод прогнозирования по сравнению с распределением погрешностей при принятии ожидаемой величины по ее норме или норме изменения за период заблаговременности прогноза [Ю.М. Георгиевский, С.В. Шаночки, 2007]. Авторы указывают различные диапазоны значений критериев S/σ и S/σ_{Δ} , при которых методика можно считать удовлетворительной. В вышеупомянутых источниках и Гидрометцентром России (ГМЦ) дана рекомендация считать методику удовлетворительной при S/σ и S/σ_{Δ} менее 0,80. В работе [Морейдо и др., 2020] применена следующая классификация: значения S/σ_{Δ} между 0 и 0,5 свидетельствуют об отличном качестве методики прогноза, 0,50—0,70 — хорошем, 0,70—1,0 — удовлетворительном, более 1 — непригодном. Из представленных классификаций вполне очевидно, что разрабатываемая методика должна быть эффективнее, ориентирования на среднее значение и среднее изменение прогнозируемой величины за период заблаговременности, то есть отношения S/σ и S/σ_{Δ} должны быть строго меньше 1. Признание же методики удовлетворительной при отношениях S/σ и S/σ_{Δ} , находящихся в диапазоне от 0,8 до 1, является субъективным и зависит от сложности предлагаемой методики, величины абсолютной ошибки методики и ее статистического распределения, стационарности σ и σ_{Δ} . При оценке качества методики необходимо использовать наиболее жесткие и подходящие к данной задаче критерии оправдываемости прогнозов. В качестве критерия оправдываемости при краткосрочном прогнозировании всего гидрографа стока может быть использовано отношение S/σ_{Δ} . При прогнозировании пиковых значений быстроразвивающихся заторных наводнений иногда целесообразнее использовать отношение S/σ . Данное отношение может применяться и при оценки качества выпускаемых прогнозов по простым инерционным методикам (методикам с одним предиктором, характеризующем систему в настоящем) для которых обычно $0,80 \leq S/\sigma_{\Delta} < 1,0$, что

выходит за рекомендованные ГМЦ пределы. В данном случае целесообразно проверить отношение σ_{Δ}/σ , чтобы определиться в целесообразности ориентирования на среднее изменение за период заблаговременности или среднее значение прогнозируемой величины, при этом данное отношение также может попасть в диапазон от 0,80 до 1,0, что формально дает право отказаться от всех методик прогнозирования и ориентироваться на среднее значение прогнозируемой величины, однако, если отношение $S/\sigma < 0,8$, а методика относительно проста, ее можно рекомендовать для оперативного выпуска прогнозов.

5.3. Особенности прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода на реках первого типа

Для первого типа рек, как уже было сказано выше, характерно динамическое развитие волны половодья, вскрытия и ледохода, да и вообще всего гидрологического режима. При этом можно отметить, что на всех участках рек, относящихся к первому типу, волна половодья и вскрытия развивается подобно, что предполагает возможность использования универсальной прогностической формулы. Для разработки подобной формулы данные высших предледоходных и ледоходных уровней воды необходимо привести к стандартному виду для чего от каждого значения уровня воды отнимается норма, после чего полученная разность делится на стандартное отклонение. Стандартизованный ряд при этом имеет среднее значение, равное 0 и стандартное отклонение, равное 1.

По стандартизованным данным для участков рек, относящихся к первому типу, была разработана единая стандартизованная формула (5.3.1) для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в зависимости от высшего предледоходного уровня. Заблаговременность такого прогноза различна, но в среднем составляет 4 дня. Можно отметить, что при проверке данной формулы на независимом материале были получены результаты, не уступающие методикам, разработанным непосредственно по данным контрольного поста.

$$H_x^{\text{лдж}} = 0,64H_x^{\text{выш.прдлдж}} * \sigma_x^{\text{лдж}} + m_x^{\text{лдж}}, \quad (5.3.1)$$

где: $H_x^{лдх}$ — высший уровень воды за период весеннего ледохода в пункте x
 $H_x^{выш.прлдх}$ — стандартизованный высший предледоходный уровень воды в пункте x ,
 $\sigma_x^{лдх}$ — стандартное отклонение высшего уровня воды за период весеннего ледохода в пункте x ,
 $m_x^{лдх}$ — среднее значение высшего уровня воды за период весеннего ледохода в пункте x .
 Оценка качества выпускаемых прогнозов, приведенная для независимого материала приведена в таблице 5.2.1.

Таблица 5.2.1

Оценка качества выпускаемых прогнозов на независимом материале по сравнению с ориентированием на среднее значение высшего уровня за период ледохода

Г.п.	Поной—Краснощелье	Онега—Турчасово	Онега—Порог
σ , см	75	152	84
m , см	407	643	66
S , см	51	92	68
S/σ	0,68	0,61	0,79

Как было указано выше на участках рек, отнесенных к первому типу, все гидрологические процессы носят инерционный характер. Приведенная методика прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода может применяться и для прогнозирования других уровенных характеристик ледового режима. К примеру, методика 5.3.1 без изменения весовых коэффициентов была успешно верифицирована для прогнозирования на гидрологических постах Каневка и Турчасово высших уровней воды в начале ледостава по данным уровней воды, приходящимся на день появления первичных ледовых явлений. В обоих случаях можно говорить о высоком качестве выпускаемых прогнозов, так как отношения S/σ меньше 0,80.

Таким образом, можно заключить, что оценка качества выпускаемых прогнозов показала эффективность предложенной методики. Улучшение качества выпускаемых прогнозов при использовании других методов в данном случае невозможно, так как используется всего один стандартизованный предиктор. Данная методика может быть использована для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода и других уровенных характеристики на реках

Кольского полуострова, Онеги и на любых других участках рек, характеризующихся высокими коэффициентами корреляции между высшими предледоходными и ледоходными уровнями воды.

5.4. Особенности прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода на реках второго и третьего типа

Прогнозирование элементов ледового режима на реках, отнесенных ко второму и третьему типу, сводится к применению различных эмпирических уравнений для отдельных участков рек. Наибольший вклад в развитие методик прогнозирования заторных уровней воды внес В.А. Бузин, и именно его методики в настоящее время применяются на действующей сети Росгидромета [Бузин, 2015].

В работах В.А. Бузина для участка реки Печоры ниже впадения реки Ижмы отмечается достаточно тесная статистическая связь заторного подъема уровня воды с данным притоком. В качестве основного предиктора к уравнению, определяющему величину заторного подъема уровня воды, использован расход воды у кромки ледового покрова при вскрытии Печоры у села Усть-Цильма, который предвычисляется по эмпирической зависимости расходов воды на дату выпуска прогнозов в реках Ижма у села Картайоль и Печора у деревни Мутный Материк от различных факторов. Конечные уравнения определения заторного уровня воды у сел Усть-Цильма и Ермицы зависят от заторного подъема уровня воды, от уровня, соответствующего критическому расходу воды и определяемому по летней кривой расходов, а также от свободного члена, который, в свою очередь, зависит от ледовой обстановки в день выпуска прогноза на Печоре у села Усть-Цильма (ледостав, подвижка или ледоход). Таким образом, в зависимости от ледовой обстановки следует выбирать одно из трех уравнений. Средняя заблаговременность такого прогноза, по данным автора, составляет 9 дней, оправдываемость прогнозов 67-72% ($S/\sigma = 0,72$), таким образом, при использовании критерия отношения средней ошибки прогноза к стандартному отклонению прогнозируемой величины, данные прогнозы можно отнести к категории удовлетворительных [Попов, 1968(a)].

Можно отметить достаточную сложность такого подхода как ввиду использования «предвычисленных» расходов воды, так и за счет использования трех прогнозных зависимостей, перехода от расходов в период половодья и затапливаемой поймы к уровням воды. Вызывает сомнение целесообразность использования расходов воды у деревни Мутный Материк: в прогнозных уравнениях используются данные по реке Ижме, которая вскрывается на 9 дней раньше, вторым аргументом прогнозного уравнения является расход воды реки Печоры у деревни Мутный Материк, приходящийся на день выпуска прогноза. Разница между датами вскрытия реки Печоры у деревни Мутный материк и у села Усть-Цильма всего 2—3 дня, таким образом, для сохранения заблаговременности следует использовать расход воды, отмечаемый при ледоставе, либо значительно сокращать заблаговременность прогноза. Использование же по сути трех прогнозных уравнений на коротком ряду наблюдений приводит еще к большей неоднозначности при их дальнейшем использовании. В настоящей работе за основу была взята связь между высшими уровнями воды за период весеннего ледохода на реке Печоре и на ее основных притоках, при сохранении заблаговременности прогноза. Так, можно отметить, что реки Ижма и Цильма вскрываются в среднем на 8 — 9 дней раньше Печоры, что позволяет использовать данные по этим рекам для прогнозирования. Так, высшие уровни воды за период весеннего ледохода на гидрологических постах Усть-Цильма и Ермицы, находятся в тесной статистической связи с высшими уровнями воды за период весеннего ледохода на реке Цильме в селе Трусово и реке Ижме в деревне Картайоль соответственно. Однако связь уровней воды, отмеченная до этого в работе [Бузин, 2015], между гидрологическими постами в деревне Картайоль и селе Ермицы была нарушена возведением в 1970—1975 году плотины. Так, если до 1975 парный коэффициент корреляции между ними был 0,71, то после возведения плотины он составил 0,05, что делает ряды независимыми. Использование других действующих постов на реке Ижме (Изваиль, Ижма) в качестве предикторов невозможно в силу природного отсутствия статистической связи. Прогнозирование высших уровней воды за период весеннего ледохода с большой заблаговременностью осложнено практически полным отсутствием влияния

зимних факторов на формирование весеннего половодья. Так, ни высший уровень в начале ледостава, ни максимальная толщина льда не оказывают заметного влияния на формирование высшего уровня воды за период весеннего ледохода, что делает невозможным создание моделей прогнозирования, обладающих большой заблаговременностью. Более того, отсутствует связь между высшими уровнями воды за период весеннего ледохода и уровнями, предшествующими ему. Таким образом, в настоящей работе удалось выявить краткосрочные прогностические зависимости для следующих гидрологических постов: Усть-Щугор, Усть-Кожва, Усть-Уса, Мутный Материк, Щельяюр, Усть-Цильма и Оксина (Таблица 5.3.1). При этом при использовании стандартных методов часть моделей оказалась неудовлетворительными $S/\sigma > 0,80$.

Основные параметры прогностических зависимостей для реки Печоры

Гидрологический пункт	с. Усть-Щугор	с. Усть-Кожва	с. Усть-Уса	д. Мутный Материк	р.п. Щельяюр	с. Усть-Цильма	с. Оксино
Природная вариация, см	140	125	137	150	146	125	91
Предикторы	Н макс. в начале ледостава, Н макс. лдх (Троицко-Печорск), Тер апреля (Усть-Уса)	Тер апреля (Усть-Уса), Н макс. лдх. (Усть-Унья)	Н макс. лдх. Усть-Щугор, максимальная толщина льда (Усть-Уса), Тер. апреля (Усть-Уса)	Н лдх. (Щельяюр)	Н макс. предлдх, Н макс. лдх. р. Цильма — Трусово	Н макс. лдх. р. Цильма — Трусово, разница в толщинах льда Щелья Юр-Усть Цильма	Н лдх (Ермицы), Н макс. предлдх.
Средняя заблаговременность, дни	5	5	8	2	6	8	4
Коэффициент корреляции	0,66	0,57	0,66	0,84	0,72	0,75	0,85
Стандартная ошибка (S), см	107	102	105	90	102	88	48
S/σ	0,76	0,82	0,77	0,60	0,70	0,71	0,53

Для Северной Двины и ее основных притоков Сухоны, Вычегды, Пинеги и др. разработано значительное число локальных прогностических методик, подробный разбор которых представлен в монографии В.А. Бузина [Бузин, 2015]. Наиболее востребованной и апробированной из них является методика прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в районе города Великий Устюг, что обусловлено тем большим ущербом, который наносят городу заторные наводнения в период весеннего ледохода. В рамках Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012–2020 годах» были выполнены «Комплексные исследования русловых процессов и формирования заторов льда в узле слияния Сухона – Юг – Малая – Северная Двина с целью регулирования процессов заторообразования и разработки противопаводковых мероприятий у г. Великий Устюг» [Комплексные исследования..., 2012]. Результатом данной работы стало уточнение методики прогноза высших заторных уровней воды р. Сухоны у г. Великий Устюг и комплексная схема рекомендаций по защите города от наводнений. Были рассмотрены факторы, оказывающие влияние на формирование высших заторных уровней и выбраны наиболее информационно значимые показатели, по которым установлены зависимости для краткосрочного прогноза высших заторных уровней воды Сухоны у г. Великий Устюг:

1) на дату выпуска прогноза вскрылись Сухона у Тотьмы и Юг у Кичменгского Городка

$$H_{\max} = 43 + 1,36 H_{\text{Тотьма}} + 0,319 H_{\text{К. Городок}}, \quad (5.4.1)$$

2) на дату выпуска прогноза вскрылась только Сухона у Тотьмы

$$H_{\max} = -257 + 0,478 t_{\text{л. макс}} + 0,841 H_{\text{ледст}} + 1,39 + \\ + H_{\text{Новое}} + 1,08 H_{\text{Тотьма}} + 0,273 H_{\text{К. Городок}}, \quad (5.4.2)$$

3) на дату выпуска прогноза вскрылся только Юг у Кичменгского Городка

$$H_{\max} = 174 - 1,77 t_{\text{л. макс}} + 1,20 H_{\text{ледст}} + 0,554 H_{\text{Новое}} - \\ - 0,101 H_{\text{Тотьма}} + 0,589 H_{\text{К. Городок}}, \quad (5.4.3)$$

где $t_{\text{л. макс}}$ – максимальная толщина ледяного покрова Сухоны у Великого Устюга (см); $H_{\text{ледст}}$ – высший при ледоставе уровень воды Сухоны у Великого

Устюга (см); $H_{\text{Новое}}$, $H_{\text{Тотьма}}$ и $H_{\text{К.Городок}}$ — уровни воды рек Ема у д. Новое, Сухоны у г. Тотьма и Юга у с. Кичменгский Городок на дату выпуска прогноза (см).

Дата выпуска прогноза приурочена к дате осуществления двух событий: из трех: превышения уровня $H_{\text{лост}}$ у Великого Устюга, вскрытия Сухоны у Тотьмы или Юга у Кичменгского Городка. Заблаговременностью прогноза составляет от 1 до 7 суток и зависит от водности реки при вскрытии. При небольшой водности это 6—8 суток, при большой 1—3 суток. Существенным недостатком данной методики можно назвать использование трех прогнозных уравнений на относительно малой длине выборки, что естественным образом приводит к завышению результатов на зависимом множестве и, как следствие, не обеспеченности методики на независимом, реальном, материале. Однако, из представленной методики становится достаточно очевидно, что заторное наводнение в районе города Великий Устюг зависит от порядка вскрытия основных притоков и характерных уровней воды, что может быть использовано при дальнейшем ее совершенствовании. В рамках данной работы и соответствующей публикации [Сумачев, 2019] исследована возможность применения не максимальной толщины льда, а разницы в максимальных толщинах льда в пункте наблюдения и течением ниже. Разница в толщинах льда является характеристикой градиента прочности льда и может обуславливать возможность образования заторов льда при вскрытии. Можно отметить, что парные коэффициенты корреляции между высшими уровнями воды за период весеннего ледохода и разницей в толщинах льда, как правило, оказываются выше, чем для их связей с максимальными толщинами льда, что в целом является физически обоснованным. В настоящей работе установлено, что связь между максимальной толщиной льда и высшим уровнем воды за период весеннего ледохода уменьшается в последние годы наблюдений и чаще всего является статистически незначимой. Данное утверждение не согласуется с теорией образования заторов льда [Бузин, 2015], однако снижение или отсутствие связи между высшим уровнем воды за период весеннего ледохода и максимальной толщиной льда объясняется несовершенством методов наблюдений за толщиной льда, а также игнорированием противопаводковых мероприятий, которые

включают в том числе различные методы ослабления ледового покрова. Игнорирование противопаводковых мероприятий происходит отнюдь не по вине разработчиков прогностических моделей, а по причине отсутствия количественных или каких-либо иных сведений в ежегодных изданиях о проведенных противопаводковых мероприятиях. Открытая публикация данных о противопаводковых мероприятиях является исключительно важной, так как разработка любых прогностических моделей в условиях неполной, искаженной информации о водных объектах, является затруднительной. В рамках данной работы разработана методика прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в районе города Котлас. В работе [Бузин, 2015] предложена методика прогнозирования высшего уровня ледохода в районе города Котлас в зависимости от максимального (высшего) уровня в начале ледостава ($H_{лс}$), максимальной толщины льда ($t_{л}$), расхода воды реки Сухоны в первый день ледохода у города Тотьма ($Q_{Тотьма}$), который при прогнозе вычисляется через уровень воды в городе Тотьма ($H_{Тотьма}$) и подъем уровня в этот же день (ΔH), а также среднесуточной температуры воздуха на дату выпуска прогноза (θ).

$$H_{лдж} = 0,0281H_{лс} + 3,68t_{л} + 0,273Q_{Тотьма} + 4,93\theta - 27, \quad (5.4.4)$$

$$Q_{Тотьма} = 2,74H_{Тотьма} - 0,783\Delta H - 206, \quad (5.4.5)$$

Средняя заблаговременность такого прогноза составляет 5 дней, стандартная ошибка — 64 см, эффективность, оцененная по отношению к стандартному отклонению прогнозируемой величины, составила 0,59, к среднему изменению за период заблаговременности — 0,47, что свидетельствует о достаточно высоком качестве данной методики [Бузин, 2015; Бузин и др., 2014]. Среднесуточная температура воздуха, как фактор, влияющий на формирование высшего уровня воды за период весеннего ледохода, как правило, остается не значимой, тоже самое касается и максимальной толщины льда. К примеру, отмечается, что связь высшего уровня воды за период весеннего ледохода и максимальной толщины льда не высока и редко может достигать значения 0,45 [Бузин, стр. 117, 2015]. Высший уровень в начале ледостава в отдельных случаях может оказывать существенное влияние на формирование высшего уровня за

период весеннего ледохода, что, к примеру, характерно для гидрологического поста в деревне Каликино, но для гидрологического поста в городе Котлас коэффициент корреляции между ними составляет всего 0,35. Таким образом основным информативным предиктором в данном уравнении является расход воды реки Сухоны в первый день ледохода у города Тотьма, который может быть заменен уровнем воды на тот же день.

В настоящей работе предлагается методика прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в городе Котлас в зависимости от уровня, приходящегося на первый день ледохода в городе Тотьма и минимального уровня воды за октябрь—март в городе Котлас, как предикторов, обладающих наибольшей статистической связью с прогнозируемой величиной. Средняя заблаговременность прогноза несколько увеличилась за последнее время и составляет теперь 6 дней, при использовании уравнения множественной регрессии, множественный коэффициент корреляции составляет 0,79, стандартная ошибка 65 сантиметров, а отношение стандартной ошибки к стандартному отклонению — 0,62, к среднему изменению за период заблаговременности — 0,51, что свидетельствует о достаточно высоком качестве выпускаемых прогнозов. Уравнение множественной регрессии имеет следующий вид:

$$H_{\text{лдж}} = 0,74H_{\text{min г. Котлас}} + 0,63H_{\text{Тотьма}} + 207, \quad (5.4.6)$$

Использование метода обучения искусственных нейронных сетей способно значительно улучшить качество выпускаемых прогнозов, что особенно актуально для участков рек, отнесенных ко второму и третьему типам. Наиболее распространенными программными продуктами для обучения готовых нейронных сетей для решения конкретных практических задач являются *Matlab* и *Statistica*. Основными особенностями нейронных сетей, доступных для обучения в данных программных продуктах, являются универсальность и удобство использования, а также реализация современных методов обучения; недостатками являются достаточно низкий контроль над архитектурой нейронной сети и отсутствие возможности глубокого обучения. В подобных программных продуктах реализована возможность обучения многослойных сетей — *MLP*

(многослойный персептрон), но лишь с одним скрытым слоем. Название многослойные в данном случае обусловлено особенностью методики подсчета слоев, когда в общее количество слоев входят входные и выходные нейроны, далее в работе подобные сети будут называться однослойными. В настоящее время широкое распространение получили многослойные нейронные сети, называемые также глубокие, которые имеют более одного скрытого слоя. Преимуществом подобной архитектуры является гипотетическая возможность более точного обучения сети и аппроксимации исходных данных. Сам же процесс создания нейронной сети при использовании языка программирования *Python* является более гибким и позволяет настроить все необходимые параметры сети и ее обучения такие, как количество слоев, функцию активации, метод обучения, критерий качества, зерно датчика случайных чисел и многие другие. Задание методов обучения и контроля качества, включая достаточно современные методы, доступна также и в программе *Statistica 12*. При использовании других программных продуктов, как правило, возможность задания параметров сети сильно ограничена, к тому же происходит принудительная стандартизация ряда, которая в реальных условиях не всегда полезна. Вообще работа с любыми искусственными нейронными сетями начинается именно с предварительной обработки данных: так на первоначальном этапе необходимо подготовить данные в нужном текстовом формате, для *Python* удобно использовать формат *csv*. На данном этапе необходимо отчетливо представлять работу будущей нейронной сети и определиться с необходимостью нормализации или стандартизации данных. Существуют различные методы нормализации и стандартизации данных, но использование при стандартизации стандартного отклонения и среднего значения наиболее предпочтительно, так как оценка математического ожидания и стандартного отклонения могут быть более устойчивыми к новым данным, чем минимальное и максимальное выборочные значения, что позволяет с достаточной надежностью провести данную процедуру. В случае, если речь идет об рядах с сильно различающимися значениями, данная процедура при обучении нейронных сетей является необходимой, но стоит учитывать нюансы, которые заключаются в возможном наличии трендов в рядах данных, что может негативно сказаться в

будущем на качестве прогнозов. С другой стороны, все статистические методы прогнозирования подразумевают стационарность и однородность исходных данных.

Следующим этапом построения и обучения искусственной нейронной сети является определение архитектуры. Многочисленные эксперименты с архитектурой нейронной сети показали, что для решения задачи любой сложности можно использовать как глубокую, так и широкую сеть, т.е. состоящую из одного скрытого слоя, но использующую большое количество скрытых нейронов, однако вычислительная мощность глубоких сетей теоретически выше, что позволяет, в конечном счете, сократить общее количество скрытых нейронов и упростить создаваемую модель. Тем не менее, в практике не редки случаи, когда хорошо обученная широкая однослойная сеть превосходит глубокую в качестве аппроксимации данных. Еще одним преимуществом глубоких нейронных сетей является возможность создания внутри сети синтетических переменных, так называемых, «фичей», алгоритм получения которых сильно напоминает факторный анализ, что позволяет сэкономить время на предварительном анализе большого числа предикторов, объединяя их в факторы.

Можно отметить схожесть основных моментов в обучении и используемых алгоритмов при программировании на языке *Python* и создании нейронной сети в программе *Statistica 12*. Главным отличием языков программирования является возможность создания искусственных нейронных сетей любой архитектуры под любые задачи.

В настоящее время на языке *Python* написаны специализированные библиотеки для обучения нейронных сетей. Одной из таких открытых библиотек является *TensorFlow*, разработанная компанией *Google*. При работе с *TensorFlow* необходимо использовать библиотеку *Keras*, которая представляет собой надстройку над фреймворками *Deeplearning*, *TensorFlow* и *Theano*. Первым шагом при создании нейронных сетей на языке программирования *Python* является подключение к операционной системе компьютера и импорт необходимых библиотек: *Pandas* и *Numpy* для импорта и конвертации данных, *Keras* для создания и обучения нейронных сетей, при этом библиотека *Keras*

самостоятельно подключается к *TensorFlow*. После импорта данных необходимо провести стандартную процедуру разделения выборки на предикторы и предиктанты, а также на тестовую и обучающую подвыборки. Разделение на тестовую и обучающую подвыборки может осуществляться случайным образом, в данном случае необходимо указать объем тестовой выборки в процентах, альтернативным вариантом является использование каких-либо правил разделения, в данном случае удобнее изначально подготовить ряд таким образом, чтоб сначала подряд шли данные, необходимые для обучения, затем для проверки качества модели. Также может быть использована выборка валидации, которая используется для избежания переобучения и имитирует тестовую выборку в процессе обучения для минимизации ошибки уже на квазинезависимом материале, поэтому в конечном счете ряд разбивается на три подвыборки, что при достаточно коротких рядах не всегда целесообразно. После выполнения данных процедур для корректной работы нейронной сети необходимо конвертировать данные в формат *Numpy*, после чего можно приступить к созданию нейронной сети. В подавляющем большинстве случаев для решения задач регрессии и многих других используются сети прямого распространения. В таких сетях обычно каждый нейрон каждого слоя связан с каждым нейроном последующего слоя, обратные связи при этом отсутствуют. Более сложные рекуррентные сети используются, в частности, для решения задачи распознавания образов, что также является перспективным в гидрологической науке, например, при обработке спутниковых снимков. Перед созданием нейронной сети возможна настройка правила инициализации, которое служит для определения начальных весов нейронной сети. После задания правила инициализации можно приступить к созданию прогностической модели (для задач регрессии используются так называемые модели *sequential*, то есть сети прямого распространения) и первого слоя данной сети, который отличается от последующих тем, что в нем указывается количество принимаемых сигналов, то есть предикторов. Также необходимо задать функцию активации, у каждого слоя она может быть своей, но активация выходного слоя, в случае регрессионной задачи, всегда линейна. Активационные функции внутренних слоев могут назначаться из различных соображений и

носить как линейный, так и нелинейный характер. В настоящее время наибольшей популярностью пользуются следующие функции активации: линейная, сигмоида, гиперболический тангенс и так называемая «*ReLU*». Суть последней заключается в выполнении простого порогового перехода в нуле. Вычисление сигмоиды и гиперболического тангенса требует выполнения ресурсоемких операций, таких как возведение в степень, в то время как *ReLU* может быть реализована с помощью простого порогового преобразования матрицы активаций в нуле. Кроме того, *ReLU* не подвержена насыщению. Применение *ReLU* существенно повышает скорость сходимости стохастического градиентного спуска (в некоторых случаях до 6 раз по сравнению с сигмойдой и гиперболическим тангенсом). Считается, что это обусловлено линейным характером и отсутствием насыщения данной функции. Тем не менее, *ReLU* не всегда достаточно надежны и в процессе обучения могут выходить из строя. Например, большой градиент, проходящий через *ReLU*, может привести к такому обновлению весов, что данный нейрон никогда больше не активируется. Если это произойдет, то, начиная с данного момента, градиент, проходящий через этот нейрон, всегда будет равен нулю. Соответственно, данный нейрон будет необратимо выведен из строя. Например, при слишком большой скорости обучения (*learning rate*), может оказаться, что до 40% *ReLU* «мертвы» (то есть, никогда не активируются). Эта проблема решается посредством выбора надлежащей скорости обучения. Помимо *ReLU* имеет смысл использовать в качестве функции активации гиперболический тангенс. Гиперболический тангенс (*hyperbolic tangent, tanh*) принимает на входе произвольное вещественное число, а на выходе дает вещественное число в интервале от -1 до 1 . Подобно сигмоиде, гиперболический тангенс может насыщаться. Однако, в отличие от сигмоиды, выход данной функции центрирован относительно нуля. Следовательно, на практике всегда предпочтительнее использовать гиперболический тангенс, а не сигмоиду. После выбора функции активации следует задать метрики и способ оптимизации модели. Под метриками понимается критерий оценки качества модели, наиболее часто используемыми критериями в задачах регрессии являются следующие метрики: среднее абсолютное значение ошибки прогноза, либо ее квадратическое или процентное

выражение. Выбор метрики напрямую зависит от значимости для решаемой задачи больших величин ошибок редкой повторяемости, при этом в практике гидрологических прогнозов методика прогноза считается приемлемой, если вероятность появления таких ошибок невелика и составляет менее 25% [Попов, 1968, (a)]. В целом, на этапе обучения оценка точности нейронной сети носит сугубо формальный характер.

Выбор метода оптимизации также является обязательной частью создания нейронной сети. Наиболее надежными методами оптимизации являются градиентный спуск с моментом Нестерова и так называемый *ADAM*. По большому счету различие в данных методах не являются существенными: оба метода позволяют использовать замедление скорости обучения вблизи минимальных значений ошибки, что предотвращает ее увеличение. Последним необходимым шагом в создании нейронной сети является задача предикторов и предиктантов, определение необходимого числа эпох, необходимых для полного обучения нейронной сети, а также определение так называемого «батча» — количества наблюдений, после которого веса будут корректироваться, если данная функция отключена, веса будут корректироваться после полного прохождения обучающей выборки. После обучения нейронной сети необходимо оценить результаты ее работы на обучающей выборке по одной из метрик. В случае, если качество сети является приемлемым, то можно переходить к проверке работы сети на независимом материале, в противном случае необходимо провести реинициализацию, то есть повторить обучение нейронной сети, используя новые начальные веса. При оценке качества нейронной сети удобно ориентироваться на ошибку регрессионного уравнения, так, как только в случае существенно меньшей ошибки прогноза искусственной нейронной сети их использование имеет смысл и практическую выгоду. Можно отметить, что подобный подход к обучению нейронной сети занимает большое количество времени, при этом результат обучения непредсказуем и вполне возможна ситуация, когда целесообразнее использовать классические регрессионные зависимости. Тем не менее, есть ситуации, когда использование нейронных сетей для решения регрессионной задачи изначально более целесообразно, это в первую очередь случаи нелинейных

зависимостей в данных и использования большого количества предикторов или предиктантов. Так, при использовании в прогностической зависимости большого количества предикторов использование регрессионного уравнения не является корректным и необходимо сокращение количества предикторов путем применения факторного анализа или метода главных компонент, которые требуют дополнительных манипуляций с данными, при использовании нейронных сетей аналог факторного анализа происходит внутри модели. На базе языка программирования *Python 3* в последнее время появляется достаточно большое количество библиотек, предназначенных для автоматизированного обучения нейронных сетей. Одной из таких библиотек, появившихся сравнительно недавно, является *Autokeras*.

5.5. Верификация нейросетевых моделей прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода

В качестве примера рассмотрим разработку модели для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода на участке реки Печоры в селе Ермицы, для которого не удалось создать модель, используя стандартные предикторы. Так как достаточно надежные предикторы отсутствуют, для данного участка реки было принято решение рассмотреть возможность применения высших уровней в начале ледостава по всей длине реки, в самом пункте наблюдений парный коэффициент корреляции не велик, но в случае, если использовать данные по всей реке, возможно выявление взаимного влияния постов друг на друга, и, как следствие, увеличение прогностической мощности, отметим, что прогнозирование с 10 предикторами, используя стандартные методы является некорректным, для чего методом главных компонент было получено два фактора, которые характеризуют нижнее и верхнее течение реки. Рассмотрим модель, написанную в рабочей среде *Jupyter Notebook* на языке программирования *Python* (рис. 5.4.1).

```

]: #Задача правила инициализации
init_2 = initializers.TruncatedNormal(mean=0.0, stddev=0.005, seed= None)
init_3 = initializers.Constant(value=1e-3)
#Задача правила предварительной остановки обучения после 10 эпох после которых качество модели не улучшается
callback = tf.keras.callbacks.EarlyStopping(monitor='loss', patience=10)
#Создание модели прямого распространения
model = Sequential()
#Первый скрытый слой модели
model.add(Dense(8, input_dim=10, activation='relu', kernel_initializer=init_2, bias_initializer=init_3))
#Второй скрытый слой модели
model.add(Dense(15, activation='relu', kernel_initializer=init_2, bias_initializer=init_3))
#Выходной слой модели
model.add(Dense(1, activation='linear'))
#Задача параметров обучения
model.compile(loss='mae', optimizer = 'adam', metrics=['mae'])
history = model.fit(X_train, Y_train, epochs=200, batch_size = 5, callbacks=[callback])

```

Рис. 5.4.1. Код нейронной сети, написанный на языке программирования *Python*.

Данная нейронная сеть состоит из 10 входов двух скрытых слоев и одного выхода. В скрытых слоях применена активационная функция *ReLU*, в выходном слое — линейная. Метод оптимизации *Adam*, количество эпох обучения — 200. Сеть показала достаточно стабильные результаты как на обучающей, так и на тестовой выборке при заблаговременности до полугода. Однако можно отметить, что худшие результаты характерны для минимальных значений, что для высшего уровня воды за период весеннего ледохода не является критичным. На рисунке показаны прогнозные и наблюдаемые значения высшего уровня воды за период весеннего ледохода. Прогнозы данные моделью можно отнести к категории удовлетворительных (рис. 5.4.2). Так, отношение стандартной ошибки модели к природной вариации равняется 0,60, а без учета достаточно больших ошибок, вызванных плохо прогнозируемыми минимальными уровнями воды в 1954 и 2011 годах, 0,54.

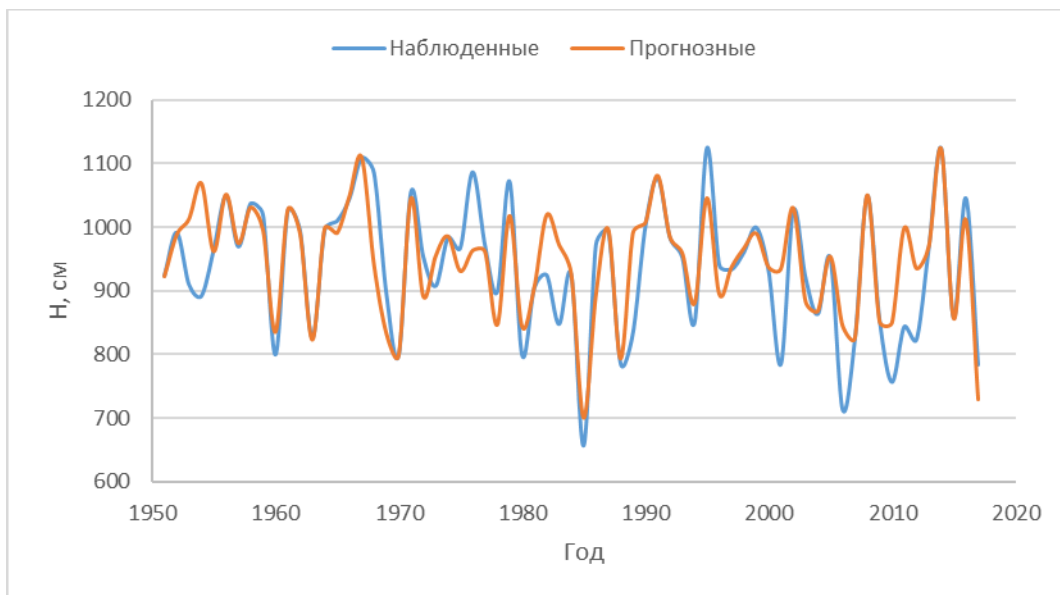


Рис. 5.4.2. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в селе Ермицы.

При использовании моделей линейной регрессии не удалось получить даже близкие по качеству результаты в независимости от количества предикторов. Так, ни одна из регрессионных моделей не смогла дать результаты лучше, чем получаемые при ориентировании на среднее значение. Обучение нейронных сетей в программе *Statistica 12* также не дало положительных результатов. Неудачи в применении традиционных методов позволяют признать результаты прогнозирования с использованием глубоких нейронных сетей успешными.

Улучшение качества выпускаемых прогнозов возможно и в случае, когда традиционные методы прогнозирования дают удовлетворительный результат, как, например, в селе Оксина. Участок реки в районе гидрологического поста в селе Оксина является предустьевым участком реки Печоры и относится к третьему типу, поэтому при разработке модели прогнозирования в качестве предикторов использованы высший уровень воды за период весеннего ледохода в селе Ермицы и высший предледоходный уровень воды на посту в селе Оксина. Средняя заблаговременность прогноза составила 4 дня. Выборка была разделена на две подвыборки в соотношении 80 на 20 процентов, которые использовались для обучения и проверки модели соответственно. Разделение на тестовую и обучающую подвыборки осуществлялось так, чтобы в составе тестовой подвыборки оказались значения близкие к минимальным, максимальным и

средним, таким образом, осуществлялась проверка модели на всем возможном диапазоне значений. Полученное уравнение линейной регрессии на обучающем множестве характеризуется коэффициентом корреляции, равном 0,85; отношением S/σ 0,52 на обучающей выборке и 0,46 на тестовой, что позволяет отнести результаты модели к категории удовлетворительных. Ниже будут рассмотрены нейросетевые модели, обученные в программе *Statistica 12* и на языке программирования *Python*. В среде программирования *Python* была создана модель, аналогичная предыдущей, но содержащая 3 и 5 скрытых нейрона на каждом слое соответственно, далее *Seq 2-3-5-1*. При тестировании полученной модели выяснилось ее превосходство над моделью линейной регрессии как на обучающей, так и на тестовой выборке, отношение S/σ для всей выборки составило 0,47, что позволяет отнести данные моделью прогнозы к категории хороших. При использовании программы *Statistica* была использована функция автоматического обучения нейронной сети, лучшая сеть *MLP 2-8-1* является однослойной, содержит 8 скрытых нейронов и использует в качестве функции активации гиперболический тангенс, важным отличием является использование алгоритма обучения *BFGS*. Метод *BFGS* является итерационным методом численной оптимизации, названный в честь его исследователей: *Broyden, Fletcher, Goldfarb, Shanno*. Относится к классу так называемых квазиньютоновских методов. В отличие от ньютоновских методов в квазиньютоновских не вычисляется напрямую гессиан функции, т.е. нет необходимости находить частные производные второго порядка. Вместо этого гессиан вычисляется приближенно, исходя из сделанных до этого шагов. Можно отметить, что при решении данной задачи лучше всего зарекомендовали себя нейронные сети, обученные в программе *Statistica 12* (таблица 5.4.1, рис. 5.4.3).

Таблица 5.4.1

Оценка качества выпускаемых прогнозов по сравнению с инерционным прогнозом

Выборка	Ср. знач.	Ур.мн. регрессии		Seq 2-3-5-1		MLP 2-8-1	
	σ , см	S, см	S/ σ	S, см	S/ σ	S, см	S/ σ
Полная	90,4	46,6	0,52	42,9	0,47	30,0	0,33
Обучающая	93,2	48,9	0,52	45,1	0,48	30,1	0,32
Тестовая	77,8	35,8	0,46	32,4	0,42	29,7	0,38

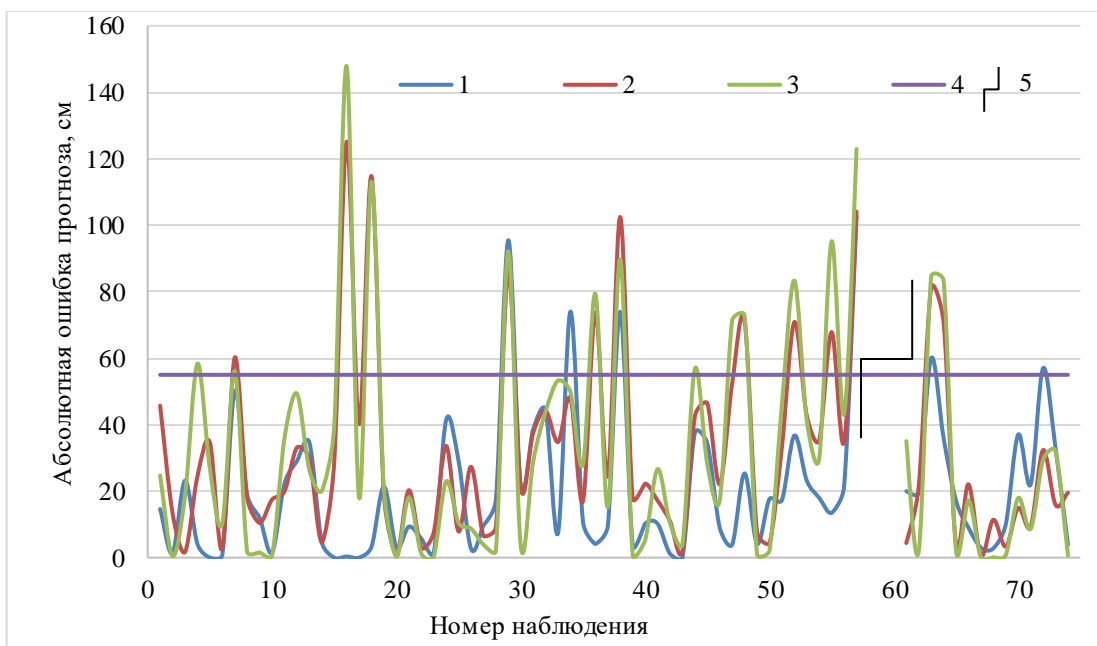


Рис. 5.4.3. Абсолютные ошибки результатов прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода реки Печоры по гидрологическому посту с. Оксино с использованием нейросетевых моделей MLP 2-8-1 (1), Seq 2-3-5-1 (2) и модели множественной линейной регрессии (3); допустимая ошибка прогнозирования (4), обучающая и тестовая выборка разделены условной линией (5).

Анализ представленных в таблице моделей позволил прийти к выводу, что *MLP 2-8-1* показала лучшие результаты на всех подвыборках, однако на тестовой подвыборке качество модели незначительно упало, почти сравнявшись с *Seq 2-3-5-1*, по общим же показателям данную модель можно признать лучшей и рекомендовать для дальнейшего использования [Сумачев, Банщикова, 2021].

Для гидрологического поста в районе города Котлас разработана методика прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в зависимости от уровня воды, приходящегося на первый день весеннего ледохода в городе Тотьма на реке Сухоне, и минимального суточного уровня воды в городе Котлас за октябрь—март. Стандартная ошибка (S) прогнозной зависимости при использовании уравнения множественной линейной регрессии составляет 65 сантиметров, что дает отношение $S/\sigma = 0,62$, а отношение $S/\sigma_{\Delta} = 0,72$, что в целом удовлетворяет требования гидрометеорологической сети при известной простоте линейных моделей. Однако качество прогнозов может быть значительно улучшено при использовании нейросетевых зависимостей. Обученная в рамках данной работы нейронная сеть *MLP 2-5-1*, имеющая один скрытый слой с 5

нейронами и использующая гиперболический тангенс в качестве активационной функции, в значительной степени превосходит линейное уравнение по качеству выпускаемых прогнозов (Таблица 5.4.2, рис. 5.4.4). В целом, качество данной модели даже выше чем модели, предложенной в работе [Бузин, 2015] при этом можно отметить доступность и обоснованность использованных предикторов. Так, уровень воды, приходящийся на первый день ледохода в городе Тотма, является интегральной характеристикой поступающих объемов воды, а минимальный уровень за октябрь—март характеризует дефицит воды в речной системе.

Таблица 5.4.2

Оценка качества выпускаемых прогнозов для Северной Двины в районе г. Котлас

Выборка	MLP 2-5-1					
	S, см	S/σ	S/σ _Δ	Допустимая ошибка	Число оправдавшихся прогнозов	Оправдываемость, %
Полная	55	0,53	0,61	61	49	74
Обучающая	57	0,55	0,63		35	73
Тестовая	49	0,47	0,54		14	78

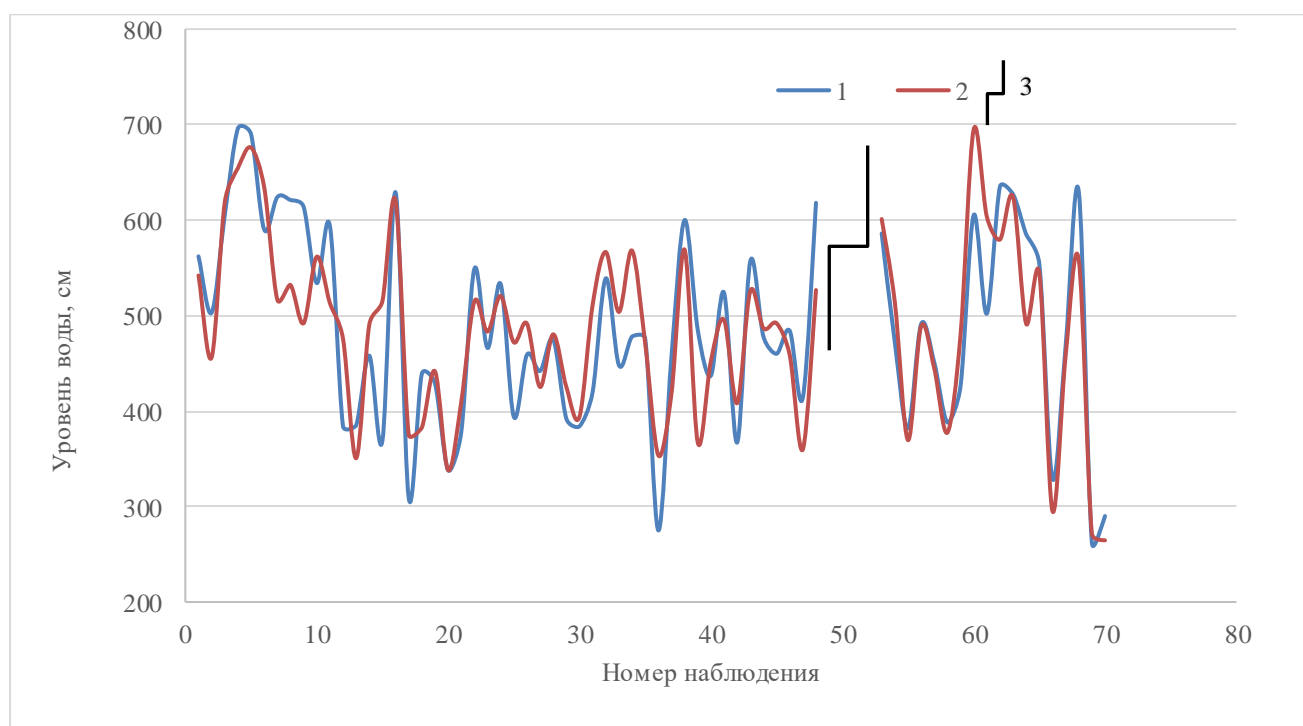


Рис. 5.4.4. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в створе гидрологического поста г. Котлас (1) с использованием нейросетевых моделей MLP 2-5-1 (2); обучающая и тестовая выборка разделены условной линией (3).

Ошибки данной модели имеют нормальное распределение (рис. 5.4.5), статистически значимые тренды отсутствуют, что свидетельствует о возможности внедрения данной модели для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода на сети Росгидромета.

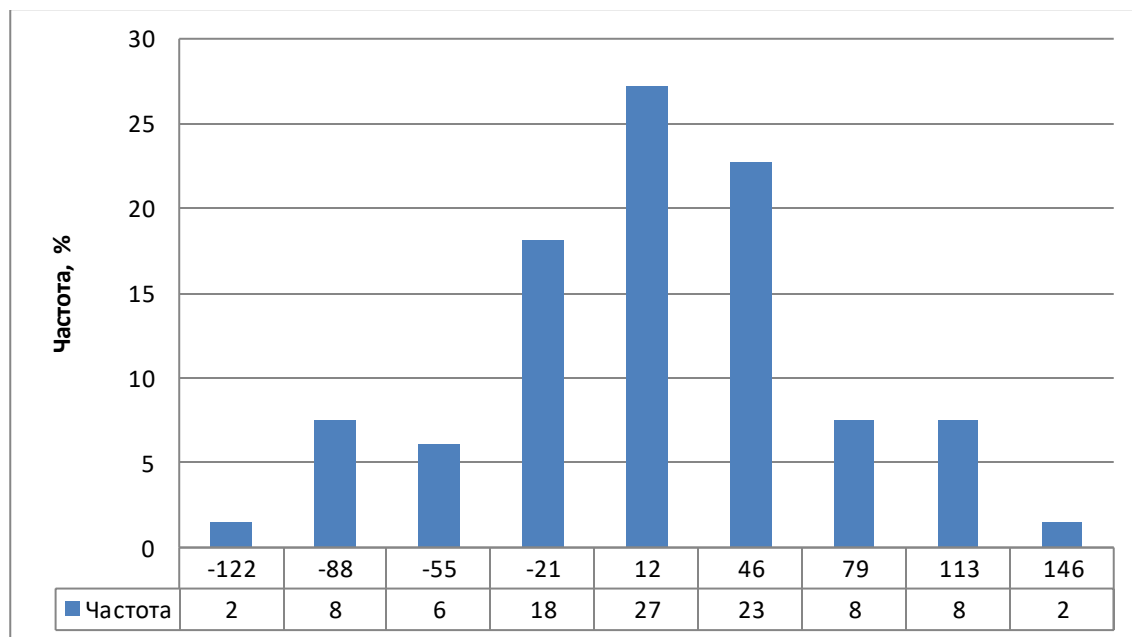


Рис. 5.4.5. Гистограмма эмпирического распределения ошибок выпускаемых прогнозов по *MLP 2-5-1*.

Из всего вышесказанного можно заключить, что применение методов обучения искусственных нейронных сетей по сравнению с методами линейной регрессии для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода дает уменьшение стандартной ошибки прогнозирования на 10—20% и увеличение оправдываемости прогнозов. Разработанные модели прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода обеспечивают высокое качество выпускаемых прогнозов. В пятой главе настоящей работы решены задачи оценки возможности и целесообразности применения методов обучения искусственных нейронных сетей для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода, разработки методических рекомендаций по применению искусственных нейронных сетей в качестве инструмента прогнозирования, а также разработки и верификации методик прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода для ключевых створов. Результаты диссертации, связанные с методическими подходами к

прогнозированию характеристик ледового режима и применением искусственных нейронных сетей при прогнозировании высшего уровня воды за период весеннего ледохода, нашли отражение в учебном процессе при подготовке гидрологов (магистров) Российского гидрометеорологического университета по дисциплине «Гидрологические расчеты и прогнозы на озерах и водохранилищах» по разделам «Методы, процедуры и приемы прогнозирования стационарных и некоторых видов нестационарных гидрологических процессов на озерах и водохранилищах, а также на озерных реках», «Виды гидрологических прогнозов на озерах и водохранилищах, а также на озерных реках, принципы их разработки и оценки», «Прогноз уровня воды и ледового режима в озерах и водохранилищах, а также на озерных реках», «Прогноз термических и ледовых явлений на озерах и водохранилищах, а также на озерных реках». Направление подготовки 05.04.05 «Прикладная гидрометеорология». Направленность (профиль): Инженерная гидрология и рациональное использование водных ресурсов. Уровень подготовки — магистратура.

Заключение

В работе рассмотрен ледовый режим рек Северного края и Кольского полуострова за 1950—2018 годы. Анализ хронологических графиков показал смещение дат образования всех осенних ледовых явлений на более поздние, а весенних на ранние, что свидетельствует о равномерной реакции системы на изменение климата. В то же время уровенный режим не претерпел значительных изменений. Повторяемость опасных природных явлений также осталась на прежнем уровне, что согласуется с данными анализа, полученными другими исследователями, и свидетельствует о том, что важнейшим факторам образования опасных природных явлений являются гидроморфологические характеристики конкретного участка реки, а климатические факторы являются второстепенными.

Анализ ледового режима по длине реки позволил разработать классификацию участков рек по степени стохастичности формирования высших уровней воды и выявить прогностические зависимости с достаточной заблаговременностью. Эти зависимости обладают средней заблаговременностью и высокой надежностью, что позволяет использовать их для краткосрочного и долгосрочного прогнозирования различных элементов ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей. В зависимости от сложности поставленной задачи методы прогнозирования могут быть различны, при этом использование нейросетевых моделей целесообразно лишь в случаях, когда стандартная ошибка прогнозирования по этим моделям значительно меньше природной вариации предсказываемой величины и ошибки прогнозирования при использовании модели линейной регрессии. Выработанные в рамках данного исследования методические рекомендации по работе с искусственными нейронными сетями являются универсальными и могут применяться при разработке любых прогностических моделей. Полученная методика прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в городе Котлас была апробирована на сети при прогнозировании половодья 2021 и 2022 года, показав хорошее соответствие наблюдаемым значениям.

Основные результаты настоящего исследования свидетельствуют о полном решении поставленных задач и достижении цели исследования:

1. разработана типовая форма представления основных характеристик ледового режима рек, в Роспатенте были зарегистрированы 3 базы данных. Установлено увеличение средней за холодный сезон температуры воздуха по всей территории исследуемого региона. Статистически значимое увеличение температуры воздуха характерно для весенних месяцев (март—апрель). Выявлено существенное влияние увеличения температуры воздуха на ледовый режим рек бассейнов Баренцева и Белого морей, заключающееся в уменьшении продолжительности периода с ледовыми явлениями, в частности, периода ледостава за счет смещения сроков замерзания и вскрытия, а также уменьшении максимальных толщин льда. При этом отмечается сохранение повторяемости и мощности опасных гидрологических явлений в период замерзания и вскрытия. В результате проведенного анализа актуализированы характерные сроки и уровни воды различных фаз ледового режима;

2. в предложенной классификации определено три типа участков рек в зависимости от условий формирования высших уровней за период весеннего ледохода. Разработанная классификация участков рек является физически обоснованной и способна облегчить определение оптимального предиктивного состава прогностических моделей;

3. модернизирована ранее разработанная в ФГБУ «ГГИ» методика оценки потенциальных рисков заторных наводнений. Основным преимуществом представленной методики является возможность оценки потенциального риска любых опасных гидрологических явлений заданной обеспеченности для отдельных участков рек и пойм. Данный подход к оценке потенциальных рисков опасных гидрологических явлений учтен при определении зон затопления на реках Роста и Варзуга;

4. на участках рек, отнесенных согласно предложенной классификации к первому типу, для прогнозирования высших уровней воды за период весеннего ледохода рекомендуется использование единой инерционной методики. На участках рек, отнесенных ко второму и третьему типам, доказана целесообразность использования методов обучения искусственных нейронных сетей при прогнозировании высших уровней воды различного генезиса за период

весеннего ледохода. При этом отмечается повышение достоверности и оправданности выпускаемых прогнозов при использовании данного метода (стандартная ошибка прогнозирования уменьшается на 10—20%). Методика прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в районе города Котлас была успешно применена на сети Росгидромета в ходе половодья 2021 и 2022 годов и апробирована Гидрометцентром России.

Список литературы

1. Агафонова С.А. Ледовый режим рек Севера Европейской территории России и его влияние на гидроэкологическую безопасность территории. Москва, диссертация на соискание степени кандидата географических наук, –2009.

2. Агафонова С.А. — Исследования ледового режима рек Арктической зоны России в XX и XXI вв. // Арктика и Антарктика. – 2019. – № 1. – С. 81 - 94.
DOI: 10.7256/2453-8922.2019.1.29530 URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=29530

3. Агафонова С.А., Василенко А.Н., Мироненко А.А., Фролова Н.Л. Ледовый режим и его опасные проявления на реках Арктической зоны России // Труды V всероссийской конференции Ледовые и термические процессы на водных объектах России. М.: РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2016. С. 15–21.(а).

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

5. Алдошкина Е.С, Кузнецов А. Д., Пугачев А. А., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Чукин В.В. Опыт использования аппарата нейронных сетей для анализа и прогноза временного ряда температуры воздуха Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 11. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009, 91-100 с

6. Алешин, И. М. Верификация экспертной системы прогноза заторообразования на Р. Северная Двина / И. М. Алешин, И. В. Малыгин //

Геофизические процессы и биосфера. – 2018. – Т. 17. – № 2. – С. 48-60. – DOI 10.21455/gpb2018.2-3.

7. Антонов В.С., Маслаева Н.Г. Низовье и устье реки Оби. — Л. Гидрометеиздат, 1965. — 235 с

8. Аполлов В.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометиздат, 1974. 419 с.

9. Атавин А. А., Зиновьев А. Т., Кудишин А. В. Гидроледотермический режим в бьефах Крапивинского гидроузла. Прогноз и вопросы управления //Ползуновский вестник. – 2004. – №. 2. – С. 39-44.

10. Банщикова Л.С. Наводнения на реках, вызванные заторами льда, методики их мониторинга и оценки риска, дис. к-та геогр. наук: 25.00.27. СПб, 2009. 140 с.

11. Банщикова Л.С., Сумачев А.Э. Зажоры льда на реке Нева, Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», 2019, 95-98 с.

12. Берденников В.П. Динамические условия образования заторов льда на реках. — Л. Гидрометеиздат Труды ГТИ, 1969, вып. 110, с. 3 - 11.

13. Берденников В.П. Модельные исследования механизма заторообразования для обоснования схемы льдозадержания на р. Днестр и определения ледовых нагрузок. - Л. Гидрометеиздат, Труды ГТИ, 1974, вып. 219, с. 31 - 56.

14. Берденников В.П. Физические характеристики льда заторов и зажоров. - Л. Гидрометеиздат, Труды ГТИ, 1965, вып. 129, с. 19 – 43.

15. Берденников В.П., Шматков В.А. Натурные и лабораторные исследования образования заторов льда. — Л. Гидрометеиздат, Труды IV гидрологического съезда, 1976, т. 6, с.361 — 370.

16. Бернадский Н.М. Речная гидравлика. - Л. - М.: Госэнергоиздат, 1933, т.1.

17. Биденко С.И., Храмов И.С., Шилин М.Б. Оценка территориальной ситуации с использованием искусственных нейронных сетей Ученые записки

Российского государственного гидрометеорологического университета № 54. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2019. 109-123 с.

18. Будыко М. И. Изменение климата. Л.: Гидрометеорологическое издательство. 1969
19. Бузин В.А. Факторы, определяющие максимальный заторный уровень воды // Труды ГГИ. 1980. Вып. 270. С. 33–39.
20. Бузин В.А. Методы прогнозов заторных и зажорных явлений. // Труды V гидрологического съезда. 1989. Т. 7. С. 312–319.
21. Бузин В.А. Методы расчета и прогноза зажорных и заторных уровней воды, Дис. д-ра техн. наук: 11.00.07. СПб, 1995. 283 с.
22. Бузин В.А. Метод прогноза максимальных уровней воды при заторах льда на средних реках. // Метеорология и гидрология. 2001. №9. С. 84–89.
23. Бузин В.А. О наводнениях на реках, вызванных заторами льда // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 5. С. 524–530.
24. Бузин В.А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. 203 с.
25. Бузин В.А. Зажоры и Заторы льда на реках России. СПб. ГГИ, 2015. 240 с.
26. Бузин В.А. Опасные гидрологические явления. Учебное пособие. СПб.: изд. РГГМУ, 2008. 228 с
27. Бузин В.А., Банщикова Л.С. Условия, факторы и мониторинг процесса заторообразования на реках севера ЕТР// Ледовые и термические процессы на водных объектах России. Архангельск, 2007. С. 57–58.
28. Бузин В. А. и др. Зависимости для прогнозов максимальных заторных уровней воды Сухоны, Юга и Малой Северной Двины и влияние на них климатических и антропогенных факторов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2014. – №. 36. – С. 12-21.
29. Бузин В. А., Зиновьев А. Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы). – 2009.

30. Бuzин В.А., Копалиани З.Д. Наводнения, обусловленные заторами льда на реках России: риски их возникновения и прогнозирование // Международная выставка и конгресс ЭКВАТЭК 2008. Сборник докладов Международной конференции «Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях». Москва 4-5 июня 2008 г. С. 139.

31. Васильев Л. Ю. Весеннее наводнение и противозаторные мероприятия в устьевой области Северной Двины // Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий: Докл. VI Всеросс. гидрол. съезда. Москва. – 2006. – С. 223-229.

32. Винников С.Д., Берденников В.П. Метод расчета ледяного затора торошения // Труды V всесоюзного гидрологического съезда. Т. 7. 1989. С. 297–303.

33. Винников С.Д., Проскуряков Б.Д. Гидрофизика – Л: Гидрометиздат, 1988, с182-201

34. Виноградов А. Ю., Никифоровский А. А. Анализ соответствия критериев качества моделирования процессов формирования стока малых рек // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки. – 2015. – №. 2. – С. 33-38.

35. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, общее резюме, Москва, 2014

36. Владимиров А.М. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 365 с.

37. Вуглинский В.С., Гронская Т.П. Изменения ледового режима рек и водоемов России и их возможные последствия для экономики // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: Астерион, 2006. С. 229-244.

38. Вуглинский В. С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2014. №. 3. С.32-35.

39. Германов И.В. Расчет толщины ледяного покрова рек севера ЕТР на основе метеорологических данных, Ученые записки Российского

государственного гидрометеорологического университета № 33. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2014, с. 17-23

40. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы. Учебник. - СПб., изд. РГГМУ, 2007. - 436 с.

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

42. Гидрологическая изученность. Т. 3. Северный край / под ред. Н. М. Жила. —Л.: Гидрометеиздат, 1965. — 612 с.

43. Гидрологическая изученность. Т. 1. Кольский полуостров / под ред. Ю. А. Елшина. — Л.: Гидрометеиздат, 1969. — 134 с.

44. Гинзбург Б. М., Полякова К. Н., Солдатова И. И. Вековые изменения сроков появления льда на реках и их связь с изменениями климата //Метеорология и гидрология. – 1992. – №. 12. – С. 7-79.

45. Гинзбург Б.М., Солдатова И. И. Многолетняя изменчивость сроков ледовых явлений на реках как индикатор колебаний климата переходных сезонов// Метеорология и гидрология. 1997. № 11. С. 99–106.

46. Гинко С.С. Катастрофы на берегах рек. Л.: Гидрометиздат, 1977. 125 с.

47. Горошков И.Ф. Гидрологические расчеты. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 430 с

48. Дебольская Е.И., Дербенев М.В., Исупова М.В., Кузнецов И.С. Оценка катастрофических последствий заторных наводнений на основе математического моделирования // «Экстремальные гидрологические события: теория, моделирование и прогнозирование». Труды международной научной конференции. М., 2003. С.161-164.

49. Дебольский В.К., Дебольская Е.И., Дербенев М.В. Прогнозирование последствий чрезвычайных ситуаций, вызванных зимними наводнениями на основе математического моделирования формирования ледовых заторов

//Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. IV научнопрактическая конференция. 2004. С. 51.

50. Деев Ю.А., Попов А.Ф. Весенние заторы льда в русловых потоках. Л.: Гидрометиздат, 1978. 110 с.

51. Демин В. И. и др. Микроклиматическая изменчивость температуры воздуха в холмистом рельефе на Кольском п-ове //Physics of Auroral Phenomena. – 2017. – Т. 40. – №. 1. – С. 135-138.

52. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2006 г. Москва, 2007 (с сайта meteorf.ru)

53. Донченко Р.В., Щеголева Е.В., Коробко А.С. Закономерности формирования и распространения заторов льда на реках СССР. // Труды ГГИ. Вып. 287. 1982. С. 3–15.

54. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометиздат, 1987. 246 с.

55. Евстигнеев В. М., Магрицкий Д. В. Речной сток //Методические основы современной практики гидрологических расчетов. М.: Изд-во Триумф. – 2016.

56. Зиновьев А. Т. Математическое моделирование гидрологических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС на реках Сибири //Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН. Диссертация на соискание доктора технических наук – 2014.

57. Ильина Л. Л., Грахов А. Н. Реки Севера/ Рец.: д-р геогр. наук А. А. Соколов. — Л.: Гидрометеиздат, 1987. — 128 с.

58. Каинова (Агафонова) С.А. Разработка методики прогноза максимальных заторных уровней р. Сухоны у г. Великий Устюг // Материалы международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов – 2002». Москва, 2002. С.43.

59. Каинова (Агафонова) С.А., Фролова Н.Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины и их влияние на нарушение гидроэкологической безопасности территории // Безопасность энергетических сооружений. Вып. 12. Москва, 2004. С.250–263.

60. Каинова (Агафонова) С.А. Формирование максимальных заторных уровней воды р. Сухоны у г. Великий Устюг // Материалы международной конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов–2001». М.:2001. С. 52.
61. Каинова (Агафонова) С.А., Фролова Н.Л. Формирование максимальных заторных уровней воды р. Сухоны у г. Великий Устюг и возможности их долгосрочного и краткосрочного прогнозирования // Безопасность энергетических сооружений. Вып. 11. М., 2003. С. 265–274.
62. Калинин В.Г., Трофимов Н.А. О выборе необходимой продолжительности периода наблюдений ледового режима рек // Метеорология и гидрология. 2001. №8. С. 78–88.
63. Калинин, В. Г. О зависимостях сроков наступления ледовых явлений и критериях их оценки (на примере камских водохранилищ) / В. Г. Калинин, К. Д. Микова // Метеорология и гидрология. – 2006. – № 12. – С. 96-100.
64. Калинин В.Г. Оценка пространственно-временной динамики толщины ледяного покрова на реках водосбора Воткинского водохранилища // Географический вестник. 2009. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-prostranstvenno-vremennoy-dinamiki-tolschiny-ledyanogo-pokrova-na-rekah-vodosbora-votkinskogo-vodohranilisha> (дата обращения: 21.09.2020).
65. Калинин, В. Г. О выборе репрезентативного расчетного периода наблюдений при изучении ледового режима рек / В. Г. Калинин // Географический вестник. – 2020. – № 1(52). – С. 120-129. – DOI 10.17072/2079-7877-2020-1-120-129.
66. Карнович В.Н., Кулешова Т. В. Долгосрочный прогноз максимальных уровней воды при заторах льда на Северной Двине // Метеорология и гидрология. 1984. №4. С. 89–94.
67. Каталог заторных и зажорных участков рек СССР. Т. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 260 с.
68. Каталог неблагоприятных и опасных гидрологических явлений на реках Республики Коми, г. Суктывкар, 2017. 7 с.

69. Кильмянинов В.В. Влияние температуры воздуха на формирование, разрушение заторов льда и заторные уровни на р. Лена у г. Ленск // Метеорология и гидрология. 2001. №4. С. 69–77.
70. Кильмянинов В.В. К прогнозу заторных уровней на Лене в районе трассы АЯМа // БАМ. Изучение и охрана природной среды. Экспресс-информация. Вып. 1. Иркутск, 1987. С. 34–38.
71. Кильмянинов В.В. О роли водоносности в период заторообразования при формировании максимальных уровней воды на р. Лене у г. Ленск // Метеорология и гидрология. 2002. №9. С. 71–74.
72. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. – СПб. : Нестор-История, 2011. – 504 с.
73. Козлов Д.В. Лед пресноводных водоемов и водотоков. М.: Изд-во МГУП, 2000. 263 с.
74. Козлов Д.В., Бузин В.А., Фролова Н.Л. и др.; Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России: монография / [; Рос. гос. аграрный ун-т - МСХА им. К. А. Тимирязева. Москва: Издательство РГАУ-МСХА, 2015/347с.
75. Комплексные исследования русловых процессов и формирования заторов льда в узле слияния Сухона-Юг-Малая-Северная Двина с целью регулирования процессов заторообразования и разработки противопаводковых мероприятий у г. Великий Устюг, отчет ФГБУ “ГГИ”, СПб, 2012, 221 с.
76. Коновалов И.М., Баланин В.В., Щербакова Р.И. Заторы льда на рр. Сухоне и Северной Двине, мероприятия по предупреждению и борьба с ними // Труды ЛИВТа. Вып. XXX. 1962. С.46–55.
77. Лисер И.Я. Весенние заторы льда на реках Сибири. Л.: Гидрометеиздат, 1967. 103 с.
78. Лупачев Ю. В. Особенности динамики весенних ледоходов и заторов льда в устьях Северной Двины и Печоры // Водные ресурсы, 2001. Т. 28. № 2. С. 245 – 249.
79. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной

группы экспертов по изменению климата [основная группа авторов, Р.К. Пачаури и Л.А. Мейер (ред.)]. МГЭИК, Женева, Швейцария, 163 стр.

80. Магрицкий Д. В., Скрипник Е. Н. Опасные гидрологические процессы в устье Северной Двины и факторы их многолетней изменчивости //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2016. – №. 6.

81. Малыгин И. В. Методика прогноза образования ледовых заторов на реках на основе теории распознавания образов //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2014. – №. 3. (а)

82. Малыгин И. В. О задаче прогнозирования ледовых заторов на реках //Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – 2014. – Т. 18. – №. 3. – С. 73-80. (б)

83. Монин А.С., Шишков Ю.А. История климата Л.: Гидрометеиздат, 1979. 408 с.

84. Морейдо В. М. и др. Возможности краткосрочного прогнозирования стока малой реки с использованием методов машинного обучения //Гидросфера. Опасные процессы и явления. – 2020. – Т. 2. – №. 4.

85. Мягков С.М. География природного риска. М.: Издательство МГУ, 1995. 224 с.

86. Нежиховский Р.А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 184 с.

87. Нежиховский Р.А. Гидроэкологические основы водного хозяйства. Л.: Гидрометиздат, 1990. 230 с.

88. Нежиховский Р.А., Саковская Н.П. Прогнозы максимальных заторных уровней воды рек Северной Двины и Немана // Тр. ГГИ. Вып. 227. 1975. С. 70–86

89. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2018 год. Санкт-Петербург 2019 – ФГБУ «ААНИИ»

90. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2019 год. Санкт-Петербург 2020 – ФГБУ «ААНИИ»

91. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2020 год. Санкт-Петербург 2021 – ФГБУ «ААНИИ»

92. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2019 году. Санкт-Петербург 2020 — ФГБУ «ГГИ»
93. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2020 году. Санкт-Петербург 2021 — ФГБУ «ГГИ»
94. Одрова Т.В. Гидрофизика водоемов суши. Л.: Гидрометеиздат, 1979.
95. Попов Е.Г. Основы гидрологических прогнозов. Ленинград, Гидрометеорологическое издательство 1968. 294с.(а)
96. Попов Е.Г. Заторы льда и проблема борьбы с ними // Метеорология и гидрология. 1968. № 8. С. 45–47.(б)
97. Рождественский А.В., Лобанов В.А., Бузин В.А., Владимиров А.М. Методология расчетов экстремальных значений гидрологических характеристик // Метеорология и гидрология. 2002. № 9. С.62–70.
98. Руководство по гидрологической практике (ВМО-№ 168), Том II – Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов, –2012–С.324
- 99.
100. Русин И.Н. Стихийные бедствия и возможности их прогноза. СПб, 2003.
101. Савченко Е.И. Естественные функции полей дат появления льда на реках// Труды ГГИ. Вып. 117. 1974. С. 74–81.
102. Сикан А.В., Малышева Н.Г., Винокуров И.О. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2014. 76 с
103. Солдатова И.И. Многолетние изменения сроков наступления ледовых явлений на реках СНГ. Дис. канд. геогр. наук: 11.00.07. М., 1996. 131 с. (а)
104. Солдатова И.И. О сроках ледовых явлений на реках в условиях современного климата// Метеорология и гидрология. 1996. №4. С. 87–94. (б)
105. Софер М.Г. Заторы льда на реках Севера Европейской части СССР // Автореф. дис. на соиск. уч. степени к.г.н. Л, 1967. 15 с.

106. Сумачев А.Э. Изменение климата и его влияние на гидрологический режим Северной Двины, Естественные и технические науки, в.9, 2018
107. Сумачев А.Э. Оценка возможности прогнозирования максимального ледоходного уровня воды с использованием максимальной толщины льда на примере рек бассейна Северной Двины, Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 54. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2019, с. 48-57
108. Сумачев А.Э. Банщикова Л.С. Прогнозирование гидрологических характеристик с использованием нейронных сетей. Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», 2019, 812-815 с.(а)
109. Сумачев А.Э. Банщикова Л.С. Изменение климата и его влияние на ледовый режим рек Арктической зоны РФ. Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития», 2019, 816-819 с.(б)
110. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Ледовый режим реки Печоры в современных климатических условиях и принципы прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 10. – с. 75-80.
111. Суркова Г. В., Крылов А. А. Изменение гидротермических климатических ресурсов Арктики на фоне потепления XXI века //Арктика и Антарктика. – 2017. – №. 1.
112. Солнечная активность и изменение климата под редакцией А.Х. Хргиана Гидрометеорологическое издательство. 1966
113. Таратурин А.А. Наводнения на территории Российской Федерации. Екатеринбург, 2000. 308 с.
114. Топтунова О. Н. Анализ циклонических режимов северного и южного полушарий // Автореферат дисс. кандидата физико-математических наук/Рос. гос. гидрометеорол. ун-т (РГГМУ). Санкт-Петербург. – 2016.

115. Топтунова О. Н, Анискина О. Г. Изменения циклонических режимов северного и Южного полушарий в условиях меняющегося климата // Научный журнал КубГАУ - Scientific Journal of KubSAU. 2015. №114.
23. 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.
116. Чижов А. Н. О механизме формирования заторов льда и их типизация //Труды ГГИ. Вып. 227. 1975. С. 3–17.
117. Штанников А. В., Муждаба О. В. Состояние и перспективы развития наблюдательной гидрологической сети в Арктической зоне РФ //Гидрометеорология и экология: научные достижения и перспективы развития. – 2018. – С. 730-733.
118. Шуляковский Л.Г., Еремина В. И. К методике прогноза заторных уровней воды. // Метеорология и гидрология. 1952. № 1. С. 46–51.
119. Akhtar M.K., Corzo G. A., S. J. van Andel and A. Jonoski River flow forecasting with artificial neural networks using satellite observed precipitation pre-processed with flow length and travel time information: case study of the Ganges river basin Hydrology and Earth System Science, 13, 1607–1618, 2009.
120. Barrette P.D. Overview of ice roads in Canada: design, usage and climate change mitigation. Technical Report (National Research Council of Canada. Ocean, Coastal and River Engineering). 2015. 61 p. doi: 10.4224/40000400
121. Barrette P. D. The Canadian winter road infrastructure and climate change adaptation: prospective solutions through R&D. Technical Report (National Research Council of Canada. Ocean, Coastal and River Engineering). 2018. 96 p. doi: 10.4224/40000402
122. Barrette P.D., Charlebois L., Butt B. Reinforcement of ice covers for transportation: material investigation and preliminary laboratory testing / Technical Report (National Research Council of Canada. Ocean, Coastal and River Engineering), 2019. 63 p. doi:10.4224/40000404

123. Barrette P.D. Reinforcement of ice covers for transportation: beam and preliminary plate testing Technical Report (National Research Council of Canada. Ocean, Coastal and River Engineering), 2020 77p. doi: 10.4224/8894844
124. Belore H. S., Burrell B. C., Beltaos S. Ice jam mitigation //Canadian Journal of Civil Engineering. – 1990. – T. 17. – №. 5. – C. 675-685.
125. Beltaos S. River Ice Jams Water Resources Publication, 1996. 372 p.
126. Beltaos S., Prowse T. D. Climate impacts on extreme ice jam events in Canadian rivers. // Hydrological Science Journal, 2001. Vol. 46. Is. 1. P. 157 – 182. doi:10.1080/02626660109492807
127. Beltaos S., Burrell B.C. Climatic change and river ice breakup.// Canadian Journal of Civil Engineering, 2003, Vol. 30. Is.1. pp. 145-155, <https://doi.org/10.1139/102-042>
128. Beltaos S. River ice breakup processes: recent advances and future directions //Canadian Journal of Civil Engineering. – 2007. – T. 34. – №. 6. – C. 703-716.
129. Beltaos S. Progress in the study and management of river ice jams // Cold Regions Science and Technology 51 (2008). P. 2–19.
130. Beltaos S. Assessing ice-jam flood risk: methodology and limitations //Proceedings of the 20th IAHR International Symposium on Ice, Lathi, Finland. – 2010. – C. 14-17.
131. Beltaos S. Distributed function analysis of ice jam flood frequency //Cold Regions Science and Technology. – 2012. – T. 71. – C. 1-10.
132. Beltaos S. Freezeup jamming and formation of ice cover //Committee on River Ice Processes and the Environment, Canadian Geophysical Union, Hydrology Section: Edmonton, AB, Canada. – 2013. – C. 181-256.
133. Beltaos S. Comparing the impacts of regulation and climate on ice-jam flooding of the Peace-Athabasca Delta //Cold Regions Science and Technology. – 2014. – T. 108. – C. 49-58.
134. Beltaos S., Burrell B. C. Hydroclimatic aspects of ice jam flooding near Perth-Andover, New Brunswick //Canadian Journal of Civil Engineering. – 2015. – T. 42. – №. 9. – C. 686-695.

135. Beltaos S. Frequency of ice-jam flooding of Peace-Athabasca Delta //Canadian Journal of Civil Engineering. – 2018. – T. 45. – №. 1. – C. 71-75.
136. Beltaos S., Bonsal B. Climate change impacts on Peace River ice thickness and implications to ice-jam flooding of Peace-Athabasca Delta, Canada //Cold Regions Science and Technology. – 2021. – T. 186. – C. 103279.
137. De Coste M. et al. A hybrid ensemble modelling framework for the prediction of breakup ice jams on Northern Canadian Rivers //Cold Regions Science and Technology. – 2021. – T. 189. – C. 103302.
138. Lindenschmidt K-E. River Ice Processes and Ice Flood Forecasting. – Springer International Publishing, 2020.
139. Lindenschmidt K.-E. et al. Development of an Ice Jam Flood Forecasting System for the Lower Oder River—Requirements for Real-Time Predictions of Water, Ice and Sediment Transport //Water. – 2019. – V. 11. – №. 1. – P. 95.
140. Sazonov, A. A., Krylenko, I. N., Amerbaev, A. N., Zavyalova, E. V., Semenova, N. K., Gelfan, A. N., & Frolova, N. L. (2019, April). Modeling the scenarios of catastrophic flood on the river of the Northern. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 263. — P. 1–8. DOI: 10.1088/1755-1315/263/1/012056
141. Shamseldin A.Y., O’Connor K.M. A Non-Linear Neural Network Technique for Updating of River Flow Forecasts // Hydrology and Earth System Sciences. – 2001. – Vol. 5 (№ 4). – pp. 577-597.
142. Sumachev A.E., Kuzmin V.A. and Borodin E.S., River Flow Forecasting Using Artificial Neural Networks, International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 9(10), 2018, pp.706–714.
143. Vuglinsky V. et al. Assessment of changes in ice regime characteristics of Russian lakes and rivers under current climate conditions //Natural Resources. – 2017. – T. 8. – №. 06. – C. 416.
144. Vuglinsky V. et al. Changes in ice cover duration and maximum ice thickness for Rivers and lakes in the Asian part of Russia //Natural Resources. – 2018. – T. 9. – №. 03. – C. 73.

145. <http://www.sevmeteo.ru> Северное межрегиональное территориальное управление федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

146. <http://www.meteo.ru/> – ГУ ВНИИГМИ – МЦД (дата обращения 23.02.2019)

147. http://www.geogr.msu.ru/news/news_detail.php?ID=11495 (дата обращения 23.02.2019)

Приложения

Приложение 1. Статистические характеристики многолетних рядов наблюдений за температурой воздуха исследуемого региона

Таблица 1. Статистические характеристики многолетней изменчивости температуры воздуха за холодный сезон опорных гидрометеорологических станций Двинско-Печорского бассейнового округа.

ГМС	Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	Ср. за X-IV
Койнас	Ср. Значение 1950-2017	0,2	-7,5	-12,6	-16,7	-14,6	-7,9	-0,9	-8,6
	Ср. значение 1950-1980	-0,6	-7,4	-12,5	-17,2	-15,6	-9,1	-1,3	-9,1
	Ср. значение 1981-2017	0,8	-7,5	-12,7	-16,3	-13,9	-6,9	-0,5	-8,1
	Разница	1,4	-0,1	-0,2	0,9	1,7	2,2	0,8	1,0
	R	0,21	0,10	0,01	0,07	0,13	0,29	0,14	0,27
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Сура	Ср. Значение 1950-2017	1,0	-6,5	-11,5	-15,4	-13,4	-6,9	0,3	-7,5
	Ср. значение 1950-1980	0,3	-6,6	-11,6	-16,0	-14,3	-7,8	0,1	-8,0
	Ср. значение 1981-2017	1,5	-6,5	-11,3	-14,8	-12,6	-6,1	0,5	-7,0
	Разница	1,3	0,2	0,3	1,2	1,7	1,7	0,5	1,0
	R	0,20	0,10	0,04	0,11	0,15	0,26	0,11	0,29
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Шенкурск	Ср. Значение 1950-2017	2,2	-4,8	-9,7	-13,3	-11,4	-5,3	2,0	-5,8
	Ср. значение 1950-1980	1,5	-4,8	-10,0	-14,0	-12,4	-6,2	1,6	-6,3
	Ср. значение 1981-2017	2,7	-4,8	-9,4	-12,7	-10,6	-4,6	2,4	-5,3
	Разница	1,2	0,0	0,6	1,3	1,8	1,6	0,8	1,1
	R	0,20	0,12	0,08	0,13	0,18	0,28	0,15	0,33
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Каргополь	Ср. Значение 1950-2017	2,3	-4,2	-8,8	-12,4	-10,9	-5,6	1,6	-5,4
	Ср. значение 1950-1980	1,8	-4,1	-9,3	-13,2	-12,0	-6,8	0,9	-6,1
	Ср. значение 1981-2017	2,8	-4,2	-8,4	-11,6	-10,0	-4,6	2,2	-4,8
	Разница	1,0	0,0	0,9	1,6	2,0	2,2	1,3	1,3
	R	0,18	0,12	0,12	0,15	0,22	0,37	0,29	0,40
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Няндама	Ср. Значение 1950-2017	1,3	-5,0	-9,5	-12,7	-11,1	-5,5	1,3	-5,9
	Ср. значение 1950-1980	0,9	-5,1	-9,9	-13,6	-12,1	-6,5	0,7	-6,5
	Ср. значение 1981-2017	1,7	-5,0	-9,2	-12,1	-10,3	-4,8	1,7	-5,4
	Разница	0,8	0,1	0,8	1,5	1,8	1,7	1,0	1,1
	R	0,07	0,14	0,11	0,17	0,23	0,32	0,22	0,37
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Усть-Вымь	Ср. Значение 1950-2017	0,6	-7,0	-12,0	-15,6	-13,4	-6,5	0,9	-7,6
	Ср. значение 1950-1980	-0,1	-7,0	-12,2	-16,3	-14,3	-7,5	0,5	-8,1
	Ср. значение 1981-2017	1,3	-7,0	-11,9	-14,9	-12,6	-5,6	1,3	-7,1
	Разница	1,4	0,0	0,3	1,4	1,7	1,9	0,8	1,1
	R	0,21	0,14	0,02	0,12	0,17	0,33	0,14	0,33
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Троицко-Печерское	Ср. Значение 1950-2017	-0,6	-9,0	-14,4	-17,7	-15,7	-7,8	0,0	-9,3
	Ср. значение 1950-1980	-1,4	-9,0	-14,4	-18,4	-16,4	-8,9	-0,2	-9,8
	Ср. значение 1981-2017	0,0	-9,1	-14,3	-17,1	-15,0	-6,8	0,1	-8,9
	Разница	1,3	0,0	0,1	1,3	1,3	2,1	0,3	0,9

ГМС	Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	Ср. за X-IV
	R	0,13	0,11	-0,03	0,06	0,13	0,32	0,05	0,25
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Тотьма	Ср. Значение 1950-2017	2,4	-4,4	-9,2	-12,6	-10,9	-4,8	2,7	-5,3
	Ср. значение 1950-1980	1,8	-4,5	-9,8	-13,7	-12,1	-5,9	2,1	-6,0
	Ср. значение 1981-2017	2,9	-4,3	-8,7	-11,8	-9,9	-4,0	3,2	-4,7
	Разница	1,0	0,2	1,1	2,0	2,2	1,9	1,0	1,3
	R	0,18	0,19	0,12	0,20	0,25	0,36	0,21	0,43
	Значимость R	-	-	-	-	+	+	-	+
Мезень	Ср. Значение 1950-2017	0,4	-6,3	-10,6	-14,4	-13,0	-7,7	-1,9	-7,6
	Ср. значение 1950-1980	-0,1	-6,2	-10,7	-14,8	-14,0	-9,0	-2,7	-8,2
	Ср. значение 1981-2017	0,8	-6,3	-10,5	-14,1	-12,1	-6,5	-1,3	-7,1
	Разница	0,9	-0,1	0,2	0,7	2,0	2,5	1,4	1,1
	R	0,21	0,09	0,09	0,06	0,16	0,29	0,21	0,33
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Архангельск	Ср. Значение 1950-2017	1,9	-4,9	-9,4	-13,1	-11,7	-6,3	0,2	-6,2
	Ср. значение 1950-1980	1,3	-4,7	-9,6	-13,7	-12,7	-7,4	-0,3	-6,7
	Ср. значение 1981-2017	2,4	-5,0	-9,1	-12,7	-11,0	-5,3	0,6	-5,7
	Разница	1,1	-0,3	0,5	0,9	1,7	2,1	0,9	1,0
	R	0,18	0,08	0,10	0,09	0,17	0,32	0,20	0,33
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Онега	Ср. Значение 1950-2017	2,6	-3,7	-8,2	-11,9	-10,7	-5,6	0,8	-5,2
	Ср. значение 1950-1980	2,0	-3,7	-8,5	-12,5	-11,5	-6,7	0,3	-5,8
	Ср. значение 1981-2017	3,1	-3,7	-8,0	-11,4	-10,0	-4,7	1,2	-4,8
	Разница	1,1	0,0	0,5	1,1	1,5	2,0	0,9	1,0
	R	0,19	0,11	0,12	0,13	0,18	0,32	0,20	0,35
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Котлас	Ср. Значение 1950-2017	1,9	-5,3	-10,4	-13,9	-12,1	-5,4	2,2	-6,1
	Ср. значение 1950-1980	1,2	-5,3	-10,8	-14,8	-13,2	-6,4	1,7	-6,8
	Ср. значение 1981-2017	2,4	-5,3	-10,0	-13,2	-11,1	-4,6	2,6	-5,6
	Разница	1,2	-0,1	0,8	1,6	2,1	1,8	0,9	1,2
	R	0,19	0,13	0,07	0,16	0,21	0,31	0,16	0,38
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Вологда	Ср. Значение 1950-2017	3,0	-3,6	-8,3	-11,6	-10,4	-4,7	3,2	-4,6
	Ср. значение 1950-1980	2,7	-3,6	-8,7	-12,6	-11,4	-5,6	2,7	-5,2
	Ср. значение 1981-2017	3,3	-3,6	-7,9	-10,8	-9,6	-4,0	3,5	-4,1
	Разница	0,6	0,0	0,8	1,8	1,7	1,5	0,8	1,0
	R	0,10	0,15	0,11	0,17	0,23	0,30	0,19	0,36
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Великий Устюг	Ср. Значение 1950-2017	1,9	-5,3	-10,4	-13,8	-11,9	-5,3	2,3	-6,1
	Ср. значение 1950-1980	1,3	-5,2	-10,7	-14,7	-13,2	-6,3	1,8	-6,7
	Ср. значение 1981-2017	2,4	-5,3	-10,1	-13,1	-10,9	-4,5	2,6	-5,5
	Разница	1,1	-0,1	0,6	1,6	2,2	1,8	0,8	1,2
	R	0,15	0,14	0,07	0,16	0,23	0,33	0,16	0,39
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Усть-Цильма	Ср. Значение 1950-2017	-0,8	-9,0	-13,6	-17,4	-15,6	-8,9	-2,3	-9,6
	Ср. значение 1950-1980	-1,7	-9,1	-13,6	-17,8	-16,3	-10,3	-2,8	-10,2
	Ср. значение 1981-2017	-0,1	-8,9	-13,7	-17,0	-15,0	-7,7	-1,9	-9,2
	Разница	1,6	0,2	-0,1	0,8	1,3	2,6	0,8	1,1
	R	0,21	0,10	0,01	0,04	0,10	0,32	0,14	0,28

ГМС	Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	Ср. за X-IV
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	+
Усть-Уса	Ср. Значение 1950-2017	-2,1	-10,6	-15,3	-18,6	-17,0	-10,4	-4,0	-11,1
	Ср. значение 1950-1980	-2,8	-10,7	-15,1	-19,0	-17,3	-11,7	-4,1	-11,5
	Ср. значение 1981-2017	-1,5	-10,6	-15,6	-18,2	-16,8	-9,3	-4,0	-10,8
	Разница	1,3	0,1	-0,4	0,8	0,5	2,5	0,1	0,7
	R	0,20	0,09	-0,01	0,02	0,06	0,31	0,09	0,23
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	-	-
Печора	Ср. Значение 1950-2017	-1,3	-10,3	-15,6	-19,1	-17,3	-9,8	-2,9	-10,9
	Ср. значение 1950-1980	-2,6	-10,6	-15,9	-19,8	-18,0	-11,4	-3,3	-11,6
	Ср. значение 1981-2017	-0,3	-10,1	-15,4	-18,5	-16,7	-8,7	-2,6	-10,3
	Разница	2,3	0,5	0,5	1,3	1,2	2,7	0,8	1,3
	R	0,29	0,14	0,07	0,04	0,11	0,32	0,17	0,33
	Значимость R	+	-	-	-	-	+	-	+
Сыктывкар	Ср. Значение 1950-2017	0,9	-6,5	-11,6	-15,0	-12,9	-5,8	1,9	-7,2
	Ср. значение 1950-1980	0,2	-6,6	-12,0	-15,8	-13,8	-6,6	1,8	-8,0
	Ср. значение 1981-2017	1,6	-6,5	-11,3	-14,3	-12,1	-5,1	1,9	-6,6
	Разница	1,4	0,0	0,7	1,5	1,7	1,4	0,2	1,4
	R	0,23	0,15	0,05	0,12	0,15	0,20	0,01	0,43
	Значимость R	-	-	-	-	-	-	-	+

Таблица 2. Статистические характеристики многолетней изменчивости температуры воздуха за холодный сезон опорных гидрометеорологических станций Кольского полуострова.

ГМС	Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	Ср. за X-IV
Вайда Губа	Ср. Значение 1950-2017	2,1	-1,7	-4,0	-5,7	-6,6	-4,5	-1,6	-3,2
	Ср. значение 1950-1980	3,0	-1,1	-3,2	-4,9	-5,3	-3,3	-0,4	-2,2
	Ср. значение 1981-2017	2,6	-1,4	-3,5	-5,3	-5,8	-3,9	-0,9	-2,6
	Разница	1,0	0,6	0,9	0,7	1,3	1,2	1,2	1,0
	R	0,26	0,24	0,32	0,21	0,29	0,35	0,39	0,50
	Значимость R	+	-	+	-	+	+	+	+
Верх. Лотты	Ср. Значение 1950-2017	-1,3	-8,0	-12,7	-15,0	-14,4	-8,4	-2,4	-8,9
	Ср. значение 1950-1980	0,0	-7,5	-11,8	-14,4	-12,9	-7,5	-1,1	-7,9
	Ср. значение 1981-2017	-0,5	-7,7	-12,2	-14,7	-13,5	-7,9	-1,6	-8,3
	Разница	1,3	0,5	0,8	0,6	1,4	0,9	1,3	1,0
	R	0,20	0,14	0,26	0,06	0,15	0,13	0,40	0,35
	Значимость R	-	-	+	-	-	-	+	+
Зашеек	Ср. Значение 1950-2017	0,9	-5,0	-9,3	-12,3	-12,5	-7,5	-1,5	-6,7
	Ср. значение 1950-1980	1,4	-5,1	-9,3	-12,3	-11,4	-6,6	-0,9	-6,3
	Ср. значение 1981-2017	1,2	-5,1	-9,3	-12,3	-11,9	-7,0	-1,2	-6,5
	Разница	0,5	-0,2	-0,1	-0,1	1,1	1,0	0,7	0,4
	R	0,01	0,01	0,08	-0,02	0,10	0,15	0,18	0,14
	Значимость R	-	-	-	-	-	-	-	-
Кандалакша	Ср. Значение 1950-2017	0,7	-5,1	-9,5	-12,5	-12,9	-8,1	-1,9	-7,0
	Ср. значение 1950-1980	1,4	-4,9	-9,2	-12,2	-11,2	-6,3	-0,7	-6,2
	Ср. значение 1981-2017	1,1	-5,0	-9,3	-12,4	-12,0	-7,1	-1,2	-6,6
	Разница	0,7	0,2	0,2	0,2	1,7	1,8	1,2	0,9
	R	0,07	0,10	0,12	0,05	0,19	0,27	0,32	0,29

ГМС	Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	Ср. за X-IV
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Каневка	Ср. Значение 1950-2017	-1,1	-6,9	-11,0	-14,8	-14,9	-10,7	-4,7	-9,2
	Ср. значение 1950-1980	0,2	-6,7	-10,3	-14,1	-12,8	-8,4	-3,0	-7,9
	Ср. значение 1981-2017	-0,3	-6,8	-10,6	-14,3	-13,6	-9,3	-3,7	-8,4
	Разница	1,3	0,3	0,7	0,7	2,0	2,3	1,8	1,3
	R	0,27	0,17	0,25	0,14	0,21	0,26	0,37	0,46
	Значимость R	+	-	+	-	-	+	+	+
Кашкаранцы	Ср. Значение 1950-2017	1,7	-3,0	-6,1	-9,9	-11,5	-7,8	-3,0	-5,7
	Ср. значение 1950-1980	2,6	-2,4	-5,8	-9,1	-9,5	-6,3	-1,8	-4,6
	Ср. значение 1981-2017	2,2	-2,7	-5,9	-9,5	-10,4	-7,0	-2,4	-5,1
	Разница	0,9	0,6	0,3	0,8	2,0	1,6	1,2	1,1
	R	0,19	0,20	0,16	0,18	0,25	0,27	0,34	0,40
	Значимость R	-	-	-	-	+	+	+	+
Ковда	Ср. Значение 1950-2017	1,6	-4,6	-8,9	-12,2	-12,5	-7,7	-1,3	-6,5
	Ср. значение 1950-1980	2,2	-3,8	-8,0	-11,4	-10,3	-5,7	-0,4	-5,4
	Ср. значение 1981-2017	1,9	-4,2	-8,4	-11,8	-11,3	-6,6	-0,8	-5,9
	Разница	0,6	0,8	0,9	0,8	2,1	2,0	0,8	1,1
	R	0,07	0,22	0,18	0,11	0,23	0,30	0,25	0,33
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Ковдор	Ср. Значение 1950-2017	-0,9	-6,8	-10,7	-13,1	-13,4	-8,7	-2,6	-8,0
	Ср. значение 1950-1980	0,2	-5,9	-9,4	-12,2	-11,1	-6,6	-1,0	-6,6
	Ср. значение 1981-2017	-0,3	-6,3	-10,0	-12,6	-12,1	-7,5	-1,7	-7,2
	Разница	1,1	0,9	1,2	0,9	2,2	2,0	1,6	1,4
	R	0,14	0,20	0,24	0,13	0,23	0,31	0,38	0,42
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Краснощелье	Ср. Значение 1950-2017	-0,7	-6,6	-10,3	-13,7	-14,2	-10,3	-4,0	-8,5
	Ср. значение 1950-1980	0,3	-6,2	-10,1	-13,3	-12,5	-8,2	-2,5	-7,5
	Ср. значение 1981-2017	-0,1	-6,4	-10,2	-13,5	-13,2	-9,1	-3,2	-8,0
	Разница	1,0	0,4	0,2	0,4	1,7	2,1	1,5	1,0
	R	0,16	0,12	0,16	0,06	0,18	0,28	0,32	0,34
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Ловозеро	Ср. Значение 1950-2017	-0,8	-7,0	-11,1	-13,6	-14,4	-9,9	-3,7	-8,6
	Ср. значение 1950-1980	0,2	-6,7	-10,4	-13,4	-12,8	-8,0	-2,1	-7,6
	Ср. значение 1981-2017	-0,3	-6,8	-10,7	-13,5	-13,5	-8,8	-2,8	-8,1
	Разница	0,9	0,3	0,7	0,2	1,6	1,9	1,6	1,0
	R	0,13	0,11	0,20	-0,02	0,18	0,27	0,34	0,34
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Мончегорск	Ср. Значение 1950-2017	-0,3	-6,3	-10,7	-12,2	-14,6	-8,0	-3,0	-7,9
	Ср. значение 1950-1980	1,3	-5,1	-9,1	-12,2	-11,1	-6,9	-1,1	-6,3
	Ср. значение 1981-2017	0,9	-5,4	-9,5	-12,2	-11,9	-7,2	-1,5	-6,7
	Разница	1,7	1,2	1,6	0,0	3,4	1,1	2,0	1,6
	R	0,33	0,36	0,29	0,04	0,27	0,12	0,46	0,40
	Значимость R	+	+	+	-	+	-	+	+
Мурманск	Ср. Значение 1950-2017	0,6	-4,9	-8,2	-10,7	-11,2	-6,7	-1,7	-6,1
	Ср. значение 1950-1980	1,6	-4,3	-7,7	-10,3	-9,5	-5,3	-0,4	-5,1
	Ср. значение 1981-2017	1,2	-4,6	-8,0	-10,4	-10,2	-5,9	-1,0	-5,6
	Разница	0,9	0,6	0,5	0,4	1,7	1,4	1,2	1,0
	R	0,15	0,14	0,17	0,06	0,19	0,26	0,32	0,34
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+

ГМС	Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	Ср. за X-IV
Никель	Ср. Значение 1950-2017	-0,2	-5,4	-8,8	-11,5	-12,3	-7,6	-2,1	-6,8
	Ср. значение 1950-1980	1,2	-4,9	-8,2	-10,4	-9,4	-5,6	-0,7	-5,4
	Ср. значение 1981-2017	0,7	-5,1	-8,4	-10,8	-10,4	-6,3	-1,2	-5,9
	Разница	1,4	0,5	0,6	1,1	2,9	2,0	1,3	1,4
	R	0,26	0,17	0,18	0,14	0,30	0,34	0,38	0,31
	Значимость R	+	-	-	-	+	+	+	+
Киркинес	Ср. Значение 1950-2017	0,1	-5,5	-8,7	-11,3	-12,0	-7,7	-2,3	-6,8
	Ср. значение 1950-1980	1,2	-4,8	-8,2	-10,5	-10,0	-6,0	-1,3	-5,7
	Ср. значение 1981-2017	0,7	-5,1	-8,4	-10,9	-10,8	-6,7	-1,7	-6,1
	Разница	1,0	0,7	0,5	0,8	2,0	1,7	1,0	1,1
	R	0,18	0,18	0,19	0,12	0,24	0,31	0,29	0,37
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Нелим	Ср. Значение 1950-2017	-0,4	-6,9	-11,4	-14,2	-13,6	-8,1	-2,4	-8,1
	Ср. значение 1950-1980	0,8	-6,2	-10,5	-13,0	-11,7	-7,3	-1,3	-7,0
	Ср. значение 1981-2017	0,4	-6,4	-10,8	-13,4	-12,4	-7,6	-1,7	-7,4
	Разница	1,2	0,7	0,9	1,3	1,9	0,7	1,1	1,1
	R	0,21	0,19	0,27	0,20	0,17	0,11	0,33	0,41
	Значимость R	-	-	+	-	-	-	+	+
Нивакюель	Ср. Значение 1950-2017	-0,2	-6,3	-11,1	-13,1	-13,9	-7,5	-2,5	-7,8
	Ср. значение 1950-1980	1,0	-5,2	-9,9	-12,6	-11,2	-6,4	-0,8	-6,4
	Ср. значение 1981-2017	0,7	-5,5	-10,2	-12,7	-11,9	-6,7	-1,2	-6,8
	Разница	1,3	1,1	1,2	0,5	2,6	1,0	1,7	1,4
	R	0,27	0,35	0,25	0,14	0,21	0,12	0,43	0,43
	Значимость R	+	+	+	-	-	-	+	+
Полярное	Ср. Значение 1950-2017	1,4	-3,8	-6,5	-8,7	-9,1	-5,8	-1,5	-4,9
	Ср. значение 1950-1980	2,0	-3,3	-5,8	-8,2	-7,9	-4,7	-0,7	-4,1
	Ср. значение 1981-2017	1,8	-3,5	-6,0	-8,4	-8,4	-5,1	-1,0	-4,4
	Разница	0,6	0,5	0,7	0,5	1,1	1,1	0,9	0,8
	R	0,10	0,16	0,20	0,06	0,16	0,27	0,29	0,27
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Падун	Ср. Значение 1950-2017	-0,2	-6,7	-11,3	-13,8	-13,6	-8,2	-2,0	-8,0
	Ср. значение 1950-1980	0,8	-5,8	-10,4	-13,2	-11,9	-6,6	-0,6	-6,8
	Ср. значение 1981-2017	0,4	-6,2	-10,8	-13,5	-12,6	-7,3	-1,2	-7,3
	Разница	1,0	0,8	0,9	0,6	1,7	1,6	1,4	1,1
	R	0,14	0,17	0,20	0,09	0,15	0,20	0,36	0,36
	Значимость R	-	-	-	-	-	-	+	+
Пялица	Ср. Значение 1950-2017	1,3	-3,3	-6,8	-10,6	-11,7	-8,5	-3,7	-6,2
	Ср. значение 1950-1980	2,2	-3,0	-6,0	-9,6	-9,8	-7,0	-2,7	-5,1
	Ср. значение 1981-2017	1,8	-3,1	-6,4	-10,1	-10,6	-7,6	-3,2	-5,6
	Разница	0,9	0,3	0,7	1,0	1,9	1,5	1,0	1,1
	R	0,19	0,16	0,23	0,17	0,24	0,25	0,29	0,39
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Сосновец	Ср. Значение 1950-2017	1,7	-2,8	-6,0	-9,7	-10,9	-8,2	-3,9	-5,7
	Ср. значение 1950-1980	2,8	-2,2	-5,6	-9,3	-9,3	-6,5	-2,8	-4,7
	Ср. значение 1981-2017	2,3	-2,5	-5,8	-9,5	-10,0	-7,2	-3,3	-5,2
	Разница	1,1	0,6	0,5	0,4	1,7	1,7	1,1	1,0
	R	0,24	0,19	0,17	0,09	0,20	0,26	0,30	0,25
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Териберка	Ср. Значение 1950-2017	1,4	-2,9	-6,0	-7,8	-8,7	-6,0	-2,1	-4,6

ГМС	Хар-ка	X	XI	XII	I	II	III	IV	Ср. за X-IV
	Ср. значение 1950-1980	2,3	-2,9	-5,3	-7,4	-7,4	-4,8	-1,1	-3,8
	Ср. значение 1981-2017	1,9	-2,9	-5,6	-7,6	-8,0	-5,3	-1,6	-4,1
	Разница	0,9	0,0	0,7	0,5	1,3	1,2	1,0	0,8
	R	0,23	0,08	0,20	0,07	0,18	0,27	0,26	0,36
	Значимость R	-	-	-	-	-	+	+	+
Святой Нос	Ср. Значение 1950-2017	1,8	-2,2	-5,4	-7,7	-8,9	-7,1	-3,2	-4,7
	Ср. значение 1950-1980	3,1	-1,2	-3,5	-6,5	-6,7	-4,7	-1,5	-3,0
	Ср. значение 1981-2017	2,5	-1,7	-4,4	-7,1	-7,7	-5,7	-2,3	-3,8
	Разница	1,3	1,0	1,8	1,1	2,2	2,4	1,7	1,7
	R	0,38	0,35	0,43	0,25	0,33	0,44	0,39	0,50
Значимость R	+	+	+	+	+	+	+	+	
Чаваньга	Ср. Значение 1950-2017	1,3	-2,9	-6,4	-8,4	-12,7	-7,6	-3,5	-5,7
	Ср. значение 1950-1980	2,3	-2,7	-6,0	-10,2	-9,0	-6,4	-1,8	-4,8
	Ср. значение 1981-2017	2,0	-2,8	-6,1	-9,7	-9,9	-6,7	-2,2	-5,1
	Разница	1,0	0,1	0,4	-1,8	3,7	1,2	1,7	0,9
	R	0,23	0,24	0,25	-0,05	0,46	0,18	0,56	0,39
Значимость R	-	-	+	-	+	-	+	+	
Умба	Ср. Значение 1950-2017	1,3	-4,4	-8,3	-11,6	-12,6	-7,9	-2,0	-6,5
	Ср. значение 1950-1980	2,2	-3,7	-7,7	-10,8	-10,3	-5,9	-0,6	-5,2
	Ср. значение 1981-2017	1,8	-4,0	-7,9	-11,1	-11,3	-6,8	-1,2	-5,8
	Разница	0,9	0,7	0,7	0,8	2,3	2,1	1,4	1,3
	R	0,14	0,19	0,19	0,15	0,27	0,35	0,36	0,31
Значимость R	-	-	-	-	+	+	+	+	
Янискоски	Ср. Значение 1950-2017	-0,5	-6,8	-11,2	-13,5	-13,5	-8,3	-2,6	-8,1
	Ср. значение 1950-1980	0,7	-6,4	-10,6	-13,2	-12,0	-7,4	-1,4	-7,2
	Ср. значение 1981-2017	0,2	-6,6	-10,8	-13,3	-12,6	-7,8	-1,9	-7,5
	Разница	1,2	0,4	0,7	0,3	1,5	0,9	1,3	0,9
	R	0,22	0,11	0,24	0,05	0,14	0,14	0,39	0,34
Значимость R	-	-	+	-	-	-	+	+	

Приложение 2 Статистические характеристики многолетних рядов наблюдений за ледовым режимом рек

Таблица 1. Статистические характеристики основных элементов ледового режима по опорным гидрологическим постам Двинско-Печорского бассейнового округа.

Река	ГП	Начало ледовых явлений			Первый день ледостава			Максимальная толщина льда (Т)		Продолжительность ледостава, дни		
		Даты 1950-1980	Даты 1981-2018	Δ	Даты 1950-1980	Даты 1981-2018	Δ	T ₁₉₅₀₋₂₀₁₈ , см	R	1950-1980	1981-2018	Δ
Печора	с. Усть-Унья	20 окт	22 окт	1	1 ноя	5 ноя	4	68	-0,1	183	173	-10
	д.Якша	21 окт	23 окт	2	5 ноя	10 ноя	5	69	-0,2	176	168	-8
	с.Троицко-Печорск	20 окт	21 окт	1	7 ноя	11 ноя	4	70	-0,1	174	167	-8
	с.Усть-Щугор	15 окт	17 окт	3	4 ноя	11 ноя	7	85	-0,3	182	171	-11
	с.Усть-Кожва	18 окт	20 окт	2	2 ноя	7 ноя	5	77	-0,2	188	180	-7
	с.Усть-Уса	12 окт	19 окт	6	5 ноя	7 ноя	2	77	-0,1	187	181	-6
	д.Мутный Материк	14 окт	19 окт	5	3 ноя	7 ноя	4	79	-0,6	192	182	-9
	р.п. Щельяюр	17 окт	21 окт	4	1 ноя	4 ноя	3	82	-0,2	192	184	-8
	с.Усть-Цильма	16 окт	21 окт	5	4 ноя	10 ноя	6	75	0,0	189	177	-12
	с.Ермицы	18 окт	21 окт	3	30 окт	2 ноя	3	87	-0,5	199	190	-8
с.Оксино	18 окт	21 окт	3	27 окт	31 окт	4	91	-0,2	203	199	-4	
Оз. Лача	с. Нокола	25 окт	1 ноя	7	3 ноя	9 ноя	6	67	-0,3	182	170	-11
Онега	г. Каргополь	30 окт	4 ноя	5	12 дек	29 дек	1 7	35	-0,5	134	109	-25
	д. Надп. погост	2 ноя	5 ноя	3	11 ноя	18 ноя	7	27	—	159	135	-25
	с. Турчасово	3 ноя	9 ноя	6	14 ноя	22 ноя	8	57	-0,6	164	150	-14
	с. Порог	2 ноя	9 ноя	7	28 окт	5 ноя	8	52	-0,6	184	172	-12
Мезень	д. Макариб	19 окт	23 окт	4	29 окт	5 ноя	7	70	-0,4	186	175	-12
	д. Разгорт	20 окт	23 окт	3	1 ноя	6 ноя	5	65	-0,1	183	173	-10
	с. Большая Пыса	19 окт	24 окт	5	4 ноя	10 ноя	7	69	-0,2	181	167	-13
	с. Койнас	20 окт	24 окт	4	4 ноя	12 ноя	7	68	-0,5	182	170	-12
	д. Малонисогорская	23 окт	23 окт	0	4 ноя	6 ноя	3	76	-0,3	181	174	-7
	с. Дорогорское	25 окт	26 окт	1	8 ноя	11 ноя	2	70	-0,3	179	172	-7

Река	ГП	Начало ледовых явлений			Первый день ледостава			Максимальная толщина льда (Т)		Продолжительность ледостава, дни		
		Даты 1950-1980	Даты 1981-2018	Δ	Даты 1950-1980	Даты 1981-2018	Δ	T ₁₉₅₀₋₂₀₁₈ , см	R	1950-1980	1981-2018	Δ
Вашка	д. Вендинги	21 окт	24 окт	3	5 ноя	14 ноя	9	62	-0,1	177	159	-18
	с. Важгорт	21 окт	23 окт	3	8 ноя	15 ноя	7	63	-0,3	175	162	-12
Ема	д.Новое	31 окт	20 окт	-11	6 ноя	11 ноя	5	43	0,0	210	199	-11
Юг	с.Кичм. Гор.	28 окт	29 окт	0	11 ноя	18 ноя	7	59	-0,3	205	189	-16
Сухона	г.Тотьма	31 окт	7 ноя	7	22 ноя	3 дек	11	51	-0,5	183	157	-26
	д.Каликино	30 окт	6 ноя	7	16 ноя	25 ноя	8	64	-0,3	198	179	-19
	г.Вел. Устюг	29 окт	4 ноя	6	13 ноя	22 ноя	9	70	-0,6	203	183	-21
Северная Двина	г. Котлас	29 окт	3 ноя	4	18 ноя	26 ноя	8	68	-0,4	196	176	-20
	д. Абрамково	28 окт	1 ноя	4	19 ноя	25 ноя	6	70	0,0	197	183	-14
	с. Ниж. Тойма	27 окт	2 ноя	6	15 ноя	22 ноя	6	69	0,1	206	190	-16
	д. Сидор.	27 окт	1 ноя	5	19 ноя	25 ноя	6	72	0,1	200	184	-16
	д. Березник	27 окт	30 окт	3	16 ноя	22 ноя	6	72	-0,1	202	188	-14
	д. Звоз	28 окт	1 ноя	4	11 ноя	20 ноя	9	64	-0,5	215	194	-21
	с. Усть-Пинега	26 окт	23 окт	-3	10 ноя	10 ноя	0	60	-0,2	219	216	-3
Вычегда	с.Помодзино	20 окт	24 окт	4	30 окт	7 ноя	8	67	-0,4	240	222	-18
	с.Малая Кужба	23 окт	25 окт	2	31 окт	9 ноя	8	66	-0,4	240	220	-19
	с.Сторожевск	23 окт	25 окт	2	3 ноя	10 ноя	8	69	-0,2	235	215	-20
	г.Сыктвкар	15 окт	26 окт	12	8 ноя	16 ноя	8	61	-0,7	219	202	-17
	г. Сольвыч.	26 окт	30 окт	4	16 ноя	28 ноя	12	70	-0,5	203	177	-26

Таблица 2. Статистические характеристики основных элементов ледового режима рек Кольского полуострова.

Река	Период	Начало ледовых явлений	Первый день ледостава	Дата окончания ледостава	Продолжительность ледостава
Лота	1950-1980	20 окт	28 окт	8 май	191
	1981-2018	20 окт	30 окт	1 май	182
Кола	1950-1980	26 окт	20 ноя	6 май	167
	1981-2018	27 окт	20 ноя	1 май	162
Воронья	1950-1980	19 окт	9 ноя	15 май	187
	1981-2018	20 окт	9 ноя	11 май	183
Поной	1950-1983	19 окт	3 ноя	15 май	193
	1980-2018	19 окт	3 ноя	8 май	186
Варзуга	1950-1980	20 окт	11 ноя	11 май	181
	1981-2018	21 окт	12 ноя	5 май	174
Умба	1950-1980	10 окт	2 ноя	13 май	192
	1981-2018	11 окт	4 ноя	8 май	185

Таблица 3. Статистические характеристики высшего уровня ледохода и его связи с высшими предледоходными уровнями на опорных гидрологических постах

Река	ГП	Высший предледоходный уровень воды			Высший ледоходный уровень воды			Связь высших предледоходных и ледоходных уровней воды R
		Норма	σ	Cs	Норма	σ	Cs	
Печора	с. Усть-Унья	240	59	0,82	357	96	0,36	0,36
	д. Якша	199	67	0,61	439	119	0,39	0,28
	с. Троицко-Печорск	254	79	0,92	513	112	0,32	0,25
	с. Усть-Щугор	417	146	1,17	768	140	0,32	0,35
	с. Усть-Кожва	359	105	0,84	650	124	0,31	0,12
	с. Усть-Уса	585	116	0,24	979	136	0,15	-0,06
	д. Мутный Материк	550	139	0,10	878	150	0,07	-0,02
	р.п. Щельяюр	638	123	-0,04	936	146	0,15	0,35
	с. Усть-Цильма	614	138	0,03	877	125	-0,11	0,31
	с. Ермицы	722	143	0,27	939	102	-0,31	0,40
Онега	с. Оксина	538	97	0,63	686	91	-0,07	0,59
	г. Каргополь	69	23	3,24	165	42	0,57	0,48
	д. Надпорожский погост	301	22	0,39	419	72	1,69	0,22

	с. Турчасово	525	127	0,03	647	153	0,11	0,81
	с. Порог	184	65	0,22	299	85	0,33	0,58
Мезень	д. Макариб	304	86	1,00	530	123	0,34	0,02
	д. Разгорт	430	51	0,13	511	77	0,58	0,48
	с. Большая Пыса	215	63	0,40	367	75	0,39	0,56
	с. Койнас	144	40	1,14	282	52	0,29	0,36
	д. Малонисогорская	399	71	0,63	582	60	- 0,04	0,37
	с. Дорогорское	427	73	0,25	669	84	0,09	0,19
Вашка	д. Вендинги	288	57	0,09	365	64	- 0,01	0,59
	с. Важгорт	280	51	-0,21	403	52	- 0,01	0,34
Ема	д. Новое	179	48	0,04	219	47	- 0,20	0,38
Юг	с. Кичм. Гор.	278	86	1,11	465	122	0,56	0,48
Сухона	г. Тотьма	357	107	-0,16	484	123	0,03	0,65
	д. Каликино	341	133	1,25	610	159	0,43	0,61
	г. Вел. Устюг	302	86	-0,02	606	152	0,59	0,28
Северная Двина	г. Котлас	262	87	0,19	485	103	0,19	0,53
	д. Абрамково	371	108	0,40	576	121	0,16	0,59
	с. Ниж. Тойма	304	114	0,55	554	124	0,17	0,44
	д. Сидор.	410	136	0,75	585	136	0,13	0,65
	д. Березник	401	186	0,84	730	168	0,01	0,56
	д. Звоз	559	163	0,72	916	198	0,14	0,66
Вычегда	с. Усть-Пинега	253	145	0,63	615	150	0,15	0,53
	с. Помодзино	341	157	0,51	331	136	0,43	0,62
	с. Малая Кужба	312	64	0,16	417	72	0,11	0,70
	с. Сторожевск	221	66	1,06	379	70	0,14	0,33
	г. Сыктвкар	131	98	1,65	332	83	0,05	0,19
	г. Сольвычегодск	219	149	0,23	494	107	- 0,32	0,39
Лота	5 км от устья	222	99	2,59	303	152	2,43	0,87
Кола	Исток р. Кола	153	40	-0,78	157	48	- 0,45	0,85
	Кировский ж.д. мост	97	44	0,49	158	75	0,83	0,56
	г. Кола	85	39	0,74	197	71	0,86	-0,03
Воронья	исток. р. Воронья	122	31	-0,15	163	34	- 0,30	0,47
	пог. Воронинский	277	44	-0,69	318	73	0,52	0,84
	стан. Голицино	222	123	0,63	688	194	0,24	0,39
Поной	с. Краснощелье	366	67	-0,41	409	76	- 0,55	0,73
	пог. Каневка	396	75	0,19	446	88	0,15	0,34

Приложение 3. Потенциальные риски опасных гидрологических явлений, рассчитанные по предложенной в настоящей работе формуле.

Таблица 1. Значения уровня однопроцентной обеспеченности и потенциальные риски опасного гидрологического явления, вызванного уровнем воды за период весеннего ледохода

ГП	Затопление поймы, см над нулем поста	$H_{лдх1\%, см}$	Вероятность затопления поймы, %	Потенциальный риск
г. Котлас	550	722	29	17
д. Абрамково	250	847	100	0
с. Нижняя Тойма	700	851	11	16
д. Сидоровская	600	872	52	15
р.п. Березник	750	1095	52	15
д. Звоз	700	1320	91	4
с. Усть-Пинега	800	1043	11	21
г. Тотьма	850	750	0	0
д. Каликино	900	1015	6	11
г. Великий Устюг	700	1016	28	22
д. Турчасово	600	981	55	17
д. Порог	350	494	26	22
д. Новое	250	310	29	14
с. Помоздино	410	671	20	31
г. Сыктывкар	460	479	11	4
г. Сольвычегодск	530	700	37	15
д. Разгорт	650	703	5	7
с. Большая Пысса	400	585	29	22
с. Койнас	250	401	75	9
д. Малонисогорская	660	715	10	7
с. Дорогорское	560	830	90	3
д. Вендинга	260	490	87	6
д. Важгорт	450	515	15	11
с. Усть-Унья	400	542	36	17
с. Усть-Щугор	807	1312	20	31
с. Усть-Кожва	509	980	71	14
с. Усть-Уса	600	1204	99	1
с. Усть-Цильма	700	1157	93	3
с. Ермицы	700	1148	99	1
с. Оксино	500	901	96	2
с. Кичменгский Городок	619	769	5	19
ст. Голицыно	410	1026	75	15
с. Каневка	466	648	42	16
с. Поной	1128	1345	15	14

Таблица 2. Значения длительности переходного периода однопроцентной обеспеченности и потенциальные риски опасного гидрологического явления, вызванного превышением неблагоприятного уровня

ГП	Неблагоприятная продолжительность переходного периода	Продолжительность переходного периода однопроцентной обеспеченности	Вероятность превышения неблагоприятного уровня	Потенциальный риск
г. Каргополь	30	51	8	38
д. Надпорожский погост	30	125	72	22
с. Турчасово	30	55	6	43
с. Порог	30	72	12	52
с. Усть-Унья	30	44	7	29
д. Якша	30	47	12	32
с. Троицко-Печорск	30	52	18	35
с. Усть-Щугор	30	56	22	36
с. Усть-Кожва	30	48	7	35
с. Усть-Уса	30	56	16	39
д. Мутный Материк	30	51	10	37
р.п. Щельяюр	30	46	7	32
с. Усть-Цильма	30	46	9	32
с. Ермицы	30	45	6	31
с. Оксино	30	37	5	18
д. Макариб	30	42	3	28
д. Разгорт	30	40	5	24
с. Большая Пыса	30	48	12	33
с. Койнас	30	55	10	41
д. Малонисогорская	30	48	9	34
с. Дорогорское	30	55	16	38
д. Вендинги	30	48	6	35
с. Важгорт	30	63	11	47
г. Тотьма	30	84	26	47
д. Каликино	30	70	12	50
г. Великий Устюг	30	59	16	41

ГП	Неблагоприятная продолжительность переходного периода	Продолжительность переходного периода однопроцентной обеспеченности	Вероятность превышения неблагоприятного уровня	Потенциальный риск
д. Кичменский городок	30	59	17	41
г. Котлас	30	72	26	43
д. Абрамково	30	61	23	39
с. Нижняя Тойма	30	54	20	36
д. Сидоровская	30	59	26	36
д. Березник	30	61	22	40
д. Звоз	30	52	14	36
с. Усть-Пинега	30	66	23	42
д. Пузла	30	79	18	51
с. Помодзино	30	46	11	31
д. Малая Кужба	30	41	5	26
с. Сторожевск	30	46	11	31
г. Сыктывкар	30	54	17	37
с. Федяково	30	65	20	43
г. Сольвычегодск	30	86	29	46
Кола исток	30	106	48	37
Кировский ж. д. мост	30	54	3	43
г. Кола	30	77	63	23
с. Краснощелье	30	41	4	26
с. Каневка	30	79	14	53

Приложение 4. Копии свидетельств о регистрации прав интеллектуальной собственности на разработанные в рамках данной работы базы данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU

2019621036

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ

Номер регистрации (свидетельства): 2019621036	Авторы: Горошкова Наталья Ивановна (RU), Георгиевский Михаил Владимирович (RU), Георгиевский Дмитрий Владимирович (RU), Сумачев Александр Эдуардович (RU), Стриженок Анастасия Владимировна (RU)
Дата регистрации: 18.06.2019	
Номер и дата поступления заявки: 2019620930 03.06.2019	
Дата публикации: 18.06.2019	Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт» (RU)

Название базы данных:

«Многолетние данные по характерным уровням и расходам воды, максимальным и минимальным ежемесячным уровням и максимальной толщине льда рек бассейна Северной Двины до г. Котласа»

Реферат:

База данных включает в себя многолетние данные: по характерным уровням и расходам воды, максимальным и минимальным ежемесячным уровням и максимальной толщине льда по семи гидрологическим постам наблюдательной сети Росгидромета на реках бассейна Северной Двины до г. Котласа с 1950 по 2016 гг. В нее входят реки: Сев. Двина - д. Медведки, Сев. Двина - г. Котлас, Сухона - г. Тотыма, Сухона - д. Каликино, Сухона - г. Великий Устюг, Ема - д. Новое, Юг - Кичменгский Городок. Предполагается пополнение базы по мере накопления входящих в нее гидрологических характеристик. Предназначена для решения широкого круга задач в области гидрологии, экологии, водного хозяйства, охраны вод, строительного проектирования и др. Многолетние данные включают в себя следующие характеристики: 1. Характерные уровни (м БС над «0» поста) и расходы воды (m^3/c): Максимальный уровень в начале ледостава и дата его наблюдения; Максимальный уровень весеннего ледохода (дата и характеристика ледового явления); Минимальный уровень в период открытого русла и дата, когда он наблюдался; Минимальный уровень зимнего периода, дата, когда он наблюдался, и характеристика ледового явления); Максимальные расходы весеннего половодья (дата и характеристика ледового явления); Максимальный годовой расход (дата и характеристика ледового явления); Минимальный расход в период открытого русла и дата, когда он наблюдался; Минимальный расход зимнего периода, дата, когда он наблюдался, и характеристика ледового явления). 2. Максимальным и минимальным ежемесячные уровни за гидрологический год: Максимальные ежемесячные уровни воды и продолжительность их стояния; Минимальные ежемесячные уровни вод и продолжительность их стояния. 3. Максимальная толщина льда: Максимальная толщина ледяного покрова с датой его наблюдения.

Вид и версия системы управления базой данных: Excel

Объем базы данных: 722 Кб



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ

Номер регистрации (свидетельства): 2021621902 Дата регистрации: 07.09.2021 Номер и дата поступления заявки: 2021621776 30.08.2021 Дата публикации: 07.09.2021 Контактные реквизиты: +7-9216233489, a- sumachev@mail.ru	Авторы: Сумачев Александр Эдуардович (RU), Банщикова Любовь Святославовна (RU) Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный Гидрологический Институт» (RU)
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Название базы данных:
«Характеристики ледового режима рек Двинско-Печорского бассейнового округа»

Реферат:

В базе данных приведены расчётные характеристики ледового и уровненного режима рек Двинско-Печорского бассейнового округа, позволяющие оценить опасность ледовых наводнений, закономерности пространственно-временного распределения основных характеристик ледового режима за многолетний период с 1950-2018 годы. База включает в себя следующие характеристики ледового режима за осенне-зимний период: даты образования устойчивых ледовых явлений, даты прохождения высшего уровня воды осеннего ледохода, даты установления ледостава и высшего уровня в начале ледостава, высшего уровня за весь период ледостава, даты окончания ледостава. За весенний период рассматриваются следующие характеристики: высшие предледоходные и ледоходные уровни, даты очищения реки ото льда. Приведены результаты научного анализа многолетних изменений максимальной толщины льда и повторяемости заторов и зажоров льда. Многолетние данные о ледовом режиме рек Печора, Мезень, Вашка, Онега. База данных предназначена для анализа данных о ледовом режиме, оценки его динамики, вычисления повторяемости опасных гидрологических явлений и обеспеченных значений уровней воды. Тип ЭВМ: ПК на базе процессора Intel. ОС: Windows 7/8/10.

Вид и версия системы управления базой данных: Excel

Объем базы данных: 450 КБ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(12) ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ БАЗЫ ДАННЫХ

Номер регистрации (свидетельства): 2021621912	Авторы: Сумачев Александр Эдуардович (RU), Банщикова Любовь Святославовна (RU)
Дата регистрации: 09.09.2021	Правообладатель: ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ "ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ" (RU)
Номер и дата поступления заявки: 2021621808 31.08.2021	
Дата публикации: 09.09.2021	
Контактные реквизиты: +7-9216233489, a- sumachev@mail.ru	

Название базы данных:

«Характеристики ледового режима рек Кольского полуострова»

Реферат:

В базе данных (БД) приведены расчётные характеристики ледового и уровненного режима рек Кольского полуострова, позволяющие оценить опасность ледовых наводнений, закономерности пространственно-временного распределения основных характеристик ледового режима за многолетний период с 1950 по 2018 гг. БД включает в себя следующие характеристики ледового режима за осенне-зимний период: даты образования устойчивых ледовых явлений, даты прохождения высшего уровня воды осеннего ледохода, даты установления ледостава и высшего уровня в начале ледостава, высшего уровня за весь период ледостава, даты окончания ледостава. За весенний период рассматриваются следующие характеристики: высшие предледоходные и ледоходные уровни, даты очищения реки ото льда. Приведены результаты научного анализа многолетних изменений максимальной толщины льда и повторяемости заторов и зажоров льда. Многолетние данные о ледовом режиме рек Кольского полуострова приведены для рек Лота, Кола, Воронья, Поной, Варзуга. БД предназначена для анализа данных о ледовом режиме, оценки его динамики, вычисления повторяемости опасных гидрологических явлений и обеспеченных значений уровней воды. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК на базе процессора Intel; ОС: Windows 7/8/10.

Вид и версия системы управления базой данных: MS Excel

Объем базы данных: 295 КБ

Приложение 5. Копии свидетельств о присуждении премий правительства Санкт-Петербурга



ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ

191144, Санкт-Петербург, Новгородская ул., д. 20, литера А, тел. (812) 576-7160, факс (812) 576-7704
E-mail: kavsh@gov.spb.ru, http://www.gov.spb.ru

В соответствии с распоряжением
Комитета по науке и высшей школе
от 03.12.2020 № 255 «О присуждении в 2020 году премий
Правительства Санкт-Петербурга победителям конкурса грантов
для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга,
аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов,
расположенных на территории Санкт-Петербурга»

Сумачев Александр Эдуардович

ФГБУ «Государственный гидрологический институт»

является победителем конкурса грантов для студентов вузов,
расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов,
отраслевых и академических институтов, расположенных
на территории Санкт-Петербурга, 2020 года

категория: аспирант

тема проекта:

«Разработка методики прогнозирования максимального ледоходного уровня
на примере реки Печоры»

Председатель Комитета
по науке и высшей школе

А.С. Максимов



**ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ВЫСШЕЙ ШКОЛЕ**

191144, Санкт-Петербург, Новгородская ул., д. 20, литера А, тел. (812) 576-7160, факс (812) 576-7704
E-mail: knvsh@gov.spb.ru, <http://www.gov.spb.ru>

**В соответствии с распоряжением
Комитета по науке и высшей школе
от 05.10.2021 № 200 «О присуждении в 2021 году премий
Правительства Санкт-Петербурга победителям конкурса грантов
для студентов вузов, расположенных на территории Санкт-Петербурга,
аспирантов вузов, отраслевых и академических институтов,
расположенных на территории Санкт-Петербурга»**

Сумачев Александр Эдуардович

**Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный
гидрологический институт»**

**является победителем конкурса грантов для студентов вузов,
расположенных на территории Санкт-Петербурга, аспирантов вузов,
отраслевых и академических институтов, расположенных
на территории Санкт-Петербурга, 2021 года**

категория: Аспирант

тема проекта:

**Совершенствование методов прогнозирования характеристик ледового
режима рек бассейнов Белого и Баренцева морей**

**Председатель Комитета
по науке и высшей школе**

А.С. Максимов