

На правах рукописи



Канашин Сергей Андреевич

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ЛЬДА НА РЕКАХ И ОЗЕРАХ
КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА И МЕТОДЫ ЕГО
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ**

Научная специальность 1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы,
гидрохимия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
географических наук

Москва – 2026

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

Научный руководитель:

Банщикова Любовь Святославовна

кандидат географических наук,
заместитель директора по развитию
Государственного гидрологического
института

Официальные оппоненты:

Гармаев Ендон Жамьянович

доктор географических наук, академик
РАН, директор Байкальского института
природопользования СО РАН

Морейдо Всеволод Михайлович

кандидат географических наук,
заведующий лабораторией
гидроинформатики, ведущий научный
сотрудник Института водных проблем РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Московский
государственный университет имени М.В.
Ломоносова»

Защита состоится «25» сентября 2026 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 24.1.049.03 на базе ФГБУН «Институт географии Российской академии наук» по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>.

Автореферат разослан « » 2026 г.

Отзывы на автореферат (на бумажных носителях в одном экземпляре, заверенные подписью и печатью в электронном виде в формате PDF) просим направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный пер., д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета 24.1.049.03, Титковой Т. Б. e-mail: titkova@igras.ru.

Ученый секретарь диссертационного совета,

Кандидат географических наук

Титкова Т.Б.



Общая характеристика работы

Актуальность темы. Ледовые явления формируются на большинстве рек и озер Российской Федерации, наиболее продолжительный и устойчивый характер они приобретают на северных территориях страны. При этом рациональное использование водных ресурсов в холодный период невозможно без учета особенностей гидрологического режима территорий. Крайне важным при этом является прогноз характеристик ледового режима рек и озер.

В настоящее время существует несколько подходов к составлению прогнозных зависимостей. Благодаря достаточной изученности процессов, происходящих в речных системах, разработаны теоретические методы, которые в значительной степени учитывают все процессы, связанные с формированием и разрушением ледовых явлений [Шуляковский, 1960; Георгиевский, 1986]. Однако из-за стохастичности этих процессов более широкое распространение получили эмпирические методы, основанные на аппроксимации рядов наблюдений за водным и ледовым режимами и метеорологическими характеристиками.

Кроме того, погрешность прогнозов, полученных с использованием существующих методик, основанных на эмпирических зависимостях, остаётся значительной. Это связано, в том числе, с изменением условий формирования ледовых явлений в условиях меняющегося климата.

В последние десятилетия наблюдается переход к data-driven-подходам: сначала к традиционным методам машинного обучения (ML) — логистическим моделям, дискриминантному анализу, а затем — к искусственным нейронным сетям и нечетким системам. До 2020 года в отечественной и зарубежной литературе применение методов машинного обучения для прогнозирования ледовых явлений встречалось редко и, как правило, было связано с прогнозом высших уровней воды. Так, в работе Сумачева А. Э., Банщиковой Л. С. и Грига С. А. рассмотрена реализация

нейросетевых методик прогнозирования высших уровней воды в период весеннего ледохода на примере рек Сухона, Северная Двина и Печора. Все рассмотренные нейросетевые методики показали высокую эффективность по критериям, рекомендованным Гидрометцентром России, и по качеству выпускаемых прогнозов превзошли регрессионные зависимости. В работе Агафоновой С. А. и соавторов искусственных нейронных сетей (ИНС) применялись для составления прогноза максимальных заторных уровней воды реки Сухона в районе Великого Устюга.

Таким образом, разработка и совершенствование методов прогнозирования сроков появления льда и установления ледостава на реках и озерах с использованием как традиционных методов, так и методов, основанных на применении ИНС, является актуальной научной и практической задачей.

Объекты и предмет исследования. В качестве объектов были выбраны реки и озера Арктического района Российской Федерации, расположенные на территории Мурманской области. К ним относятся: р. Печенга, р. Титовка, р. Западная Лица, р. Кола, р. Кица, р. Туманная, р. Пак, р. Печа, р. Умба, р. Поной, р. Варзуга, р. Чаваньга, р. Куреньга, р. Гольцовка, р. Ена, р. Монча, р. Малая Белая, р. Юкспорйок, р. Тумча, Пермус-озеро, оз. Имандра, Умб-озеро, Ловозеро, Пулозеро, оз. Куэтс-ярви, вдхр. Верхнетуломское, вдхр. Княжегубское, вдхр. Иовское, вдхр. Серебрянское. Данный выбор обусловлен разнообразием условий и процессов формирования ледовых явлений на территории Кольского полуострова.

Предметом исследования являются характеристики ледового режима и прогностические закономерности формирования осенних ледовых явлений и ледостава.

Материалы и методы исследования.

В рамках настоящего исследования проанализированы данные наблюдений по 35 гидрологическим постам и 10 метеорологическим станциям. К исследуемым характеристикам относятся: суточные значения уровней воды, средней температуры воздуха, осадков, скорости и направления ветра, облачности, температуры почвы, атмосферного давления, а также данные наблюдений за ледовым режимом и толщиной льда.

Для построения и обучения нейронных сетей использовались библиотеки TensorFlow, Keras, Scikit-learn, XGBoost, CatBoost, TCN языка программирования Python 3. Для разработки и реализации нейросетевых моделей использовалась среда разработки Jupyter Notebook.

Целью работы является оценка закономерностей появления льда и разработка современных методов прогнозирования сроков появления льда на реках и озерах Кольского полуострова.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. сформировать базу данных характеристик ледового режима рек и озер Кольского полуострова. Провести статистическую обработку гидрометеорологических данных. Оценить влияние изменения климата на характеристики ледового режима исследуемых рек и озер;
2. разработать типизацию условий появления первичных ледовых явлений и установления ледостава на реках и озёрах
3. выполнить подбор наилучших предикторов для прогнозирования сроков появления осенних ледовых явлений на реках и озёрах;
4. оценить возможность использования традиционных методов и методов машинного и глубокого обучения в целях прогнозирования дат появления первичных ледовых явлений и дат установления ледостава;

5. разработать методы прогноза сроков появления осенних ледовых явлений и ледостава на реках и озерах.

Научная новизна исследования.

Заключается в разработанном комплексном подходе к прогнозированию сроков появления первичных ледовых явлений и дат установления ледостава на реках и озёрах Кольского полуострова, основанном на методах машинного и глубокого обучения.

Практическая значимость. Анализ и оценка изменений ледового режима рек и озер способствуют рациональному использованию водных ресурсов в холодный период на Арктической территории Российской Федерации. Разработанные методики прогноза сроков появления первичных ледовых явлений и установления ледостава с использованием методов машинного и глубокого обучения могут быть использованы для актуализации существующих прогнозных методик, применяемых на территории Кольского полуострова Мурманским УГМС.

Положения, выносимые на защиту:

1. установлено, что за период с 1950 по 2022 год наблюдается статистически значимое увеличение сроков установления ледостава на реках и озерах Кольского полуострова под влиянием современного изменения климата в среднем на 14 дней за счет повышения температуры воздуха холодного периода и уменьшения величины и характера накопления сумм отрицательных температур;

2. в зависимости от локальных признаков рек, условий формирования первичных ледовых явлений и установления ледостава, выделено три типа участков рек. Определены основные факторы и выполнена количественная оценка их влияния на условия замерзания рек и озер Кольского полуострова;

3. на основе совместного анализа индекса условий замерзания (ИУЗ) и видов ледовых явлений, разработана типизация условий замерзания рек и озёр Кольского полуострова. Анализ пространственно-временной изменчивости индекса условий замерзания показал преобладание типов замерзания с продолжительностью периода от первичных ледовых явлений до установления ледостава более 30 дней;

4. для прогноза сроков появления льда и установления ледостава на различных участках рек и озер Кольского полуострова обоснована целесообразность использования различных методов машинного обучения, основанных на регрессионном подходе, решении задач классификации и использовании метода гидрологической аналогии.

Степень достоверности и апробации результатов.

Основные результаты диссертационного исследования были получены непосредственно автором. В работе использована официальная информация, полученная непосредственно из данных наблюдений, публикуемых в ежегодных изданиях государственного водного кадастра. Расчеты и моделирование производились в общепринятых программных продуктах и языках программирования.

Апробация работы

Основные результаты работы были доложены и обсуждены на российских и международных научно-практических конференциях:

1. Банщикова Л. С., Сумачев А.Э., Бирюкова В.А., Канашин С.А. Ледовый режим реки Варзуга. Оценка их риска и негативных последствий. VI Международная конференция "Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени Л.Н. Карлина/MGO-2022. 14 – 15 декабря 2022 г.

2. Банщикова Л.С., Сумачев А.Э., Бирюкова В.А., Канашин С.А. Опасные гидрологические явления на реках Кольского полуострова.

Международная конференция «Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации», 4–7 апреля 2023 года
Мурманск: МАГУ.

3. Канашин С.А., Банщикова Л.С., Бирюкова В.А. Анализ пространственно-временной изменчивости сроков установления ледостава рек Кольского полуострова. II Международная научно-практическая конференция «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития». 20–22 марта 2024 г.

4. Канашин С.А., Банщикова Л.С. Методика прогноза дат установления ледостава на реке Кола с использованием нейронных сетей. VIII Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Экология и управление природопользованием». Томск 29.11.2024

5. Канашин С. А. Прогноз сроков появления льда и установления ледостава на реке Умба с использованием нейронных сетей. Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России, (к 60-летию кафедры гидрологии и природопользования). Иркутск 29 – 31 марта 2025 г.

6. Канашин С.А., Банщикова Л.С. Прогноз сроков появления первичных ледовых явлений на реке Поной. X Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов». 29 мая – 1 июня 2025 г.

7. Канашин С.А., Банщикова Л.С. Анализ изменчивости и прогноз сроков появления первичных ледовых явлений и ледостава на реке Варзуга. V Международная научная конференция, приуроченная к 100-летию со дня рождения академика О.Ф. Васильева. Барнаул, 8 – 10 сентября 2025 г.

8. Канашин С.А., Бирюкова В.А., Банщикова Л.С. Прогноз сроков появления льда и установления ледостава на реках и озерах Кольского полуострова с использованием методов машинного обучения // Семинар «Искусственный интеллект и машинное обучение в гидрологии: опыт,

проблемы и перспективы», который пройдет в Институте водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН). – Москва, 9 апреля 2026 г.

Полученные результаты являются частью исследования в рамках научного проекта № 03/2025-И Русского географического общества «Оценка изменений гидролого-гидрохимического режима водных объектов Кольского полуострова и прилегающих территорий под воздействием естественных и антропогенных факторов».

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 актуальной гидрометеорологической информации, анализ современного климатического состояния, проведение

расчетов и численных экспериментов, а также обработка, интерпретация результатов и разработка методов прогнозирования сроков замерзания рек Кольского полуострова выполнены автором лично.

Публикации. По теме работы опубликовано 9 печатных работ, из них 3 в научных изданиях, рекомендованных ВАК, зарегистрирована база данных.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 5 глав, введения, заключения. Объем работы составляет 160 страниц, включая 23 рисунка и 25 таблиц, 3 приложения. Библиографический список содержит 178 источников.

Благодарности. Автор выражает благодарность коллегам из Государственного гидрологического института, Мурманского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Основное содержание работы

Во **введении** представлено обоснование актуальности выбранного направления исследования, сформулированы его цели и задачи, изложены основные положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Кроме того, приведены сведения об их апробации и дана характеристика структуры диссертационной работы.

В первой главе «Исследуемый район и состояние изученности проблемы» представлены физико-географическая характеристика и уровень гидрологической изученности исследуемой территории, а также выполнен анализ научной литературы по теме исследования.

В разделе 1.1 «Физико-географическое описание исследуемого региона» подробно рассмотрены природно-географические условия изучаемой территории, включая особенности речной сети региона.

В разделе 1.2 «Гидрологическая изученность исследуемого региона» представлен обзор гидрологической сети исследуемого региона. Общее

количество работающих гидрологических постов на реках составляет 33 поста и 12 на озерах, соответственно. Следует отметить, что внедрение современных технологий, приборов и оборудования для получения, обработки и распространения гидрометеорологической информации, а также автоматизация гидрологических наблюдений, направленная на повышение качества и оперативности предоставления гидрологической информации, требует актуализации существующих прогнозных методов. В настоящее время на балансе Мурманского УГМС числится 22 автоматизированных гидрологических комплекса (АГК), из которых 12 постов передают информацию в оперативном режиме.

В разделе 1.3 «Состояние изученности проблемы» представлен обзор научных публикаций, посвящённых исследованию ледового режима рек и прогнозированию сроков появления льда и установления ледостава. Особое внимание уделено анализу применяемых методов прогноза, включая их развитие и эволюцию в историческом контексте.

Вторая глава «Климатическая характеристика Кольского полуострова» посвящена описанию многолетних колебаний температуры воздуха за холодный период. Была проведена оценка пространственно-временной изменчивости индекса суровости зимы (ИСЗ), рассчитанного на основе сумм отрицательных температур воздуха за холодный период. Рост средних многолетних значений ИСЗ указывает на увеличение периода зимнего замерзания. Пространственный анализ выявил наиболее выраженное увеличение сумм отрицательных температур в центральной части Кольского полуострова. В прибрежных районах, подверженных воздействию тёплых морских течений Баренцева и Белого морей, наблюдается снижение сумм отрицательных температур, однако оно выражено менее значительно по сравнению с внутренними регионами полуострова.

Согласно Третьему оценочному докладу Росгидромета (2022), для территории Российской Федерации в XXI веке прогнозируется дальнейший

рост средней годовой температуры воздуха. В Арктической зоне ожидается снижение амплитуды экстремальных температур за счёт более быстрого повышения минимальных суточных температур по сравнению с максимальными. Также предполагается увеличение зимнего количества осадков по всей стране, сокращение площади снежного покрова и уменьшение зоны многолетней мерзлоты до 40% и 72% по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 соответственно.

Для анализа изменчивости крупномасштабных синоптических процессов использована классификация форм атмосферной циркуляции Вангенгейма-Гирса. Рассматривая многолетнее изменение эпох атмосферной циркуляции, можно выделить преобладание формы восточного переноса (Е) с 1966 по 1990 годы. С 1990 года и по настоящее время характеризуется преобладанием западного переноса. Для периода установления льда особый интерес представляют октябрь-ноябрь. В эти месяцы число дней с западным переносом достигает максимума, с минимумом в мае. Для процессов меридиональной формы характерен максимум с мая по июль, а минимальные значения отмечаются в осенне-зимний период. Число дней с процессами восточного переноса мало меняется от месяца к месяцу. Минимальное число дней с типом Е отмечается в июне и сентябре–октябре.

Для анализа формирования первичных ледовых явлений, ледостава и общей продолжительности замерзания использован индекс условий замерзания, основанный на сумме отрицательных среднемесячных температур воздуха. Этот показатель отражает вклад каждого месяца в развитие ледовых процессов. В зависимости от сочетания последовательности условий замерзания за каждый месяц значения сумм отрицательных температур по месяцам (индекс условия замерзания) за период с 1841 года по 2024 год были ранжированы, а затем отнесены соответствующему классу : от I (все месяцы теплые) до XX (все месяцы холодные). Далее для каждого типа выбраны наиболее характерные года, для которых выполнен совместный анализ

накопления сумм отрицательных температур и ледовых явлений за каждый день за период с 01 октября до 31 января.

Сравнительный анализ индексов условий замерзания октября за различные периоды показал, что тренд незначим. Для октября-ноября и декабря, анализ индексов условий замерзания выявил значимые тренды. Так как в отдельные годы ледостав может формироваться только в январе, то и данный месяц был включен в анализ. Анализ индексов условий замерзания октября-января за различные периоды показал, что тренд значим.

Анализ пространственной изменчивости подтвердил стационарность пространственного распределения термически однородных районов. Выделяются: прибрежная зона Баренцева и Белого морей с наивысшими температурами, наиболее холодная область в центральной части Кольского полуострова, переходная зона. Меняется только распространение границы более теплого (первого) района. В современном периоде только в глубине Кольского полуострова сохраняются участки, где наблюдаются устойчивые отрицательные температуры воздуха.

Таким образом, уменьшение значений индекса условий замерзания приводит к изменению характеристик ледостава и уменьшению толщины льда.

Третья глава «Особенности ледового режима рек Кольского полуострова» посвящена анализу суточных наблюдений за ледовым режимом рек. Согласно материалам исследования основной акцент был сделан на ряды дат начала ледовых явлений, дат установления ледостава и период замерзания, а также влияния изменений климата на данные характеристики ледового режима.

В разделе **3.1 «Ледовый режим рек в период замерзания»** рассмотрены процессы формирования первичных ледовых явлений и даты установления ледостава на реках Кольского полуострова.

Все реки Кольского полуострова по географическому положению и рельефу были разделены на три типа: полуравнинные, озерного типа и горные. Для каждого вида рек выполнено описание типового процесса появления первичных ледовых явлений. Также все исследуемые водотоки были типизированы по преобладающему типу первичных ледовых явлений. Тип замерзания и условия появления первичных ледовых явлений определяют дальнейшее протекание замерзания и установления ледостава.

Проанализированы многолетние ряды наблюдений по 24 гидрологическим постам. Анализ изменения дат появления первичных ледовых явлений также проводился для двух временных интервалов – до и после точки смены тренда.

Отсутствие выраженных тенденций к смещению сроков формирования первичных ледяных явлений на реках Кольского полуострова объясняется озёрным регулированием стока, широким распространением шугообразования, а также тем, что для установления устойчивого ледостава в регионе, как правило, достаточно сравнительно невысоких отрицательных температур воздуха. Анализ метеорологических данных за октябрь—ноябрь показывает, что характерные температурные значения и даты их наступления остаются относительно стабильными на протяжении исследуемого периода.

Анализ многолетних наблюдений свидетельствует о тенденции к более позднему формированию ледостава за последние 35 лет по сравнению с предшествующим периодом. Среднее значение смещения сроков установления устойчивого ледяного покрова по Кольскому полуострову составляет 14 суток. В отдельных случаях наблюдаются существенно более выраженные сдвиги, достигающие 40 и более дней. Подобное смещение обусловлено увеличением продолжительности промежуточной стадии — неполного ледостава, характеризующейся нестабильным ледяным покровом, наличием чередующихся участков льда различной плотности и участков открытой воды, а также возможными фазами повторного замерзания и

вскрытия. Следует отметить, что на отдельных водотоках устойчивый ледостав формируется крайне редко.

Таким образом, установлены основные закономерности формирования первичных ледовых явлений, определены гидрометеорологические факторы, влияющие на сроки их появления, и выполнен анализ временной изменчивости сроков появления первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова. Процесс формирования устойчивого ледостава на водоёмах Кольского полуострова характеризуется значительной пространственной и временной неоднородностью, обусловленной морфологическими особенностями русел, типом питания, а также локальными климатическими и гидрологическими условиями. В последние десятилетия прослеживается устойчивая тенденция к смещению сроков установления ледостава на более поздние даты, что отражает влияние изменений климата на сезонную динамику ледового режима. Увеличение стадии неполного ледостава свидетельствует о снижении устойчивости ледяного покрова и повышенной чувствительности гидрологических систем региона к температурным колебаниям. На отдельных участках рек, особенно в порожистых зонах, устойчивый ледостав формируется эпизодически, что требует пересмотра подходов к оценке ледового режима и его учёта в водохозяйственном планировании, мониторинге и прогнозировании.

В разделе 3.2 «Ледовый режим озёр в период замерзания» рассмотрены процессы замерзания и установления ледостава на озёрах Кольского полуострова.

Определяющим фактором появления льда на озёрах Кольского полуострова является сумма отрицательных температур воздуха. Процесс замерзания водоемов, как правило, начинается с образования первичных ледовых явлений – заберегов, сала, шуги. Раньше всех повеление льда происходит на малых и средних водоемах, в среднем, в третьей - четвертой

декаде октября. Появление первичных ледовых на крупных озерах и водохранилищах происходит в начале и середине ноября.

В годы с сильным похолоданием и в штилевую погоду происходит сильное переохлаждение поверхностного слоя воды, за счет чего ледостав на водоемах может образовываться сразу без появления первичных ледовых явлений. При ухудшении погодных условий, образовавшийся ледостав может разрушиться.

На малых и средних озерах ледостав устанавливается во второй половине октября, на крупных в первой декаде ноября. Для всех исследуемых водоемов наблюдается смещение сроков установления ледостава на более поздние даты, в среднем, на 7 дней. Смещение сроков однонаправленно и равномерно распределено по всему исследуемому району.

Таким образом, для большинства исследуемых водоемов наблюдается смещение сроков появления первичных ледовых явлений и дат установления ледостава на одну декаду позднее в условиях изменения климата. Более позднее замерзание имеет равномерное распределение по территории Кольского полуострова. В отличие от рек, озера и водохранилища более инертны и устойчивы к влиянию теплых течений, омывающих Кольский полуостров течений. Основными фактором, влияющим на сроки появления ледовых явлений, является температура воздуха, дата перехода ее через 0°C и скорость накопления отрицательных значений.

В четвертой главе «Методы прогноза характеристик ледового режима рек Кольского полуострова» выполнен обзор, используемых на сети подходов для прогноза дат появления первичных ледовых явлений и сроков установления ледостава.

Для краткосрочного прогноза сроков появления льда Мурманским УГМС в настоящее время используются эмпирические зависимости минимальной среднесуточной температуры воздуха от начальной температуры

воды и уровня воды. Эмпирические зависимости представлены в виде номограмм на бумажных носителях, что также увеличивает погрешность прогноза за счет субъективного фактора аппроксимации исторических данных и фактора прогнозиста. Для анализа методики краткосрочного прогноза сроков появления первичных ледовых явлений и установления ледостава был выполнен ретроспективный прогноз. Для большинства рассматриваемых лет ошибка прогноза превышает допустимую в 2 дня, при заблаговременности прогноза осенних ледовых явлений составляющей 4 дня

На сегодняшний день разработано значительное количество методик, направленных на выделение информативных параметров, обладающих прогностической ценностью в задачах долгосрочного прогнозирования ледовых явлений. Так, Мурманским УГМС разработана методика долгосрочного прогноза сроков замерзания рек, использующая в качестве исходных данных температуру воды Баренцева моря, индексы Белинского, индексы Воробьевой, индексы барической топографии, суммы аномалий геопотенциалов за сентябрь.

Однако в условиях современного изменения климата, сопровождающегося усилением межгодовой изменчивости, сдвигом сроков наступления ледостава и изменением характера атмосферной циркуляции, ранее установленные связи между параметрами циркуляции и ледовыми явлениями теряют устойчивость. Это требует переоценки и адаптации существующих методов, в том числе обновления регрессионных зависимостей, расширения базы наблюдений и внедрения новых подходов к комплексному анализу изменчивости климатической системы и ледового режима.

В пятой главе «Разработка моделей машинного обучения для прогнозирования характеристик ледового режима» выполнен обзор основных методов машинного и глубокого обучения, которые применяются в настоящее время для прогнозирования природных процессов. Современное

развитие методов машинного обучения (Machine Learning, ML) и глубинного обучения (Deep Learning, DL) предоставляет новые перспективы для решения задач, связанных с прогнозированием ледового режима. Хотя методы машинного обучения обладают значительным потенциалом, их внедрение в отечественную гидрологическую практику до последнего времени оставалось ограниченным и эпизодическим. В частности, как отмечается в ряде российских исследований, нейросетевые методы долгое время практически не использовались при прогнозировании ледовых явлений, что актуализирует необходимость разработки и апробации новых моделей на основе ML/DL.

В разделе 5.1 «Обзор существующих подходов к созданию нейросетевых моделей для прогностических задач» приведён подробный анализ применения современных методов машинного и глубокого обучения к задаче прогнозирования сроков появления льда и установления ледостава на реках Кольского полуострова. Особое внимание уделено ансамблевым методам (Random Forest, XGBoost, CatBoost), а также нейросетевым архитектурам (LSTM, GRU, BiLSTM, CNN+LSTM, Transformer). Выполнен обзор оценки качества моделей машинного обучения.

Ансамблевые деревья решений, такие как Random Forest и XGBoost, демонстрируют высокую точность при прогнозировании даты наступления ледовых явлений даже в условиях неполных или шумных данных. Эти модели хорошо работают в режиме как регрессии (прогноз даты ледового явления), так и классификации (явление наступило/не наступило), обладают высокой интерпретируемостью, устойчивостью к выбросам и возможностью автоматического отбора значимых предикторов. Примеры успешного применения XGBoost к задаче прогнозирования фаз ледового режима в литературе подтверждают эффективность метода. CatBoost, оптимизированный для категориальных данных, также показал перспективные результаты в смежных задачах и может быть полезен в ледовых прогнозах при наличии категориальных факторов.

Рекуррентные нейронные сети (LSTM, GRU, BiLSTM) представляют собой мощный инструмент для работы с временными рядами. LSTM позволяет учитывать долговременные зависимости, такие как накопление отрицательных температур воздуха. GRU является облегченным вариантом LSTM с сопоставимой точностью и меньшими требованиями к данным. Эти архитектуры успешно применяются для предсказания даты наступления ледовых явлений как в режиме регрессии, так и классификации.

Гибридные архитектуры, в частности CNN+LSTM, позволяют эффективно извлекать как локальные, так и долговременные зависимости. Сверточные слои автоматически выявляют характерные паттерны во временных данных, а LSTM агрегирует информацию во времени. Такой подход показал высокую точность при прогнозировании ледяных заторов и рекомендован к применению для задач прогнозирования ледостава.

Модели на основе Transformer, использующие механизм внимания, представляют особый интерес для долгосрочного прогноза. Они позволяют анализировать всю последовательность входных данных одновременно и сосредотачиваться на наиболее значимых временных интервалах. Это особенно важно при моделировании сложных многонедельных процессов, таких как формирование устойчивого ледяного покрова. Несмотря на сравнительно недавнее появление, трансформеры уже успешно применяются в гидрологических задачах и обладают потенциалом превосходить RNN в долгосрочном прогнозе.

Таким образом, интеграция ансамблевых методов и глубоких нейросетевых архитектур открывает новые возможности для повышения точности и устойчивости прогноза ледовых явлений. Разработка гибридных моделей, таких как XGBoost+LSTM, позволяет объединить сильные стороны разных подходов, эффективно обрабатывать разнородные признаки и выявлять как краткосрочные, так и долговременные закономерности в процессе замерзания рек.

Раздел 5.2. «Прогноз сроков появления льда и установления ледостава с использованием регрессионного подхода» посвящён практической реализации прогноза сроков появления льда и установления ледостава на реках и озерах Кольского полуострова с использованием регрессионных моделей машинного и глубокого обучения.

Для решения задачи прогноза дат появления первичных ледовых явлений и дат установления ледостава виды ледовых явлений были разбиты на 4 класса: отсутствие льда, первичные ледовые явления, неполный ледостав, установившийся ледостав. Исходные данные были подготовлены с целью учета всей доступной гидрологической и метеорологической информации за 14 дней до даты наступления ледового явления. Выбранными предикторами служили: сумма отрицательной температуры воздуха, сумма осадков, уровень воды, характеристика ледового режима, а также их статистические характеристики: среднее, стандартное отклонение, минимум, максимум, разность между максимальной и минимальной величиной и тренд изменения характеристики. В общей сложности для прогноза сроков осенних ледовых явлений использовалось 102 признака. В качестве целевых переменных выступали: класс прогнозируемого явления и дата появления соответствующего класса. Для обучения модели вся выборка делилась на обучающую (до 2010 года включительно) и тестовую (с 2010 года) для оценки работы модели на независимых данных.

В регрессионной постановке использовались:

- XGBoost Regressor — базовая модель бустинга, продемонстрировавшая наилучшее качество прогноза при применении one-hot encoding и стандартизации признаков;
- CatBoost Regressor — метод со встроенной обработкой категориальных признаков, использовавшийся с механизмом ранней остановки обучения;

- BiLSTM — нейросетевой метод, способный учитывать контекст входных последовательностей в обоих временных направлениях;
- GRU — рекуррентная сеть с облегчённой архитектурой по сравнению с LSTM;
- CNN+LSTM — гибридная архитектура, извлекающая локальные закономерности и учитывающая временные зависимости;
- Transformer — модель с механизмом самовнимания, способная выявлять глобальные зависимости между признаками.

Во всех нейросетевых архитектурах использовалась стандартная схема нормализации признаков, оптимизатор Adam, механизм ранней остановки и функция активации ReLU. Модели обучались в течение 50 эпох с использованием батча из 32 примеров.

Таблица 1

Сравнение методов машинного обучения и нейросетевых моделей для прогноза сроков появления льда и установления ледостава

Метрика	XGBoost	CatBoost	BiLSTM	GRU	CNN+LSTM	Transformer
Первичные ледовые явления						
S	2.0	2.1	7.4	4.4	4.8	6.1
MAE	1.7	1.8	2.9	3.5	4.0	4.7
±2 дня %	75.6	77.5	54.4	41.3	40.6	35.6
±3 дня %	93.8	91.9	68.8	60.0	55.6	47.5
±4 дня %	98.8	99.4	84.4	71.9	70.6	58.8
3–6 дня %	6.3	8.1	22.5	26.9	25.0	27.5
6–10 дня %	0.0	0.0	6.9	10.6	10.0	15.0
10–15 дня %	0.0	0.0	1.3	1.9	9.4	8.1
15–30 дня %	0.0	0.0	0.6	0.6	0.0	1.9
Установившийся ледостав						
S	2.9	3.1	10.8	9.2	8.4	8.6
MAE	2.1	2.4	7.0	8.3	6.6	6.9
±2 дня %	65.7	60.3	19.9	20.6	32.1	18.3
±3 дня %	85.5	77.1	26.7	32.1	40.5	28.2
±4 дня %	96.2	91.6	38.2	35.9	48.1	40.5
3–6 дня %	13.7	20.6	28.2	11.5	19.1	26.7
6–10 дня %	0.0	1.5	24.4	27.5	18.3	24.4

Метрика	XGBoost	CatBoost	BiLSTM	GRU	CNN+LSTM	Transformer
10–15 дня %	0.0	0.8	11.5	15.3	13.7	13.7
15–30 дня %	0.8	0.0	9.2	13.7	8.4	6.9
Неполный ледостав						
S	2.8	2.8	9.1	8.1	6.5	7.9
MAE	2.0	2.2	5.8	6.6	5.1	5.6
±2 дня %	71.4	64.6	36.1	19.7	32.7	30.6
±3 дня %	85.0	83.0	40.8	30.6	44.9	38.1
±4 дня %	95.9	92.5	50.3	43.5	55.1	50.3
3–6 дня %	14.3	16.3	25.9	27.2	29.9	31.3
6–10 дня %	0.0	0.0	19.7	24.5	12.9	17.0
10–15 дня %	0.0	0.7	7.5	8.2	8.2	6.8
15–30 дня %	0.7	0.0	5.4	9.5	4.1	6.8

По результатам выполненного исследования пригодной для выпуска прогноза можно считать методы, основанные на методе деревьев решений (табл. 1). Так для всех фаз ледового режима модели XGBoost и CatBoost прогнозирует появления ледовых явлений в интервале до 4 дней от наблюдаемых значений в 97 и 91% случаев, соответственно. Качество нейросетевых моделей GRU и CNN+LSTM для прогноза дат появления первичных ледовых явлений можно считать удовлетворительным, однако, ни один из методов, построенных с использованием нейросетевых моделей регрессионного типа нельзя рекомендовать для выпуска прогнозов. Только для прогноза дат появления первичных ледовых явлений более 50% прогнозных значение превысили допустимую погрешность.

Таблица 2

Сравнение методов машинного обучения и нейросетевых моделей для прогноза сроков появления льда и установления ледостава озера Кольского полуострова.

Метрика	Первичные ледовые явления					
	XGBoost	CatBoost	BiLSTM	GRU	CNN+LSTM	Transformer
S	2.3	2.5	5.5	5.3	3.7	2.9
MAE	1.7	1.9	4.1	4.0	2.9	2.3
±2 дня %	76.3	69.9	46.2	38.7	55.9	64.5
±3 дня %	85.0	85.0	60.2	49.5	68.8	85.0

Метрика	Первичные ледовые явления					
	XGBoost	CatBoost	BiLSTM	GRU	CNN+LSTM	Transformer
±4 дня %	94.6	92.5	71.0	61.3	72.0	93.6
3–6 дня %	15.1	14.0	16.1	31.2	20.4	12.9
6–10 дня %	0.0	1.1	16.1	16.1	10.8	1.1
10–15 дня %	0.0	0.0	6.5	2.2	0.0	1.1
15–30 дня %	0.0	0.0	1.1	1.1	0.0	0.0
Установившийся ледостав						
S	3.9	4.4	8.2	8.7	6.1	4.7
MAE	2.6	3.1	6.0	6.1	4.3	3.1
±2 дня %	62.0	52.2	29.2	37.2	46.0	56.6
±3 дня %	80.5	76.1	38.1	45.1	59.3	71.7
±4 дня %	86.7	85.8	53.1	51.3	67.3	81.4
3–6 дня %	13.3	15.0	29.2	22.1	17.7	18.6
6–10 дня %	3.5	4.4	15.9	15.9	15.0	6.2
10–15 дня %	0.9	2.7	10.6	5.3	4.4	1.8
15–30 дня %	1.8	1.8	6.2	11.5	3.5	1.8

По результатам выполненного исследования пригодной для выпуска прогноза сроков появления льда на озерах можно считать методы, основанные на методе деревьев решений (табл. 2). Так для всех фаз ледового режима модели XGBoost, CatBoost и Transformer более 95% прогнозных значений находятся в интервале в 4 суток от исторических значений. 85% прогнозов, соответственных моделей, соответствуют интервалу 3 суток для прогноза сроков появления первичных ледовых явлений. По качеству методы прогноза модели, построенные с помощью методов машинного, можно отнести к хорошим для прогноза сроков появления ПЛЯ и удовлетворительными для прогноза дат установления ледостава. Качество нейросетевых моделей BiLSTM, GRU, CNN+LSTM для прогноза дат появления первичных ледовых явлений можно считать неудовлетворительным, следовательно их нельзя рекомендовать для прогноза сроков осенних ледовых явлений.

В связи с полученными результатами, для последующего применения целесообразно рекомендовать прогностическую модель, основанную на алгоритмах классического машинного обучения, в частности XGBoost. Выявленная высокая точность данного подхода соответствует результатам

гидрологических прогнозов различных характеристик водного и ледового режимов, за исключением отдельных постов: р. Ура, р. Юкспорйок, вдхр. Иовское, вдхр. Княжегубское, вдхр. Верхнетуломское. Для прогноза сроков осенних ледовых явлений возможно использовать метод гидрологической аналогии в совокупности с разработанным методом прогноза на основе машинного обучения.

Было выполнено сравнение прогнозов сроков появления льда и установления ледостава с помощью разработанных методов, основанных на алгоритме XGBoost и используемых на сети эмпирических зависимостях. Прогноз выполнялся на одном наборе исторических данных с 2010 по 2019 годы.

Для первичных ледовых явлений по всем рассмотренным водным объектам и по всем критериям ошибки (2, 3 и 4 суток) разработанный метод обеспечивает значительно более высокую оправдываемость прогнозов. В среднем по четырём постам оправдываемость разработанного метода составила 82 % при ошибке 2 суток, 89 % при ошибке 3 суток и 95% при ошибке 4 суток, тогда как для эмпирических зависимостей соответствующие значения равны лишь 18, 34 и 36%. Аналогичная закономерность выявлена и для прогнозов ледостава. Средняя оправдываемость разработанного метода по доступным данным составила 74% при ошибке 2 суток, 90 % при ошибке 3 суток и 98% при ошибке 4 суток. Для эмпирических зависимостей эти показатели значительно ниже: 7; 23 и 23% соответственно.

Таким образом, разработанный метод не только повышает точность прогнозирования сроков появления первичных ледовых явлений и установления ледостава, но и делает результаты более устойчивыми по всем исследованным водным объектам. Кроме этого, разработанные методы легко обучаемы на новых данных и не требуют ежегодной корректировки и аппроксимации по сравнению с прогнозными номограммами. Это позволяет сделать вывод о целесообразности использования разработанного метода в

качестве более надёжного инструмента гидрологического прогнозирования по сравнению с традиционными эмпирическими зависимостями.

В разделе 5.3. «Прогноз сроков появления льда и установления ледостава с решением задачи классификации» реализован прогноз сроков появления льда и установления ледостава с использованием классификационного подхода на основе гибридной нейросетевой модели XGBoost+CNN-GRU.

Также как и для регрессионных моделей исходные данные были разбиты на 4 класса ледовых явлений. В качестве исходных данных использовались суточные суммы отрицательных температур воздуха, сумм осадков, уровней воды, данные о ледовой обстановки. Данные представлены за период с 1 октября по 31 января каждого гидрологического года для исследуемых рек. Выбор такого временного периода продиктован наиболее ранним началом температуры воздуха через 0°C и наиболее поздней датой формирования ледостава. Были сформированы лаговые признаки (1, 3, 7, 14, 21, 30 дней) и применён one-hot encoding для кодирования постов.

Классификационная модель представляет собой гибридную архитектуру, сочетающую XGBoost-классификатор и нейросетевые слои: свёрточный (Conv1D), двухслойный GRU, а также полносвязные слои. Вероятности принадлежности к каждому классу, полученные от XGBoost, использовались в качестве дополнительных признаков для нейросети. Модель обучалась с применением оптимизатора Adam, механизма ранней остановки и регуляризации через Dropout. Для борьбы с дисбалансом классов применялся алгоритм ADASYN, направленный на увеличение количества синтетических наблюдений для классов с малой представленностью.

По результатам классификации были получены оценки точности по метрикам precision, recall и F1-score. Наилучшее качество классификации продемонстрировал класс «устойчивый ледостав» (F1-score=0.83),

наименьшие значения — для первичных ледовых явлений и неполного ледостава (F1-score = 0.63 и 0.65, соответственно). Общая точность модели (accuracy) составила 77%.

С помощью прогнозируемых ежедневных классов были определены даты наступления первичных ледовых явлений и наступления ледостава. По данным оценки погрешностей (MAE, S, доля попаданий в интервал ± 4 суток) наиболее надёжные результаты получены для рек Тумча, Ура, Поной и Ена. Несмотря на то, что для большинства постов разработанный метод показал хорошую среднюю квадратическую ошибку прогноза, их нельзя рекомендовать для дальнейшего применения. Для прогноза дат установления ледостава метод пригоден для использования лишь для р. Поной – пос. Краснощелье. (табл. 3).

Таблица 3

**Оценка методов прогноза сроков наступления осенних ледовых явлений
(гибридная нейросетевая модель)**

Река-пост	Первичные ледовые явления		Неполный ледостав		Установившийся ледостав	
	S	% 4 дня	S	% 4 дня	S	% 4 дня
р.Тумча - пос.Алакургти	1.9	100	6.7	40	34.4	11
р.Ура - с.Ура-Губа	1.9	100	3.2	78	6.8	44
р.Варзуга - с.Варзуга	3.4	80	10.6	56	14.1	20
р.Печа - с.Падун	4.3	78	10.0	56	23.9	40
р.Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	4.5	78	4.9	75	10.6	44
р.Кица - ст.Лопарская	3.0	90	10.0	33	23.9	29
р.Туманная - пос.Туманный	6.2	80	4.2	70	14.7	40
р.Поной - с.Краснощелье	1.8	100	4.0	89	12.4	22
р.Поной - с.Каневка	1.0	100	11.0	30	24.7	30
р.Чаваньга - с.Чаваньга	3.8	78	10.5	67	14.1	30
р.Умба - исток	3.6	80	17.9	20	–	
р.Умба - пор.Паялка	6.5	90	5.8	70	–	
р.Ена - пос.Ена	2.1	90	3.7	67	7.4	50
р.Монча - г.Мончегорск	11.3	30	23.6	13	–	
р.Малая Белая - ст.Хибины	5.6	78	21.3	38	–	
р.Юкспорйок - г.Кировск	15.6	22	17.8	56	–	

Метод прогноза сроков замерзания на реках Кольского полуострова с использованием гибридной нейронной модели (классификационный подход) можно рекомендовать для использования для водотоков: Тумча, Ура, Кица, Поной (с. Краснощелье и с. Каневка), Ена. Несмотря на то, что для большинства постов разработанный метод показал хорошую среднюю квадратическую ошибку прогноза, их нельзя рекомендовать для дальнейшего применения. Для прогноза дат установления ледостава методика пригодна для использования лишь для р. Поной – пос. Краснощелье.

Таблица 4

Оценка методики прогноза сроков наступления осенних ледовых явлений для озер (гибридная нейросетевая модель)

Озеро-пост	Первичные ледовые явления		Установившийся ледостав	
	S	% 4 дня	S	% 4 дня
Иовское - пос. Зареченск	22.1	9	19.4	18
Княжегубское - с. Ковдозеро	21.1	0	14.2	9
Куэкс-ярви - пгт. Никель	11.0	44	7.3	67
В. Туломское - с. Ниванкюль	11.9	38	7.5	50
Пулозеро-ст. Пулозеро	8.7	73	14.0	27
Ловозеро - с. Ловозеро	3.1	82	7.5	45
Серебрянское - пос. Серебрянский	5.0	64	6.9	36
Умб-озеро - исток р. Умбы	8.4	64	11.1	36
Имандра - пгт. Зашеек	13.9	27	16.7	27
Имандра - ст. Хибинь	19.0	9	18.7	27
Пермусозеро - г. Оленегорск	15.3	25	15.3	13

Метод прогноза сроков появления первичных ледовых явлений и дат установления ледостава, основанный на классификационном, нельзя рекомендовать для прогноза сроков появления льда на озерах Кольского полуострова (табл. 4). Для всех исследуемых водоемов модель показывает неудовлетворительное качество, также не выполняется условие с учетом заблаговременности метеорологических прогнозов.

Классификационный подход продемонстрировал существенно более высокую эффективность при определении сроков замерзания. Это обусловлено тем, что нейронной сети проще идентифицировать

соответствующий класс, поскольку в этот период наблюдается резкое изменение ключевого предиктора — суммы отрицательных температур воздуха. Однако, несмотря на приемлемую точность распознавания отдельных классов, модель недостаточно точно прогнозирует переходные фазы ледового режима. Для повышения прогностической способности данного подхода требуется его дальнейшая модификация, включая увеличение количества предикторов, способных более точно отражать смену ледовых процессов.

Следует отдельно подчеркнуть сложность типизации ледовых явлений. Точность классификации в значительной степени зависит от достоверности и объективности наблюдений за характеристиками ледового режима, что делает человеческий фактор критически важным для качества исходных данных. Кроме того, за длительный период наблюдений обозначения ледовых явлений претерпевали изменения, что в ряде случаев приводит к некорректному отнесению наблюдений к соответствующим классам, особенно в переходные периоды. Возможными мерами по устранению данных проблем являются исключение ошибочных данных, сокращение длины исходного временного ряда, а также введение повышенных весов для классов, характеризующихся высокой степенью несбалансированности, таких как первичные ледовые явления и неполный ледостав.

В разделе 5.4. «Метод гидрологической аналогии для рядов наблюдений за ледовым режимом рек и озер» реализован подбор аналогов для постов, не осященных данными наблюдений или имеющих короткие ряды данных, с целью использования методов машинного и глубокого обучения на менее изученных водных объектах Кольского полуострова.

Для большинства озер и рек Кольского полуострова удалось подобрать пост-аналог для прогноза сроков появления первичных ледовых явлений. В отличие от озер, для рек не удалось использовать метод гидрологической аналогии для дат установления ледостава. Основной причиной является влияние локальных факторов на условия формирования ледостава в период

замерзания, так как большинство рек исследуемого региона относятся к малым водотокам. Несмотря на это, подбор аналога для появления ПЛЯ оказался более удачным за счет того, что основным условием появления первых ледовых явлений является переход температуры воздуха через 0°C. Для образования ПЛЯ не требуется набора большой суммы отрицательных температур воздуха, влияние местных факторов в этом случае играет не такую существенную роль в период замерзания и установления ледостава.

В **Заключении** представлены основные результаты настоящего исследования:

1. сформирована база данных, характеризующая ледовый режим Кольского полуострова.
2. определены основные факторы и закономерности появления первичных ледовых явлений и установления ледостава на реках и озерах Кольского полуострова, выполнена их количественная оценка.
3. обобщены и рассчитаны необходимые метеорологические параметры для прогноза дат появления осенних ледовых явлений.
4. впервые разработана типизация условий замерзания рек и озер Кольского полуострова на основе индекса условий замерзания (ИУЗ) и видов ледовых явлений.
5. совместный анализ индекса условий замерзания и характеристик ледового режима в осенний период показал преобладание типов замерзания, с периодом от первичных ледовых явлений до установления ледостава более 30 дней.
6. увеличение периода замерзания связано с увеличением сроков установления ледостава в среднем на 14 дней.
7. впервые выполнена классификация рек в зависимости от условий появления льда и установления ледостава. Выполнена классификация рек по

типам первичных ледовых явлений и проведена количественная оценка изменения сроков наступления и устойчивости типов первичных ледовых явлений.

8. выбранные факторы формирования льда использованы в качестве предикторов для прогноза сроков появления льда.

9. для прогнозирования сроков появления ледовых явлений на различных участках рек и озёр Кольского полуострова установлена целесообразность применения методов машинного обучения и глубокого обучения, основанных на регрессионном подходе, решении задач классификации.

10. впервые разработаны методы, использующие методы машинного и глубокого обучения, которые позволяют выполнить прогноз дат появления и установления характеристик ледового режима с необходимой точностью и заблаговременностью рек и озёр Кольского полуострова;

11. для использования, предложенных методов прогноза на территории Кольского полуострова, при недостаточности данных наблюдений, обоснована целесообразность применения метода гидрологической аналогии.

12. разработанные методы проходят апробацию на гидрологической сети совместно с Мурманским УГМС. По результатам работы будет выпущен готовый программный продукт для использования в оперативной работе.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК:

1. Канашин С. А. Применение методов машинного обучения для прогноза осенних ледовых явлений на реке Умбе // Известия Иркутского

государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 52. С. 52–64.
DOI: 10.26516/2073-3402.2025.52.52

2. Канашин С.А., Банщикова Л.С., Сумачев А.Э. Прогнозирование сроков формирования первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова. // Труды Гидрометцентра России, выпуск Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2026. № 1 (399). С. 171-188. DOI: 10.37162/2618-9631-2026-1-171-188.

3. Канашин С. А., Банщикова Л. С. Прогноз сроков появления льда и установления ледостава на озерах Кольского полуострова // Гидрометеорология и экология. 2026. № 82. С. 90—102. DOI: 10.33933/2713-3001-2026-82-90-102.10.

Свидетельства о регистрации авторских прав:

1. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622437 «Многолетние гидрометеорологические характеристики ледового режима рек и озер Кольского полуострова». Правообладатель: ФГБУ «Государственный гидрологический институт». Авторы: Канашин С.А., Банщикова Л.С. заявл. 19.05.2025 г., опубл. 03.06.2025 г.

Материалы научных конференций:

1. Банщикова Л. С., Сумачев А.Э., Бирюкова В.А., Канашин С.А. Ледовый режим реки Варзуга. Оценка их риска и негативных последствий // Сборник трудов VI Международной конференции " Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития" имени ЛН Карлина/MGO 2022 – 2022 – С. 28-31.

2. Банщикова Л.С., Сумачев А.Э., Бирюкова В.А., Канашин С.А. Опасные гидрологические явления на реках Кольского полуострова // Предупреждение и ликвидация чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации: материалы научно-практической конференции, 4–7 апреля 2023 года / [ответственный редактор Е. А. Румянцева]. – Мурманск: МАГУ, 2023. – С. 29-31.

3. Канашин С.А., Банщикова Л.С. Методика прогноза дат установления ледостава на реке Кола с использованием нейронных сетей // сборник научных трудов VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, г. Томск, 8 декабря 2025 г.; под ред. А.М. Адама. Вып. 8. – Томск: Литературное бюро, 2025 – С. 51-53.

4. Канашин С. А. Прогноз сроков появления льда и установления ледостава на реке Умба с использованием нейронных сетей // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к 60-летию кафедры гидрометеорологии и природопользования. Иркутск. 19-21 марта 2025 г. ФГБОУ ВО «ИГУ»: отв. ред. Е. Н. Сутырина. Иркутск: Издательство ИГУ. 2025. С. 147 – 152.

5. Канашин С.А., Банщикова Л.С. Прогноз сроков появления первичных ледовых явлений на реке Поной // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов [Электронный ресурс]: труды X Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участ. (г. Пермь, ПГНИУ, 29 мая – 1 июня 2025 г.). Пермь, 2025. С. 124 – 127.

6. Канашин С.А., Банщикова Л.С. Анализ изменчивости и прогноз сроков появления первичных ледовых явлений и ледостава на реке Варзуга // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии. Материалы V международной научной конференции, приуроченной к 100-летию со дня рождения академика О.Ф. Васильева: – Барнаул, 2025. С. 269 – 274.

Канахин Сергей Андреевич

Закономерности появления льда на реках и озерах Кольского полуострова и
методы его прогнозирования

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. геогр. наук

Подписано в печать ____ . ____ . ____ . Заказ № _____

Формат 60x90/16. Усл. Печ. Л. 1. Тираж экз.

Типография _____