

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 суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Государственный гидрологический институт»

Научный руководитель: Банщикова Любовь Святославовна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом научно-технической информации

Официальные оппоненты:

Калинин Виталий Германович, доктор географических наук, доцент, заведующий кафедрой гидрологии и охраны водных ресурсов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Гайдукова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной гидрологии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Ведущая организация: Национальный исследовательский университет «Московский государственный строительный университет» (НИУ «МГСУ»), г. Москва

Защита диссертации состоится «01» декабря 2022 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.1.039.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ФГБУН Институте водных и экологических проблем СО РАН по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Института водных и экологических проблем СО РАН и на сайте www.iwep.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим высылать по адресу: 656038, г. Барнаул, ул. Молодёжная, 1, Диссертационный совет, факс (385-2) 24-03-96, e-mail: iwep@iwep.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
доктор географических наук, доцент



И.Д. Рыбкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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, разработанные и зарегистрированные базы данных содержат 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности темы исследования, определены цели и задачи, приведены защищаемые положения, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации результатов работы, описана структура работы.

В **первой главе «Исследуемый регион и состояние изученности проблемы»** дана физико-географическая характеристика и гидрологическая изученность исследуемого региона, произведен анализ литературных источников.

В **разделе 1.1 «Физико-географическое описание исследуемого региона»** рассмотрены физико-географические характеристики изучаемой области и рек региона.

В **разделе 1.2 «Гидрологическая изученность исследуемого региона»** представлен обзор гидрологической сети исследуемого региона. Всего на исследуемой территории на 2019–2020 год действовало 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. Отмечается, что, с одной стороны, количественный состав действующей наблюдательной сети Росгидромета сокращается, с другой стороны, происходит модернизация и техническое переоснащение. В этом отношении территория Европейского Севера Российской Федерации находится в более выгодном положении. Так, на территории Мурманской области по данным Обзора состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2020 год, выполненного в ФГБУ «АНИИ», установлено 20 автоматизированных гидрологических комплексов (АГК), что составляет 65 % от общего количества АГК в пределах Арктической зоны Российской Федерации. Качество и состав наблюдений, производимых в пределах Двинско-Печорского бассейнового округа Северного УГМС, находится на высоком уровне. Консервация и сокращение, в том числе и фактически работающей, наблюдательной сети Мурманского УГМС привело к значительным пропускам в многолетних рядах наблюдений.

В разделе 1.3 «Состояние изученности проблемы» выполнен обзор научных публикаций, посвященных описанию ледового режима рек и прогнозированию его элементов. Рассмотрены методы прогнозирования этих явлений в историческом аспекте. Проанализированы работы, в которых рассматриваются методики оценки потенциальных рисков опасных гидрологических явлений.

Вторая глава «Климатическая характеристика изучаемого региона» посвящена описанию многолетних колебаний температуры воздуха за холодный сезон. Разделение всего периода наблюдений 1950—2018 гг. выполнено с учетом нарушения стационарности рядов. Таким образом, базовый период выбран с 1950 по 1980 год, контрольный с 1981 по 2018 год. Со ссылкой на Второй оценочный доклад Росгидромета приводится прогноз возможных климатических изменений до конца века согласно различным климатическим сценариям.

Средняя температура воздуха в исследуемом регионе за холодный сезон составила на территории Двинско-Печорского бассейнового округа — 7,3 °С, в пределах Кольского полуострова — 5,9 °С. Пространственное распределение температур воздуха в пределах Двинско-Печорского бассейнового округа подчиняется широтной закономерности. Континентальный эффект наиболее заметен в юго-восточной части Двинско-Печорского бассейнового округа, для Кольского полуострова же характерно обратное пространственное распределение температуры воздуха — наиболее высокие температуры отмечаются вдоль побережья Баренцева моря.

Увеличение температуры воздуха по месяцам выражено неравномерно — наиболее заметно оно в весенние месяцы. Так, именно за март–апрель на большинстве метеостанций выявлены статистически значимые линейные тренды к увеличению среднемесячной температуры воздуха. Тенденции к

увеличению средней за холодный сезон температуры воздуха наблюдаются повсеместно. В среднем увеличение температуры воздуха за холодный сезон по отношению к базовому периоду составило $1,1^{\circ}\text{C}$, при этом в будущем, согласно оценкам Росгидромета, данная тенденция не только сохранится, но и усилится. Так, по данным Второго оценочного доклада Росгидромета к 2030 году температура воздуха увеличится на 2°C [Второй оценочный доклад..., 2014].

Третья глава «Особенности ледового режима рек бассейнов Белого и Баренцева морей в условиях современного климата» посвящена описанию ледового режима бассейнов Белого и Баренцева морей по основным его фазам: замерзания, ледостава и вскрытия. Разбиение периода наблюдений на базовый и контрольный выполнено аналогично климатическим, то есть базовый период 1950—1980 гг., контрольный 1981—2018 гг.

В разделе 3.1 «Ледовый режим рек в период замерзания» рассмотрен ледовый режим и его изменения в период замерзания. Отмечается статистически значимое смещение сроков образования первичных ледовых явлений (заберегов, шугоходов и т. д.) на всех реках исследуемого региона, кроме Кольского полуострова. При этом на многих постах также наблюдается статистически значимое снижение уровней воды, что связано с перераспределением стока внутри года, подтвержденным на примере Северной Двины и ее притоков [Сумачев, 2018]. Средние за 1950—2018 гг. сроки образования первичных ледовых образований приходятся на конец второй, третью декаду октября, на некоторых гидрологических постах — на первую декаду ноября. Повторяемость зажоров льда не претерпела значительных изменений. Статистически значимо увеличилась продолжительность периода от появления первичных ледовых явлений до образования устойчивого ледостава (далее — осенний переходный период). Наиболее распространенными ледовыми явлениями в данный период являются забереги и ледоходы различной интенсивности. Увеличение осеннего переходного периода негативно сказывается на транспортной доступности отдельных сел, так как в условиях, когда осенний ледоход может длиться более месяца, отсутствует навигация и возможность организации ледовых переправ. Изменение сроков появления первичных ледовых явлений произошло крайне неравномерно по территории: более заметные изменения наблюдаются в местах самого раннего ледообразования, что, в конечном счете, привело к выравниванию появления первичных ледовых образований по длине рек. Среднее изменение сроков образования первичных ледовых явлений составляет порядка 5 дней (от 2 до 13 дней). На реках Кольского полуострова статистически значимого смещения сроков появления первичных ледовых образований и увеличения длительности переходного периода не выявлено. Это объясняется переохлаждением озерной части озерно-речных систем даже при небольших отрицательных

температурах с последующим образованием шуги, которая, смерзаясь, образует устойчивый ледостав [Банщикова, Сумачев, 2021].

В разделе 3.2 «Ледовый режим в период ледостава» дано описание ледового режима и его изменений в период ледостава. Отмечается, что средние сроки образования устойчивого ледостава довольно сильно меняются по территории, но в среднем за ноябрь образуется устойчивый ледостав. На некоторых гидрологических постах с большими уклонами водной поверхности и порогами ледостав может не образовываться вовсе, что все чаще отмечается в верхнем течении реки Онеги. За этим исключением, реки замерзают достаточно дружно от устья к истоку. В случае, когда реки вытекают из озера, замерзание происходит с верховьев, затем с разницей в несколько дней, иногда недель, замерзает северная часть реки и, наконец, среднее течение. Ледовый режим реки Мезени значительно отличается от остальных рек, рассмотренных в работе. Она замерзает в обратном порядке от истока к устью, что в целом не свойственно рекам, текущим с юга на север. Подобная аномалия объясняется сильным влиянием сгонно-нагонных факторов в устьевой области и нижнем течении и сильной заболоченностью верхнего течения.

Смещение сроков образования устойчивого ледостава произошло неравномерно по длине рек, с той же закономерностью, что и для образования первичных ледовых явлений. Реки Кольского полуострова в силу горного рельефа местности, в отличие от рек Северного края, замерзают не постепенно по мере накопления отрицательных сумм температур воздуха, а после понижения температуры воздуха до критических значений, приводящим к смерзанию шуги и отдельных льдин. Точные значения температуры воздуха для образования устойчивого ледостава зависят от гидрологических условий протекания процессов замерзания. Анализ суточных значений температуры воздуха и дат образования устойчивого ледостава в селе Краснощелье на реке Поной показал, что критические значения среднесуточной температуры воздуха находятся в диапазоне от -5 до -10 °C. Сумма отрицательных температур к этому дню варьируется в широких пределах и зависит в первую очередь от даты перехода температуры воздуха через критическую отметку. Анализ дат устойчивого перехода температуры воздуха через 0 °C не претерпел значительных изменений [Банщикова, Сумачев, 2021].

За период ледостава были проанализированы высшие уровни воды в начальный период ледостава и за весь ледостав. Установлено, что для верховьев рек уровень воды в начале ледостава является высшим за весь его период, а с увеличением площади водосбора даты формирования высшего уровня воды за период ледостава смещаются к началу весенней деградации и разрушению ледового покрова. Для высших уровней воды за период ледостава ярко выраженные тренды отсутствуют. В период от появления первичных ледовых явлений до разрушения устойчивого ледостава пространственная статистическая связанность в датах и уровнях воды

остаётся достаточно высокой по всей территории исследуемого региона, что свидетельствует о высокой значимости климатических факторов.

Для максимальных толщин льда не характерна пространственная связанность, что объясняется доминирующим влиянием локальных факторов в местах измерения. Тем не менее, под воздействием увеличения температуры воздуха за холодный сезон повсеместно наблюдается статистически значимое уменьшение максимальной толщины льда. В среднем по региону уменьшение максимальной толщины льда по отношению к показателю базового периода составило 5—10 сантиметров, в отдельных пунктах наблюдений отмечается уменьшение на 20—30 сантиметров. В настоящее время ежегодно проводится комплекс мероприятий, направленных на ослабление прочности ледового покрова за счет его физического разрушения или ослабления в ключевых местах. Имея это в виду, можно сделать вывод, что максимальная толщина льда перестает являться характеристикой прочности ледового покрова к моменту вскрытия, а использование толщины льда в качестве предиктора при прогнозировании высшего уровня воды за период весеннего ледохода является нецелесообразным.

Общая продолжительность ледостава снизилась статистически значимо. По данным 1950—2018 гг. в среднем продолжительность ледостава составляет около 170 дней, сокращение продолжительности ледостава по сравнению с базовым периодом оценено в две недели в пределах Северного края, в одну неделю — в пределах Кольского полуострова.

В разделе 3.3 «Ледовый режим в период вскрытия» описан ледовый режим и его изменения в период вскрытия. Отмечается, что несмотря на то, что реки исследуемого региона относятся к третьему типу вскрытия, для которого характерно разрушение ледового покрова в основном под влиянием динамического воздействия водного потока, в настоящее время все большую роль начинает играть фактор теплового воздействия на ледовый режим. Это подтверждается увеличением периода от начала деградации ледового покрова до его полного разрушения и начала весеннего ледохода.

Эмпирические распределения высших уровней воды за период весеннего ледохода при отсутствии заторных явлений соответствуют нормальному закону распределения, для заторных участков рек характерна ярко выраженная положительная асимметрия.

Анализ хронологического хода высших уровней воды за период весеннего ледохода показал статистически незначимые тренды к снижению. Средняя продолжительность всех ледовых явлений, повторяя пространственное распределение температуры воздуха, имеет статистически значимые тренды к снижению и составляет в среднем 150 — 230 дней.

В разделе 3.4 «Влияние изменений климата на ледовый режим и долгосрочный прогноз характеристик ледового режима» оценено влияние изменения температуры воздуха на сроки формирования фаз ледового режима. Надежные уравнения получены для изменения сроков образования

первичных ледовых явлений в зависимости от изменения среднемесячной температуры воздуха за октябрь и для изменения сроков начала разрушения ледового покрова в зависимости от изменения среднемесячной температуры воздуха за март. Для этого за 2 климатических периода рассчитаны средние температуры воздуха октября и средние даты образования ледовых явлений. Рассчитав разницы дат и средних за октябрь температур воздуха, можно заключить, что при гипотетическом повышении средней за холодный период температуры воздуха еще на 2 °С сроки появления устойчивых ледовых образований сместятся на 7 дней. Изменение сроков разрушения ледового покрова рассчитано в зависимости от среднемесячной температуры марта, предшествующей разрушению ледового покрова. Изменение среднемесячной температуры воздуха за март на 2 °С приведет к смещению сроков разрушения ледового покрова на 7 дней.

В разделе 3.5 «Классификация участков рек по степени стохастичности формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода» на основе методов кластерного анализа разработана многофакторная классификация участков рек в зависимости от условий формирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода. Большой вес в данной классификации имеет связь высшего уровня воды за период весеннего ледохода с предшествующими, предледоходными уровнями воды. В предложенной классификации исследуемые участки рек разделены на три типа в зависимости от парного коэффициента корреляции высших уровней воды за период весеннего ледохода и в предледоходный период, а также географических признаков.

Первый тип участков рек характеризуется низким влиянием стохастических факторов на ледовый режим, что определяет высокую связанность уровней воды в пределах одного гидрологического поста, а в случае однородности условий формирования высших уровней воды за период весеннего ледохода и по территории, что характерно для рек Кольского полуострова. К данному типу относятся сильно зарегулированные реки и некоторые бесприточные участки рек. Половодье на реках и участках рек, отнесенных к первому типу, развивается детерминировано и не зависит от ситуации на всем водосборе. Примерами данного типа рек могут послужить практически все реки Кольского полуострова, а также Онега, отдельные участки других рек, которым свойственно озерное регулирование. На данных реках наблюдаются высокие коэффициенты корреляции между высшими предледоходными и ледоходными уровнями воды. Для участков рек, относящихся к первому типу, возможно использование методик, основанных на связи высшего уровня воды за период весеннего ледохода и высшего предледоходного уровня воды, который, как правило, может быть приурочен к одному из ледовых явлений, предшествующих ледоходу.

Ко второму типу относятся крупные незарегулированные реки со множеством притоков, которые способны значительным образом повлиять на ледовый режим и характер вскрытия. Данное влияние является случайным, а

значит природа формирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода во многом носит стохастичный характер. Для участков рек, относящихся ко второму типу, за редким исключением, невозможно найти надежных предикторов в пределах одного гидрологического поста, что обуславливает необходимость разработки прогностических методик на основе соответственных уровней воды с добавлением второстепенных предикторов.

К промежуточному, третьему, типу относятся предустьевые участки рек, где повсеместно наблюдается значительно меньшая амплитуда колебаний уровней и более высокие парные коэффициенты корреляции с высшими предледоходными уровнями, а волна половодья имеет распластанный вид. Особенностью данных участков является достаточно инерционный характер нарастания уровня, однако неоднородный характер притока воды с вышележащих участков реки приводит к необходимости его учета. 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 створов.

Таким образом, комплексный анализ гидрометеорологических данных, произведенный в третьей главе, позволил установить влияние изменений климата на ледовый режим, которое заключается в статистически значимом уменьшении длительности ледостава за счет смещения сроков замерзания и вскрытия в пределах Двинско-Печорского бассейнового округа и за счет сроков вскрытия в пределах Кольского полуострова, а также уменьшении максимальной толщины льда и сокращении длительности периода со всеми ледовыми явлениями. Разработана классификация участков рек в зависимости от условий формирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода, которая может применяться при разработке прогностических методик высшего уровня воды за период весеннего ледохода.

В четвертой главе «Повторяемость и риски опасных ледовых явлений» отмечается, что точная оценка повторяемости заторов и зажоров льда в настоящее время является затруднительной в силу неоднородности исходной информации.

Для оценки потенциальных рисков опасных гидрологических явлений заданной обеспеченности предложена формула (1):

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

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 (что может быть выражено в процентах), предназначена для расчета и сравнения потенциальных рисков различных опасных гидрометеорологических событий.

Потенциальные риски были рассчитаны для величины высшего уровня воды за период весеннего ледохода и длительности переходного периода, когда невозможна организация паромных и ледовых переправ. Значения потенциального риска высшего уровня за период весеннего ледохода однопроцентной обеспеченности, рассчитанные по формуле (1), имеют разброс от 0 до 31 %. Наибольшим расчетным потенциальным риском характеризуются с. Усть-Щугор, с. Помодзино, г. Великий Устюг, с. Большая Пысса, д. Порог и с. Усть-Пинега. При этом можно отметить, что фактический риск наибольший для г. Великий Устюг, так как отметка затопления города начинается при гораздо меньших уровнях, чем затопление поймы, что было учтено в работе.

Потенциальный риск продолжительности переходного периода однопроцентной обеспеченности находится в пределах от 1 до 54 %, медиана равна 6 %. Наибольшим риском характеризуются д. Надпорожский Погост на реке Онеге, а также г. Кола и г. п. Исток на реке Коле. Среднее значение продолжительности переходного периода однопроцентной обеспеченности составляет 59 дней, минимум — 39 дней, максимум — 125 дней в д. Надпорожский погост, средняя повторяемость превышения продолжительности переходного периода 30 дней составляет 16 %.

Таким образом, оценка потенциальных рисков опасных гидрологических явлений с использованием разработанной в настоящей работе методики позволяет выявить наиболее уязвимые участки рек и пойм к воздействию различных опасных гидрологических явлений, где целесообразна разработка прогностических методик для безопасного использования этих участков как при эксплуатации уже существующих зданий, сооружений и объектов инфраструктуры, так и при проектировании новых.

Пятая глава «Особенности прогнозирования элементов ледового режима рек различных типов, разработка и верификация нейросетевых моделей прогнозирования».

В разделе 5.1 «Особенности прогнозирования сроков формирования фаз ледового режима» приводятся методики прогнозирования сроков формирования фаз ледового режима для различных рек. В частности, рассмотрена методика прогнозирования даты образования устойчивого ледостава на реке Онеге близ села Порог в зависимости от сроков образования устойчивого ледостава на озере Лача. Средняя заблаговременность прогнозирования по данной методике равна 19 дням,

стандартная ошибка прогнозирования — 13 дням; S/σ_{Δ} — 0,68, что соответствует требованиям Гидрометцентра России.

В разделе 5.2 «Используемые подходы к прогнозированию высшего уровня воды за период весеннего ледохода и критерии оценки качества выпускаемых прогнозов» отмечается, что при прогнозировании элементов ледового режима, в частности высшего уровня воды за период весеннего ледохода, чаще всего используются эмпирические методики, которые могут быть реализованы в виде регрессионных уравнений или обученных нейросетевых моделей. При этом к вновь разрабатываемым методикам можно предъявить ряд обязательных требований, обусловленных современным развитием гидрологической сети и уже используемыми методиками:

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

При оценке качества выпускаемых прогнозов целесообразно использовать методы, предложенные в Гидрометцентре России.

В разделе 5.3 «Особенности прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода на реках первого типа» для участков рек, относящихся к первому типу, была разработана единая стандартизованная формула (2) 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:

$$H_x^{\text{лдж}} = 0,64H_x^{\text{вышш.прдлдж.}} * \sigma_x^{\text{лдж}} + m_x^{\text{лдж}}, \quad (2)$$

где $H_x^{\text{лдж}}$ — высший уровень за период ледохода в пункте x , $H_x^{\text{вышш.прдлдж.}}$ — стандартизованный высший предледоходный уровень в пункте x , $\sigma_x^{\text{лдж}}$ — стандартное отклонение высшего ледоходного уровня в пункте x , $m_x^{\text{лдж}}$ — среднее значение высшего ледоходного уровня в пункте x .

Верификация разработанной методики произведена на независимом материале. Качество выпускаемых прогнозов, согласно методике Гидрометцентра, является удовлетворительным (табл. 1).

Таблица 1.

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

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

Без изменения весовых коэффициентов данная методика была также 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.

Оценка качества выпускаемых прогнозов показала эффективность предложенной методики. Улучшение качества прогнозов при использовании других стохастических 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 характеристик ледового режима на участках рек, отнесенных к первому типу.

В разделе 5.4 «Особенности прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода на реках второго и третьего типа» отмечается, что для участков рек, относящихся ко второму типу, необходима разработка методик прогнозирования на основе соответственных уровней с добавлением второстепенных предикторов.

Для реки Печоры могут быть использованы высшие уровни вышележащих постов при условии достаточной заблаговременности. Использование данных по притокам реки Печоры нецелесообразно из-за, как правило, более позднего формирования на них ледохода. Методом регрессионного анализа выявлены прогностические зависимости для д. Мутный Материк в зависимости от высшего уровня ледохода в р. п. Щельяюр ($\tau_{\text{ср}} = 2$ дня, $S/\sigma_{\text{Нср}} = 0,60$), для р. п. Щельяюр в зависимости от высшего уровня ледохода на реке Цильма в с. Трусово и высшего предледоходного уровня воды на посту Щельяюр ($\tau_{\text{ср}} = 6$ дней, $S/\sigma_{\text{Нср}} = 0,70$), для с. Усть-Цильма в зависимости от высшего уровня ледохода на реке Ижме в с. Трусово и разницы в толщинах льда в с. Усть-Цильма и р. п. Щельяюр ($\tau_{\text{ср}} = 8$ дней, $S/\sigma_{\text{Нср}} = 0,71$) и с. Оксино в зависимости от высшего уровня ледохода в с. Ермицы и высшего предледоходного уровня воды на посту в с. Оксино ($\tau_{\text{ср}} = 4$ дня, $S/\sigma_{\text{Нср}} = 0,52$).

Для Северной Двины в работе разработана методика прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в городе Котлас в зависимости от низшего уровня воды в городе Котлас за октябрь—март и уровня воды в городе Тотьма в первый день ледохода, множественный коэффициент корреляции данной зависимости равен 0,79. Парные коэффициенты корреляции между предикторами и предиктантом не менее 0,5, мультиколлинеарность отсутствует. Заблаговременность прогноза составляет 6 дней, стандартная ошибка 65 сантиметров. Конечное уравнение множественной регрессии имеет вид:

$$H_{\text{лдж}} = 0,74H_{\text{низш.г.Котлас}} + 0,63H_{\text{Тотьма}} + 207, \quad (3)$$

Использование уравнения (3) способно упростить прогнозирование высшего уровня воды в городе Котлас без снижения качества выпускаемых

прогнозов. Для повышения качества выпускаемых прогнозов на базе данной зависимости возможно использование метода обучения искусственных нейронных сетей в программе *Statistica* 10 или 12.

В разделе 5.5 «Верификация нейросетевых моделей прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода» произведена верификация обученных нейросетевых моделей прогнозирования. В частности, при использовании методов обучения искусственных нейронных сетей выявлено уменьшение стандартной ошибки прогнозирования и увеличение оправдываемости прогнозов.

При разработке модели прогнозирования высшего уровня ледохода в селе Оксина на реке Печоре в качестве предикторов использованы высший уровень воды за период весеннего ледохода в селе Ермицы и высший предледоходный уровень на посту в селе Оксина, средняя заблаговременность прогноза составила 4 дня. Выборка была разделена на две подвыборки в соотношении 80 и 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, общая ошибка составила 0,52, что позволяет отнести результаты модели к категории удовлетворительных.

По тем же предикторам были обучены искусственные нейронные сети. Нейронные сети с одним скрытым слоем обучены в программном продукте *Statistica* 12. Обучение многослойных нейронных сетей производилось в среде программирования *Python* 3. Лучшим качеством выпускаемых прогнозов характеризуются нейронная сеть *MLP* 2-8-1 (табл. 2, рис. 1), оправдываемость прогнозов которой составила 92 %. Оправдываемость прогнозов, данных по уравнению множественной регрессии, составила 79 %. Оправдываемость отдельных прогнозов оценена по непревышению ошибки прогноза допустимого значения, равного $0,674 \sigma_{\Delta}$.

Таблица 2.

Оценка качества выпускаемых прогнозов по сравнению с инерционным прогнозом

Выборка	σ_{Δ} , см	Ур. мн. регрессии		<i>Seq</i> 2-3-5-1		<i>MLP</i> 2-8-1	
		S, см	S/σ_{Δ}	S, см	S/σ_{Δ}	S, см	S/σ_{Δ}
Полная	82	47	0,57	43	0,52	30	0,37
Обучающая	85	49	0,58	45	0,52	30	0,35
Тестовая	78	36	0,46	32	0,41	30	0,38

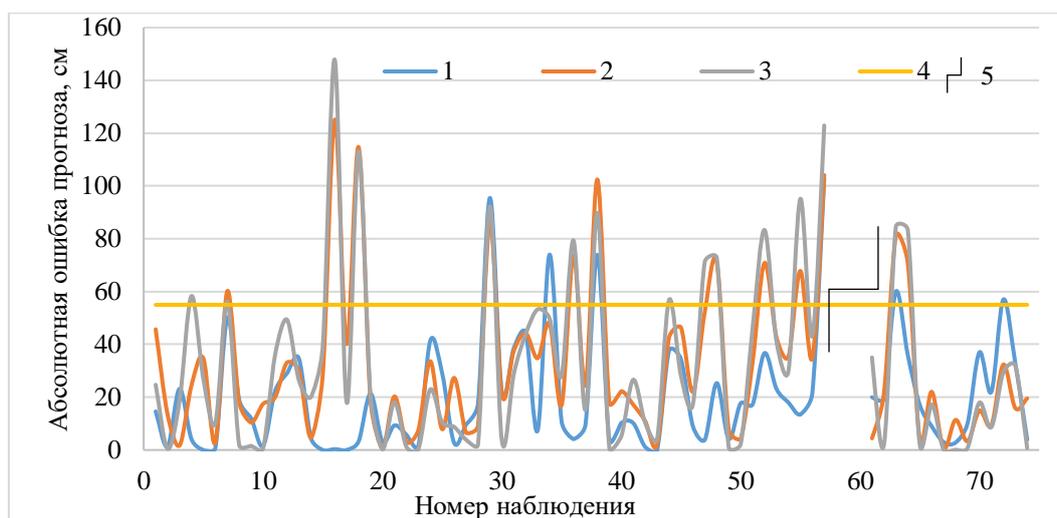


Рис. 1. Абсолютные ошибки результатов прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода реки Печоры по гидрологическом посту с. Оксино с использованием нейросетвых моделей *MLP* 2-8-1 (1), *Seq* 2-3-5-1 (2) и модели множественной линейной регрессии (3); допустимая ошибка прогнозирования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

Для прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в городе Котлас по тем же предикторам, что и в уравнении (3), были обучены искусственные нейронные сети в программе *Statistica* 12. 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 (табл. 3, рис. 2.). Качество выпускаемых прогнозов достаточно высокое, при этом можно отметить доступность и обоснованность использованных предикторов. Так, уровень воды, приходящийся на первый день ледохода в городе Тотьма, является интегральной характеристикой поступающих объемов воды сверху, а низший уровень за октябрь–март характеризует дефицит воды в речной системе.

Таблица 3.

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

Выборка	MLP 2-5-1					
	S, см	S/ $\sigma_{\text{ср}}$	S/ σ_{Δ}	Допустимая ошибка, см	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

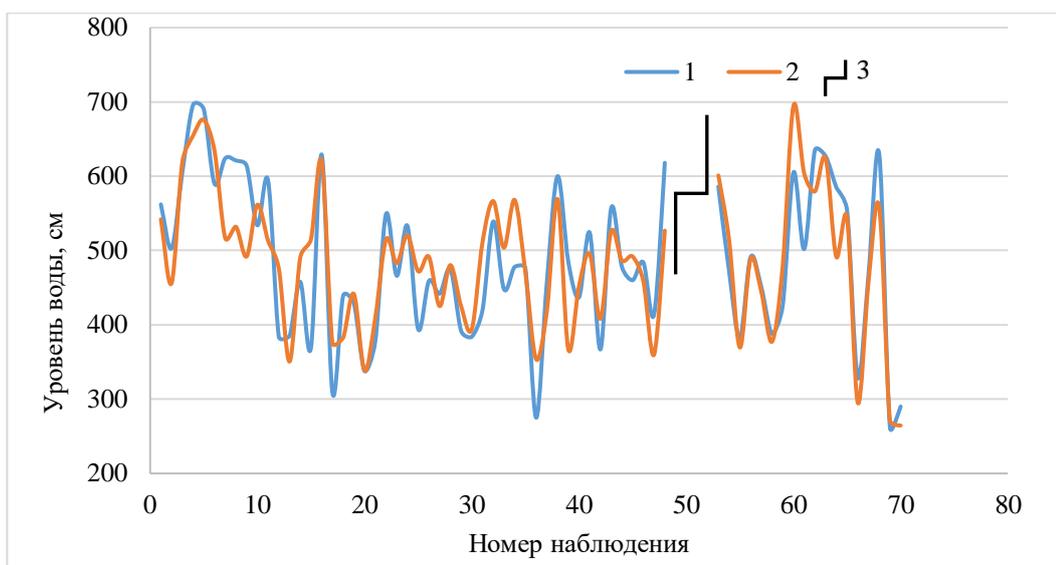


Рис. 2. Результаты прогнозирования высшего уровня воды за период весеннего ледохода в створе гидрологического поста г. Котлас (1) с использованием нейросетевых моделей *MLP* 2-5-1 (2); обучающая и тестовая выборка разделены условной линией (3).

Ошибки данной модели имеют нормальное распределение, статистически значимые тренды и автокорреляция остатков отсутствуют, что свидетельствует о возможности внедрения данной модели для прогнозирования высшего ледоходного уровня на сети Росгидромета.

Таким образом, можно заключить, что применение искусственных нейронных сетей при прогнозировании высшего уровня воды за период весеннего ледохода способно на 10–20 % снизить стандартную ошибку прогнозирования.

В **Заключении** представлены основные результаты настоящего 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК, в т. ч. индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

1. Сумачев А. Э. Изменение климата и его влияние на гидрологический режим Северной Двины // Естественные и технические науки. – 2018. – №. 9. – С. 57-63.

2. 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. – 2019. – № 54. – С. 48-57.

3. Сумачев А. Э., Банщикова Л. С. Ледовый режим реки Печора и особенности прогнозирования высшего уровня ледохода // Гидрометеорология и экология. (Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета). – 2020. – №. 61. – С. 446-459. doi: 10.33933/2074-2762-2020-61-446-459.

4. Банщикова Л.С., Сумачев А.Э. Вариация температуры воздуха холодного периода на Кольском полуострове как фактор изменения ледового режима // Арктика: экология и экономика. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 397-405. – DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-397-405.

5. 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.

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus

1. Банщикова Л.С., Сумачев А.Э. Вариация температуры воздуха холодного периода на Кольском полуострове как фактор изменения ледового режима // Арктика: экология и экономика. – 2021. – Т. 11. – № 3. – С. 397-05. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-397-405.

2. Sumachev A. E., Kuzmin V. A., Borodin E. S. River flow forecasting using artificial neural networks // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – Т. 9. – №. 10. – P. 706-714.

Свидетельства о регистрации авторских прав

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621036 Российская Федерация. Многолетние данные по характерным уровням и расходам воды, максимальным и минимальным ежемесячным уровням и максимальной толщине льда рек бассейна Северной Двины до г. Котласа: № 2019620930: заявл. 03.06.2019: опубл. 18.06.2019 / Н.И. Горошкова, М.В. Георгиевский, Д.В. Георгиевский, А.Э. Сумачев, А.В. Стриженов; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт».

2. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621902 Российская Федерация. Характеристики ледового режима рек Двинско-Печорского бассейнового округа № 2021621776: заявл. 30.08.2021: опубл. 07.09.2021 / А.Э. Сумачев, Л.С. Банщикова; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт».

3. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2021621912 Российская Федерация. Характеристики ледового режима рек Кольского полуострова № 2021621808: заявл. 30.08.2021: опубл. 09.09.2021 / А.Э. Сумачев, Л.С. Банщикова; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт».

Материалы научных конференций:

1. Сумачев А.Э., Изменение климата и его влияние на гидрологический режим Северной Двины // Труды II Всероссийской конференции "Гидрометеорология и экология". – СПб: ХИМИЗДАТ, 2018. – С. 609-612.

2. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Изменение климата и его влияние на ледовый режим рек // Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Теория и практика современных географических исследований», посвященной 180-летию российского путешественника и натуралиста, исследователя Центральной Азии Н. М. Пржевальского в рамках XV Большого географического фестиваля. – М.: Издательство «Каллиграф», 2019. – С. 275-278.

3. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Прогнозирование гидрологических характеристик с использованием нейронных сетей // Труды III Всероссийской конференции «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития». – СПб: ХИМИЗДАТ, 2019. – С. 812-815.

4. 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». – СПб: ХИМИЗДАТ, 2019. – С. 816-819.

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

6. Сумачев А.Э., Банщикова Л.С. Условия формирования фаз ледового режима на примере рек Сухона и Мезень // Сборник материалов участников XVI Большого географического фестиваля, посвященного 200-летию со дня открытия Антарктиды русской экспедицией под руководством Фаддея Беллинсгаузена и Михаила Лазарева. – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2020. – С.183-186.

7. Банщикова Л.С., Банщиков А.А., Сумачев А.Э. Распространение зажоров и заторов льда на реке Варзуга // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения. Тезисы докладов VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В.В. Никонова. Под редакцией Е.А. Боровичева, О.И. Вандыш. 2019. – С. 102-104.

8. Сумачев А. Э., Л.С. Банщикова, Ледовый режим реки Онега и особенности его прогнозирования // Современные проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды на пространстве СНГ: Сборник тезисов Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Российского государственного гидрометеорологического университета, Санкт-Петербург, 22–24 октября 2020 года. – Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет, 2020. – С. 422-423.

9. Банщикова Л.С., Сумачев А.Э. Многолетняя изменчивость температуры воздуха холодного периода на Кольском полуострове // Сборник тезисов докладов. Всероссийская научная конференция с международным участием «Экология и климат» (25-26 февраля 2020 г.). – СПб: ИПК «Прикладная экология», 2020. – С. 18-19.

10. Сумачев А. Э., Банщикова, Л.С., Агафонова С.А. Анализ многолетней изменчивости температуры воздуха холодного периода в низовьях Печоры, как фактора ледового режима // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий, «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии». ФГБОУ ВО «ИГУ». – Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. – С. 468-473.