

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель:

Кандидат географических наук

Банщикова Любовь Святославовна

Санкт-Петербург – 2026

Содержание

Введение.....	3
Глава 1. Исследуемый район и состояние изученности проблемы	12
1.1. Физико-географическое описание исследуемого района	12
1.2. Гидрологическая изученность Кольского полуострова	14
1.3. Состояние изученности проблемы	17
Глава 2. Климатическая характеристика Кольского полуострова.....	32
2.1. Общие сведения о климате Кольского полуострова	32
2.2. Климатические изменения Кольского полуострова	33
2.3 Многолетние колебания температуры воздуха за холодный период	40
Глава 3. Особенности ледового режима рек и озер Кольского полуострова .	51
3.1. Ледовый режим рек в период замерзания	56
3.2. Ледовый режим озер в период замерзания.....	69
Глава 4. Методики прогноза характеристик ледового режима рек и озер Кольского полуострова.....	76
Глава 5. Разработка моделей машинного обучения для прогнозирования характеристик ледового режима.....	81
5.1. Обзор существующих подходов к созданию нейросетевых моделей для прогностических задач	83
5.2 Прогноз сроков появления льда и установления ледостава с использованием регрессионного подхода.	92
5.3. Прогноз сроков появления льда и установления ледостава с решением задачи классификации.	110
5.4. Метод гидрологической аналогии для рядов наблюдений за ледовым режимом рек и озер.....	116
Заключение	122
Список литературы	126
Список сокращений	146
Приложения	148

Введение

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. Крайне важным при этом является прогноз характеристик ледового режима.

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, метеорологическими характеристиками [Борщ, Гинзбург, Ефремова, 2001; Бузин, 2001; Методы фонового долгосрочного..., 2001].

Кроме того, погрешность прогнозов, полученных с использованием существующих методик, основанных на эмпирических зависимостях [Агафонова, Фролова, 2006; Бузин, 2010; Бузин, Горошкова, Стриженок, 2014; Бузин, Чачина, Шаночкин, 1986; Карнович, Кулешова, 1984], 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 [Сумачев, Банщикова, Григ, 2024]. 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 [Агафонова, Василенко, Фролова, 2016]. В работах [Малыгин, 2014; Малыгин, Алешин, 2022; Семенова, Сазонов, Крыленко, 2020; Иглин, Морейдо, Головнин, 2025] методы машинного обучения применены для прогнозирования ледовых заторов.

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 осенних ледовых явлений и ледостава 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 озерах 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 методы 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 по данным наблюдений, опубликованных 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, обработка и интерпретация полученных результатов, а также разработка методик прогнозирования сроков замерзания рек и озер Кольского полуострова выполнены автором самостоятельно.

Публикации

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

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. 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.)

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 (269-274)

7. 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

8. 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.

9. 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.

10. 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.

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.

Глава 1. Исследуемый район и состояние изученности проблемы

1.1. Физико-географическое описание исследуемого района

Исследуемый район в административном отношении целиком относится к Мурманской области и полностью входит в Арктическую зону Российской Федерации. Выполнение непрерывных гидрометеорологических наблюдений, прогнозирования и мониторинга состояния окружающей среды обеспечивает Мурманское УГМС Росгидромета.

Реки Кольского полуострова относятся к бассейнам двух морей — Баренцева и Белого. Более 95 % от общего числа рек по длине классифицируются как малые. К средним рекам можно отнести 15 водотоков, длина большинства из которых не превышает 200 км. Водораздел проходит с запада на восток — от границы с Финляндией к горлу Белого моря [Гидрологическая изученность..., 1969]. Главные реки Мурманской области протекают с юга на север. Лишь одна из исследуемых рек — река Поной — протекает в широтном направлении.

Для большинства рек Кольского полуострова характерны узкие, слаборазвитые долины, глубоко врезанные в твердые кристаллические породы. Их поперечный профиль, как правило, имеет V-образную или каньонообразную форму. В русле рек наблюдаются резкие коленчатые изгибы, а также многочисленные участки с перепадами высот — стремнины, пороги и водопады, чередующиеся с более спокойными плесами. Значительная часть водотоков представляет собой озёрно-речные системы, включающие чередующиеся озёра и короткие порожистые протоки, при этом в ряде случаев суммарная протяжённость озёр превышает длину речных участков. Поймы рек наиболее полно выражены на равнинных участках центральной части Кольского полуострова, особенно в верхнем и среднем течении таких рек, как Поной и Варзуга. В остальных районах полуострова преобладают односторонние развитые поймы. Преобладающие русла рек — немеандрирующие. Прорезая твердые горные породы, реки формируют многочисленные пороги и перекаты. Продольные профили средних рек,

впадающих в море, отличаются плавным уклоном в верхней и средней частях течения, сменяющимся резким падением в нижнем течении. Для малых рек характерен ступенчатый тип продольного профиля.

Средняя озерность бассейнов составляет 6%. Наибольшее распространение озера имеют в центральной и северной частях полуострова. Коэффициент озерности для рек данной области может достигать 10 – 20%. Большинство озер Кольского полуострова малые (площадь зеркала менее 1 км²). Однако на долю озер с площадью зеркала более 1 км² приходится более 63 % всей площади озер. Наиболее крупные водоемы: озеро Имандра, Верхне-Тулумское водохранилище, Умб-озеро, Ловозеро. Наибольшее распространение получили озера ледникового происхождения. К тектоническому типу можно отнести почти все крупные водоемы полуострова. С учетом приграничных водоемов на территории Мурманской области образовано 12 водохранилищ.

Болота занимают более 20% площади полуострова, распределены неравномерно. Наибольшее развитие имеют верховые болота с питанием атмосферными осадками. В долинах рек и низменностях рельефа распространены низинные болота и болота переходных стадий к верховым.

Водный режим рек определяется преимущественно снеговым питанием, характеризуется высоким весенним половодьем, низкой летне-зимней меженью и небольшими летне-осенними паводками.

Весеннее половодье начинается в конце апреля – начале мая, в горных районах, как правило, на 10 дней позднее. На реках полуострова в период максимальных расходов проходит 40 – 60% годового стока. Величина среднего слоя стока составляет 380 – 440 мм на севере и до 150 мм на юго-западе полуострова. В горных районах средний сток половодья превышает 400 – 500 мм.

Летне-осенняя межень начинается в середине июля – начале августа и заканчивается в сентябре – начале октября. Средняя продолжительность

колеблется от 30 до 70 дней. Средний меженный слой стока составляет от 20 до 60 мм.

Дождевые паводки чаще всего проходят в период с июля по сентябрь. Средняя продолжительность составляет 10 – 20 дней, в отдельные годы достигает до 30 – 40 дней.

Зимняя межень устанавливается в конце октября – середине ноября. Средняя продолжительность около 160 – 190 дней, при этом на севере полуострова она больше на 5 – 10 дней. Средний слой стока зимней межени составляет от 20 до 130 мм. Наибольшие слои наблюдаются в горной местности (200 – 500 мм).

1.2. Гидрологическая изученность Кольского полуострова

Гидрологическая сеть региона достаточно развита, наблюдения ведутся на большинстве средних и малых реках Кольского полуострова. Общее количество работающих гидрологических постов на реках составляет 33 поста, озерных постов – 12 [Обзор состояния системы..., 2023]. Состояние и работа гидрометеорологической сети рассматривается в ежегодных обзорах ФГБУ «ААНИИ» [Обзор состояния системы..., 2017; Обзор состояния системы..., 2018; Обзор состояния системы..., 2019; Обзор состояния системы..., 2020; Обзор состояния системы..., 2021; Обзор состояния системы..., 2022; Обзор состояния системы..., 2023]. Изменения в составе наблюдений, разрядности постов, сокращение сети приводят к недостатку исходной информации необходимой, в том числе, для прогноза паводков и наводнений, прогноза характеристик ледового режима, водохозяйственного регулирования объектов гидротехнического строительства, разработке мер по предупреждению чрезвычайных ситуаций.

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 методик. В настоящее время на балансе Мурманского УГМС числится 22 автоматизированных гидрологических комплекса (АГК), из которых 12 передают информацию в оперативном режиме.

Для хранения и анализа гидрологической информации была сформирована база данных, содержащая основные характеристики водного и ледового режима рек и озер Мурманской области. В рамках настоящего исследования проанализированы данные по 35 речным и озерным постам (рис. 1.2.1) [Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622437].

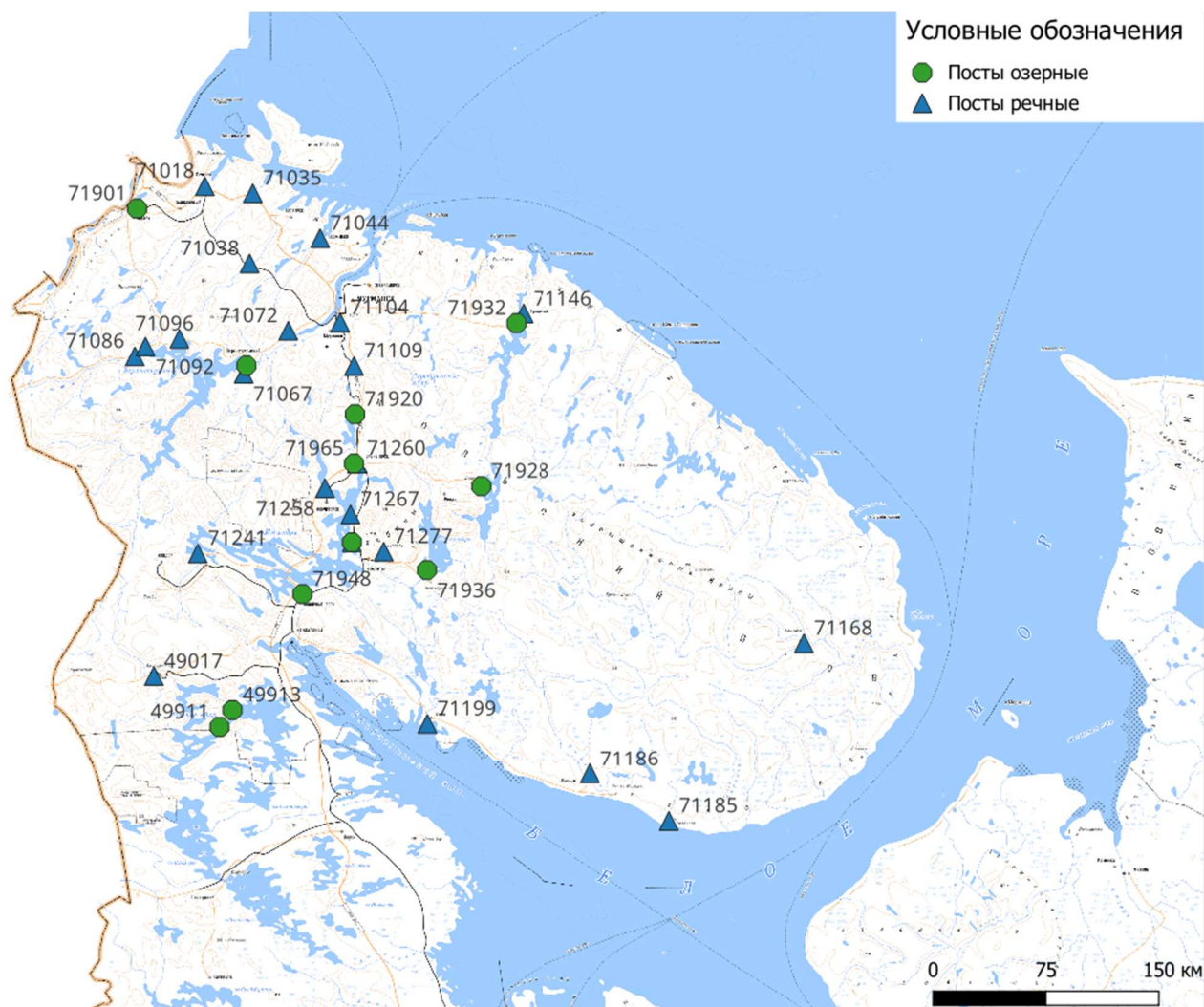


Рисунок 1.2.1. Схема расположения гидрологических постов на исследуемой территории.

Метеорологическая сеть на территории исследования характеризуется высокой степенью развития и наличием длительных рядов наблюдений за температурой воздуха и количеством осадков, что обеспечивает возможность оценки современного состояния климата и выявления тенденций его изменения. Небольшая удалённость, а в ряде случаев и совпадение расположения метеорологических и гидрологических станций и постов позволяет с высокой точностью анализировать влияние климатических изменений на ледовый режим рек, а также выполнять комплексные расчёты. В настоящем исследовании использованы данные по 12 метеорологическим станциям (рис. 1.2.2). Данные об используемых гидрологических постах и метеорологических станциях приведены в Приложении 1.



Рисунок 1.2.2. Схема расположения метеорологических станций на исследуемой территории.

1.3. Состояние изученности проблемы

Систематическое исследование ледового режима рек и озер северной части Европейской территории России (ЕТР) началось с создания сети наблюдательных постов в конце XIX века. Именно к этому периоду относятся первые картографические материалы, отражающие характеристики ледового режима, составленные М.А. Рыкачёвым и В.Б. Шостаковичем для территории всей страны [Рыкачев, 1886; Шуляковский, 1960; Шуляковский, Басурина, 1967]. Исследования процессов ледообразования на реках в СССР велись с 1930–1950-х гг., в том числе для обеспечения судоходства и строительства. Были описаны типичные последовательности фаз ледообразования и факторы, влияющие на длительность ледостава (температура воздуха, скорость течения, расход и минерализация воды, толщина снежного покрова и др.) [Донченко, 1987].

К середине XX века был накоплен обширный массив наблюдательных данных, обобщённых в классических трудах [Соколов, 1952]. В последующие десятилетия продолжилось изучение региональных особенностей ледового режима. Так, для низовьев сибирских рек были выявлены закономерности в сроках установления и вскрытия ледостава, связанные с географической широтой и климатическими условиями [Соловьева, 1983]. В работе Гинзбурга и Солдатовой, основанной на анализе рядов наблюдений с 1891 по 1985 гг. по различным регионам России, были выявлены совпадающие тенденции изменений сроков замерзания и вскрытия рек в различных географических зонах. В частности, практически повсеместно прослеживается смещение дат ледостава на более поздние сроки в течение последнего столетия [Гинзбург, Солдатова, 1996]. Аналогичные результаты получены и в зарубежных исследованиях. В среднем по наблюдаемым водоёмам Северного полушария дата установления ледяного покрова сдвинулась примерно на +5 – 10 дней за 100 лет, что связано с общим потеплением климата [Past and Future..., 2011]. Следует отметить, что почти все проанализированные временные ряды демонстрируют сокращение продолжительности ледяного покрова. По

данным Магнусона и соавторов, за 100 лет ледостав стал устанавливаться на 6,3 дня позже, а вскрытие — происходить на 5,8 дней раньше [Historical Trends in..., 2000].

В конце XX — начале XXI века интерес к влиянию глобального потепления на ледовый режим рек существенно возрос. С конца 1990-х годов российские учёные сосредоточили внимание на анализе изменений ледового режима арктических рек под воздействием потепления климата. Оценки изменений проводились Б.М. Гинзбургом [Гинзбург, Солдатова, 1997], И.И. Солдатовой [Солдатова, 1996; Солдатова, 1996], С.В. Борщом [Борщ, Гинзбург, Солдатова, 1998; Борщ, Гинзбург, Солдатова, 2001], В.С. Вуглинским [Вуглинский, Тройская, 2006; Vuglinsky, 2002], С.А. Агафоновой [Агафонова, 2019], Л.С. Банщиковой [Банщикова, Сумачев, 2021].

В работах [Агафонова, Фролова, 2007; Лобанов, Горошкова, 2019; Оценка изменений характеристик..., 2025; Землянскова, Нестерова, Макарьева, 2024; Смахтин, 2019; Современное изменение ледового..., 2014; Махинов, Ким, 2020; Антропогенные и климатически обусловленные..., 2018] было установлено, что для различных рек и озер в среднем с 1980 года наблюдается резкое усиление сдвигов в датах ледообразования. Особенно выраженные изменения отмечаются в наиболее северных районах: современные сроки установления ледостава статистически отличаются от значений середины XX века. Анализ данных по рекам Сибири и Европейского Севера показывает сокращение продолжительности ледоставного периода и уменьшение максимальной толщины льда, начиная с последней четверти XX века [Dramatic thinning of Alaskan..., 2022].

Изучению ледового режима в период замерзания, процессов образования внутриводного льда и шуги посвящены работы В.Я. Альтберга, В.В. Пиотровича, В.А. Рымши, А.Н. Чижова и др.; в период ледостава, в том числе вопросу нарастания толщины льда — Ф.И. Быдина, С.Н. Крицкого, М.Ф. Менкеля, К.И. Российского, А.И. Чеботарева, А.Г. Шуляковского [Донченко, 1987; Одрова, 1979]. А.Т. Зиновьевым проведены исследования, направленные

на качественный и количественный анализ ледовых процессов и явлений на реках, в том числе в условиях зарегулированного режима, представлены методики расчёта и прогнозирования процессов формирования и разрушения ледяного покрова как на водотоках, так и на водохранилищах, а также перемещения ледяной кромки в нижних бьефах гидроузлов [Зиновьев, 2014].

Процессы разрушения ледяного покрова под воздействием тепловых и механических факторов были изучены В. П. Берденниковым [Винников, Берденников, 1989], К. Н. Коржавиным, Д. Н. Панфиловым, В. В. Пиотровичем и другими исследователями. Существенный вклад в изучение процессов вскрытия рек внесли С. Н. Булатов и Л. Г. Шуляковский [Шуляковский, Еремина, 1952]. В дальнейшем теория разрушения ледяного покрова получила развитие в работах В. А. Бузина [Бузин, 1980; 1989; 1995; 2000; 2001; 2004; Бузин, Банщикова, 2007; Бузин, Копалиани, 2008; Бузин, 2008], который также предложил подходы к прогнозной оценке сроков вскрытия рек с учётом изменений водного стока.

В развитие методов математического моделирования замерзания и вскрытия на реках и водохранилищах большой вклад внес Бузин В.А. предложив, в том числе, модели для расчета образования заторов и зажоров, движения мелкобитого льда, расчета полыньи в нижних бьефах водохранилищ [Бузин, Зиновьев, 2009]. Описанием зажорных и заторных явлений, методов их расчета и мероприятий по борьбе с ними посвящены ряд статей и монография в соавторстве Козлова Д. В., Бузина В.А., Фроловой Н.Л., Агафоновой С.А., Бабурина В.Л., Банщиковой Л.С. и др. [Опасные ледовые явления ..., 2015]. Вопросам расчета ледового режима водоемов и водотоков посвящена диссертация Козлова Д.В. [Козлов, 2002].

Среди зарубежных авторов стоит выделить работы М. Леппяранта, занимающегося исследованиями физики озерного льда [Leppäranta, 2015; Physics of seasonally ice-covered ..., 2012]. Крупные исследования проблематики речных заторов и процессов вскрытия рек принадлежат S. Belatos [Beltaos 1996; Beltaos, 2001; Beltaos, 2003; Beltaos, 2007; Beltaos, 2008;

Beltaos, 2010; Beltaos, 2012; Beltaos, 2013; Beltaos, 2014; Beltaos, Burrell, 2015; Beltaos, 2018; Beltaos, Bonsal, 2021; Prowse, Beltaos, 2002]. Среди работ по математическому моделированию речных ледовых процессов следует выделить исследования Хун Тао Шена, которые объединяют обзор моделей процессов замерзания и вскрытия рек [Hung T.H., 2010].

Таким образом, современное состояние изученности процессов замерзания арктических рек и озер характеризуется значительным объёмом накопленных данных и единым пониманием основных факторов. Классические гидрологические исследования заложили фундамент знаний о фазах ледообразования и статистических характеристиках ледового режима. Многолетние наблюдения, обобщённые в России, Северной Америке и Европе, позволили выявить схожие тенденции, обусловленные потеплением климата. В настоящее время хорошо изучены пространственные различия ледового режима, выполнено сравнение его изменений в различных широтных зонах [Climate warming shortens..., 2022]. Современное научное понимание процессов замерзания арктических рек и озер включает как фундаментальные представления о механизмах ледообразования, так и количественные оценки их трансформации под воздействием изменений климата.

Методам прогноза сроков замерзания и вскрытия посвящены работы Б.М. Гинзбурга [Гинзбург, 2005; Гинзбург, Солдатова, 1997; Гинзбург, Солдатова, 1996; Гинзбург, 1973; Гинзбург, 1981; Гинзбург, 1984; Методы фонового долгосрочного..., 2001], Е.И. Савченко [Савченко, 1974] и И.И. Солдатовой [Солдатова, 1983; Солдатова, 1996].

Разработка количественных методов расчёта параметров ледового режима началась во второй половине XX века. Один из фундаментальных подходов – расчет толщины льда по сумме отрицательных температур воздуха. В советской литературе эта методика получила широкое распространение: предполагается пропорциональность толщины образующегося льда квадратному корню из суммы эффективных отрицательных температур за период промерзания [Донченко, 1987]. Для

учета местных условий вводились эмпирические коэффициенты, отражающие влияние снега (который изолирует лед от холода) и течения воды (которое приносит тепло). Например, при расчётах для крупных рек Сибири предлагалось снижать расчетную толщину льда в нижнем течении, где заметно влияние притока тепла с течением [Бураков, Ковшова, Ромасько, 2008]. В 1960-х годах в зарубежной литературе были предложены графоаналитические методы для расчёта сроков ледообразования.

Для определения сроков наступления ледостава применялись статистические зависимости, основанные на метеорологических критериях. Наиболее простым показателем начала формирования ледовых явлений служит устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в сторону отрицательных температур. Более точные методы основываются на использовании в расчетных зависимостях накопление суммы отрицательных температур с начала осени: дата, когда эта сумма достигает определённого порогового значения, эмпирически соотносится с наступлением ледостава [Гинзбург, 2005]. Такой температурный порог определяется по многолетним данным индивидуально для каждой реки [Волкова, Румянцева, 2018]. Помимо температурных критериев, учитываются и характеристики самого водотока: скорость течения, условия взаимодействия с подземными водами, а также антропогенное воздействие. Последнее особенно важно при расчётах для рек с водохранилищами: зарегулирование стока приводит к более позднему наступлению ледостава ниже гидроузлов вследствие сброса относительно тёплой воды [Бураков, Ковшова, Ромасько, 2008].

Методы расчёта постоянно совершенствовались. Если в 1950–1960-х гг. акцент делался на упрощённых эмпирических формулах, то к 1970–1980-м накопилось достаточно данных для более сложных статистических моделей. В монографиях и сборниках приведён обзор различных подходов к вычислению характеристик ледового режима [Донченко, 1987]. Донченко Р.В. систематизировала формулы для расчёта максимальной толщины льда и продолжительности ледостава по регионам СССР. Она отмечала, что в

европейских районах страны толщина льда ограничивается тёплой зимой и снежным покровом, тогда как в Якутии и на Дальнем Востоке возможно полное промерзание водотоков до дна при экстремально низких температурах. С 1990-х гг. с развитием вычислительных средств стали появляться термодинамические модели ледообразования, учитывающие теплообмен на границе "вода – лед – воздух" и более сложные зависимости. Однако в практике отечественных гидрометеорологических служб вплоть до 2000-х годов преобладали более простые и надёжные эмпирические методы, проверенные на больших массивах наблюдений.

Одной из прикладных задач гидрологии является прогноз сроков появления льда на реках и озерах. Поэтому методы прогнозирования дат появления первичных ледовых явлений и установления ледостава разрабатывались практически одновременно с исследованиями самого ледового режима.

Исторически прогнозы опирались на эмпирические зависимости между метеорологическими условиями осеннего периода и началом ледообразования. Так, в работе Билелло представлены номограммы, позволяющие по данным о температуре воздуха прогнозировать дату появления первого льда и дату установления сплошного ледового покрова на водоёмах [Bilello, 1964]. Этот классический метод фактически использует сумму отрицательных температур воздуха как индикатор, при достижении которого начинаются ледовые явления на реке.

В рамках эмпирических моделей датой выпуска прогноза, как правило, считается момент устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через 0°C от положительных к отрицательным значениям. Такой подход предполагает установление зависимости между начальными тепловыми запасами водотока на дату прогноза и объёмом теплоотдачи, необходимым для охлаждения воды до точки начала ледообразования.

Температура воды в день (или накануне) перехода температуры воздуха через 0°C используется в качестве индикатора начального теплосодержания

реки. А в качестве меры теплоотдачи рассматривается сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха ($\sum t_{-}$), необходимая для начала формирования ледяного покрова [Георгиевский, 1986].

Установлено, что сумма отрицательной температуры воздуха пропорциональна начальному теплосодержанию водоёма, которое оценивается по температуре воды на момент прогноза. В качестве прогностического критерия используется нижняя огибающая эмпирической зависимости, что позволяет устранить завышение $\sum t_{-}$ при учёте температуры воздуха в день появления льда. Уточнение положения линии связи производится нанесением на график связи точек с отрицательной температурой воздуха и отсутствием льда.

При значительных изменениях уровня воды в период ледообразования эмпирическая зависимость может быть изменена за счёт учёта средней глубины потока и уровня воды. При отсутствии данных о температуре воды используется косвенная оценка температуры воды по средней температуре воздуха за несколько суток до перехода через 0 °С.

В отечественной науке были разработаны специализированные методы краткосрочного прогноза сроков установления ледостава. Как правило, они основывались на статистических корреляциях между метеорологическими условиями осеннего периода и датами замерзания водотоков. На основе многолетних рядов наблюдений строятся регрессионные уравнения, связывающие дату появления льда и накопление отрицательных температур воздуха; дату ледостава с критической температурой (суммой отрицательных температур воздуха, ниже которой устанавливается ледостав) [Руководство по гидрологическим..., 1989]. В ряде случаев применялся метод аналогов: подбирался год-аналог с схожими погодными условиями, и по смещению дат ледообразования в тот год оценивалась вероятная дата наступления ледостава в текущем сезоне. Указанные приёмы были изложены в руководящих документах Гидрометслужбы и к 1980-м годам получили широкое практическое применение.

Альтернативный и более строгий подход представлен в работах Л. Г. Шуляковского и основывается на расчетах теплового баланса водной поверхности. В этом подходе учитываются все основные компоненты теплообмена: приток тепла от солнечной радиации, эффективное излучение, потери или приход тепла, испарение или конденсацию влаги, турбулентный теплообмен с воздухом, удельный приход-расход тепла в связи с выпадением осадков. Появление льда связывается с моментом, когда средняя по глубине температура воды становится меньше температуры поверхностного слоя воды, необходимой для начала кристаллизации. Для расчета используются параметры течения (скорость, глубина), метеорологические условия и характеристики водоема. Расчетное уравнение не учитывает приток тепла от подземных вод [Шуляковский, 1960].

Расчётные формулы позволяют определять дату появления льда с учётом как локальных условий, так и динамики теплообмена в пределах рассматриваемого участка. Этот подход требует высокой детализации входных данных, но обеспечивает более универсальные и точные результаты, особенно на участках с отсутствием длительных рядов наблюдений или в условиях регулирования стока.

Формирование ледостава на реках представляет собой завершающую фазу осеннего ледообразования, которая характеризуется переходом от появления первичных ледовых явлений к установлению устойчивого ледяного покрова на поверхности реки. Этот процесс протекает поэтапно: после появления первых смерзающихся льдин в местах с низкой скоростью течения формируются временные перемычки, затем водная поверхность между ними постепенно заполняется льдом — устанавливается ледостав.

Интенсивность процесса зависит от комплекса факторов, включая скорость течения, геометрию русла и метеорологические условия. Наиболее важным параметром, характеризующим теплоотдачу потока и регулирующим скорость установления ледостава, выступает сумма среднесуточных отрицательных температур воздуха, накапливаемая с момента появления

плавучего льда до образования сплошного ледяного покрова. Эта сумма определяется в зависимости от уровня воды или скорости течения в день появления первого льда и выражается через эмпирическую зависимость:

$$\Sigma t_{-} = f(H_{л}) \quad (1.3.1)$$

На практике используется нижняя огибающая графика зависимости, отражающая минимальную сумму отрицательных температур воздуха, необходимую для перехода к ледоставу. Это позволяет повысить точность прогноза за счёт исключения аномально высоких значений сумм отрицательных температур воздуха, наблюдаемых в отдельные годы.

Следующим важным этапом прогноза является оценка критической температуры воздуха, при которой возможен переход к ледоставу. Она рассчитывается по эмпирическим зависимостям, построенным на основе анализа данных многолетних наблюдений, и связывается с уровнем воды водотока. Критическая температура позволяет учесть влияние текущих метеоусловий при прогнозе момента завершения ледообразования.

Для оперативного прогноза ледостава применяется алгоритм, при котором в день появления льда по ожидаемым температурам воздуха прогнозируется дата, к которой будет достигнута минимальная необходимая сумма отрицательных температур. При этом проверяется, не превышает ли среднесуточная температура воздуха в этот день критического значения. Если превышает, расчёт повторяется для следующей даты с учетом нового прогноза температуры воздуха.

Дополнительную практическую ценность представляет эмпирическая формула, предложенная Л. Г. Шуляковским для равнинных рек, позволяющая определить критическую температуру воздуха, при которой возможен ледостав [Шуляковский, 1960]:

$$t_{кр} = -\frac{v*b}{\Sigma t_{-}}, \quad (1.3.2)$$

где v — средняя скорость течения, b — средняя ширина реки, Σt_{-} — сумма отрицательных температур воздуха (используется со знаком «плюс» в

формуле). Важно отметить, что описанный метод применим преимущественно к равнинным рекам, где основное ледообразование происходит на поверхности. Для горных и полугорных рек, где доминирует внутриводное образование льда, прогноз требует иных подходов — в частности, анализа минимальных температур воздуха как прогностического критерия появления шуги.

В основе методов долгосрочных прогнозов характеристик ледового режима лежит исследование атмосферных процессов, обуславливающих ледовые явления, и выявления зависимости сроков ледовых явлений от количественных характеристик развития атмосферных процессов в предшествующие месяцы [Руководство по гидрологическим..., 1989]. В таких подходах используются как качественные, так и количественные параметры, включая различные индексы, отражающие региональные особенности атмосферной циркуляции (например, индекс меридианальности, индексы теплых и холодных аномалий и др.).

В начале разработки долгосрочных прогнозов идею о влиянии теплового состояния океана на процессы замерзания и вскрытия льда пытались реализовать Г.Р. Бергман [Бергман, 1941]. В дальнейшем с накоплением данных о температуре поверхности океана (ТПО) его идеи получили продолжение в работах М.И. Сильницкой, Б.М. Гинзбурга, С.В. Борща, Н.Д. Ефремовой и др. [Сильницкая, 1993; Гинзбург, Сильницкая, 1997; Метод фонового долгосрочного..., 1998; Гинзбург, Сильницкая, Полякова, 1999; Гинзбург, Сильницкая, 2000; Долгосрочный фоновый прогноз..., 2001; Методы фонового долгосрочного..., 2001; Методы долгосрочного и среднесрочного..., 2001; Гинзбург, Сильницкая, 2004].

Одними из первых методов долгосрочного прогнозирования, разработанных в начале 1940-х годов, были подходы, основанные на классификации атмосферной циркуляции, предложенной Г. Я. Вангенгеймом. Данная типизация опирается на выделение устойчивых форм циркуляционных

процессов, выявляемых на ежедневных высотных и приземных синоптических картах в атлантико-евразийском секторе северного полушария.

Тип W (зональная форма циркуляции) характеризуется преимущественно западным переносом воздушных масс, сопровождающимся малой амплитудой барических волн в тропосфере. В таких условиях в умеренных широтах наблюдаются положительные аномалии температуры и давления, в то время как в арктическом регионе преобладают отрицательные аномалии.

Формы С и Е (меридиональные типы циркуляции) различаются по локализации основных высотных гребней и ложбин. В случае формы С гребни формируются над Западной Европой и Сибирью, а ложбины — над Европейской территорией России (ЕТР). При форме Е картина распределения противоположная: гребни располагаются над ЕТР, а ложбины — над Западной Европой и Сибирью. Гребням соответствует преобладание антициклонических условий с положительными температурными и барическими аномалиями, тогда как ложбины ассоциированы с циклонической активностью и отрицательными аномалиями.

В рамках типологического подхода месяц классифицируется по преобладающему типу циркуляции — как определяющему признается тот, чья повторяемость превышает климатическую норму. В случаях, когда два типа циркуляции проявляются с превышением нормы, месяц трактуется как период смешанного типа, обозначаемого, например, как (W + C), (E + C) или (E + W).

Г. Я. Вангенгейм также установил наличие инерционных свойств в развитии макросиноптических процессов, что обуславливает статистически значимую преемственность между преобладающими типами циркуляции в смежные месяцы. Это обстоятельство позволяет использовать характеристики воздушных масс предшествующего периода в качестве прогностической основы для оценки метеорологических условий последующего периода, в том числе для прогнозирования сроков наступления фаз ледового режима водных объектов.

Анализ крупномасштабных атмосферных процессов, обуславливающих раннее формирование ледяного покрова в северо-восточной части России, показал, что решающую роль в этом процессе играет вторжение арктических воздушных масс, вызывающее резкое понижение температуры. Напротив, позднее наступление ледовых явлений связано с преобладанием западного и юго-западного переноса теплых воздушных масс [Георгиевский, Шаночкин, 2007].

С целью количественной оценки направленности переноса воздушных масс был предложен так называемый индекс меридианальности, разработанный Х. П. Погосьяном и Е. И. Савченковой. Данный индекс получил широкое распространение и используется в ряде методических подходов к прогнозированию. Он рассчитывается на основе анализа геопотенциальных полей на уровне 500 гПа (H500), представленных в виде изобарических карт.

Для определения значения индекса выделяются два сферических прямоугольника: первый расположен к западу от исследуемого бассейна, второй охватывает непосредственно сам бассейн. В каждом из них вычисляется среднее значение геопотенциала. Индекс меридианальности (I_m) определяется как разность между средней высотой в восточном прямоугольнике (H_a) и в западном (H_z).

При преобладании западного (зонального) переноса воздушных масс индекс принимает значения, близкие к нулю. Положительные значения $I_m > 0$ свидетельствуют о меридиональном переносе с севера или северо-запада, тогда как отрицательные значения $I_m < 0$ указывают на наличие южной составляющей в циркуляции.

В дополнение к индексу меридианальности используется также индекс барической топографии (I_t), рассчитываемый по аналогичной методике, но на основе карт относительной барической топографии. Этот индекс отражает среднюю температуру воздуха в 5-километровом слое тропосферы и позволяет дополнительно уточнить характеристики термического режима, предопределяющего сроки начала ледообразования.

С использованием характеристик атмосферной циркуляции Е.И. Савченковой и Н.Д. Ефремовой был разработан метод долгосрочных прогнозов ледовых явлений для некоторых рек, расположенных в различных регионах Российской Федерации [Савченкова, 1970; Современные принципы разработки..., 1973].

Были получены комплексные зависимости и разработаны методы прогноза для сроков осенних ледовых явлений по 14 гидрологическим районам и 8 участкам водохранилищ [Метод фонового долгосрочного..., 1998].

Начиная с 1990-х годов, актуальность прогнозирования ледовых явлений возросла, в том числе в связи с изменением климата. Потепление в большинстве регионов России привело к более позднему формированию ледостава и сокращению его продолжительности. Современные наблюдения фиксируют смещение дат замерзания на более поздние сроки и уменьшение максимальной толщины льда во многих реках Арктики [Вуглинский, 2014; Агафонова, Банщикова, 2022; Антропогенные и климатически обусловленные..., 2018; Землянскова, Нестерова, Макарьева, 2021]. Так, в верховьях Енисея за вторую половину XX века отмечено сокращение длительности ледового покрова и другие изменения ледового режима [Паромов, Шантыкова, 2010]. В европейской части Арктики фиксируется учащение опасных явлений, таких как осенние ледовые заторы и образование полыньи во время кратковременных зимних оттепелей [Ледовый режим и опасные..., 2016].

Перспективные методы прогноза ледового режима рек и озер учитывают современные климатические изменения. Появились работы, посвящённые долгосрочным прогнозам в контексте различных климатических сценариев. Например, Б. М. Гинзбург проанализировал изменения сроков установления ледостава к концу XX века и сделал вывод о вероятном дальнейшем сокращении продолжительности ледового периода в XXI веке [Гинзбург, 2005]. В последнее десятилетие активно используются данные

дистанционного зондирования: спутниковые наблюдения за ледовой обстановкой позволяют отслеживать формирование льда в реальном времени и уточнять прогнозы появления ледовых явлений на труднодоступных реках Севера [Remote sensing of lake..., 2015]. Также разрабатываются численные модели ледового режима, в том числе гидродинамические модели рек, способные предсказывать процессы ледообразования и вскрытия на основе метеорологических прогнозов. Однако в российской научной литературе подчёркивается, что надёжность подобных моделей в значительной степени зависит от качества исходных данных и учёта местной специфики формирования ледяного покрова [Ледовый режим и опасные..., 2016]. Поэтому комбинированный подход — совмещение статистических методов с современными технологиями наблюдения и моделирования — рассматривается как наиболее перспективное направление развития систем прогнозирования ледового режима рек в Арктической зоне России.

Вопросам заблаговременности, точности прогнозов посвящена работа Борща С.В., Симонова Ю.А. и Христофорова А.В. [Борщ, Симонов, Христофоров, 2024].

Современные исследования позволяют совершенствовать методы прогнозирования на основе как статистических, так и физико-математических моделей. Развитие вычислительной техники и большие массивы данных позволяют применять новые подходы к прогнозу ледовых явлений. Одно из направлений связано с использованием моделей теплового баланса и термодинамики льда, которые рассчитывают рост льда во времени на основе метеорологических параметров. Подобные модели способны отображать динамику накопления ледяного покрова и составлять прогноз толщины льда и сроков установления ледостава при различных погодных сценариях. Другое направление — статистическое и машинное обучение — обрело популярность в последнее десятилетие. Нейронные сети, методы градиентного бустинга и другие алгоритмы задействуются для прогнозирования фаз ледового цикла по многопараметрическим данным. К примеру, в недавней работе Graf R. и

соавторов реализовано прогнозирование категорий ледовых явлений (замерзание, устойчивый ледостав, разрушение покрова) с помощью нейросети и метода XGBoost. Модель успешно обучена на данных многолетних наблюдений (температура воздуха и воды, расход и уровень воды, предшествующие ледовые явления) и показала высокую точность в определении начала замерзания реки [Graf, Kolerski, Zhu, 2022]. Подобные подходы позволяют автоматизировать прогноз на основе большого числа факторов, учитывая нелинейные связи между гидрометеорологическими условиями и ледовым режимом. Отмечается, что методы машинного обучения способны предсказывать как сам факт наступления ледостава, так и продолжительность последующего ледостава с точностью, сравнимой с традиционными способами.

Таким образом, прогнозирование дат установления ледостава и появления первичных ледовых явлений в настоящее время опирается на сочетание классических эмпирических знаний и современных технологий. Традиционные методы, проверенные десятилетиями практики, обеспечивают базис для оценки ожидаемых сроков начала зимнего периода на реках. Новейшие подходы – от математических моделей теплообмена до искусственного интеллекта – призваны повысить точность и заблаговременность таких прогнозов. Учитывая продолжающееся изменение климата, адаптация методов прогнозирования приобретает особую актуальность. Современные научные работы, объединяющие опыт российских и зарубежных исследователей, формируют единое поле знаний, необходимое для успешного решения задачи прогнозирования ледовых явлений на реках Арктической зоны.

Глава 2. Климатическая характеристика Кольского полуострова

2.1. Общие сведения о климате Кольского полуострова

Кольский полуостров расположен на крайнем северо-западе России, большей частью за Полярным кругом. Он омывается водами Баренцева моря с севера и Белого моря с юго-востока. Климат региона характеризуется как субарктический и носит переходный характер от морского к континентальному. Формирование климатических условий полуострова определяется взаимодействием атлантических и арктических воздушных масс. Существенное влияние оказывает Северо-Атлантическое течение (ответвление Гольфстрима), что приводит к относительно мягким зимам в прибрежной зоне, где акватория моря остаётся свободной ото льда на протяжении всего холодного периода. Контраст между прогретыми морскими водами и охлаждённой сушей способствует усилению ветровой активности, особенно зимой, когда преобладают атлантические циклоны, приносящие осадки. Летом усиливается влияние антициклонов восточного происхождения. Ветровой режим региона проявляет признаки муссонности: зимой доминируют южные и юго-западные ветры, летом — восточные. Среднегодовое количество дней со штормовыми ветрами варьирует от 80 до 120, что указывает на высокую циркуляционную активность атмосферы. В зимний период не исключено влияние арктических масс, приносящих резкое понижение температуры.

Зимний период на Кольском полуострове характеризуется устойчивыми отрицательными температурами. Средняя температура холодного периода составляет около $-6,0$ °С. Абсолютные минимумы температуры на побережье фиксируются в пределах $-35...-40$ °С, а во внутренних районах могут опускаться до -50 °С.

Внутренняя часть полуострова отличается более суровым климатом в сравнении с побережьем, где морские воды смягчают температурные экстремумы. Среднегодовая температура воздуха в прибрежных районах

близка к 0 °С, а на большей части территории имеет отрицательные значения [Изменения и изменчивость климата..., 2012]. Климатические условия определяют специфику природных зон региона: южные территории покрыты северной тайгой, тогда как северная часть занята тундрой. В пределах тундровых ландшафтов распространена многолетняя мерзлота.

Кольский полуостров отличается сравнительно высоким уровнем атмосферных осадков для северных широт. Среднегодовое их количество составляет 500–600 мм, увеличиваясь до 600–700 мм в прибрежных районах и до 1000 мм в горных областях [Климат России, 2001]. Основным максимум выпадения осадков приходится на август — октябрь, минимальные значения регистрируются в марте — апреле. В зимний период осадки, как правило, выпадают в твердой фазе. Устойчивый снежный покров формируется в октябре—ноябре и сохраняется до апреля—мая. В условиях горных тундр снежный покров может сохраняться до восьми месяцев в году. Зимой, особенно в прибрежной зоне, часты оттепели, сопровождающиеся дождями. Внутри полуострова зимний сезон характеризуется большей стабильностью и меньшим количеством осадков. В течение года фиксируется от 100 до 130 дней с метелями и интенсивными снегопадами. В летний период осадки могут носить ливневый характер, что в условиях малой испаряемости способствует заболачиванию территории.

2.2. Климатические изменения Кольского полуострова

Климат Кольского полуострова, как и в целом на севере Российской Федерации, претерпевает заметные изменения. Многолетние метеорологические наблюдения показывают отчетливый тренд к повышению температуры воздуха. За последние ~50 лет среднегодовая температура воздуха в рассматриваемом регионе увеличилась примерно на 2,3 °С [Marshall, Vignols, Rees, 2016]. Увеличение температуры воздуха на Кольском полуострове характерно для всех сезонов года. Так в работе Шиловцева и Романенко были проанализированы многолетние изменения температуры

воздуха в районе Белого моря. На станциях северного и восточного побережий Кольского полуострова отмечается потепление во все сезоны, тогда как на южном побережье Белого моря наблюдается небольшое охлаждение во все сезоны, кроме весны [Романенко, Шиловцева, 2006]. Рост температуры воздуха также наблюдается и в центральной части Кольского полуострова. В работе [Demin, Zyuzin, 2006] указано, что увеличение температуры воздуха составляет более чем 1°C с 1962 по 2005 гг. Увеличение температуры воздуха произошло неравномерно как по территории, так и по сезону, а также по характерным значениям температуры, что иллюстрирует сложность процессов, происходящих в системе океан–атмосфера–суша и невозможность объяснения причин потепления климата теорией только антропогенного воздействия. Неравномерное повышение температуры воздуха может свидетельствовать об усилении циклонической деятельности в Северном полушарии. Традиционно изменения циркуляции связывают с атмосферными колебаниями и Южной осцилляцией, причина изменения которых кроется не только в антропогенном влиянии, но и в солнечно–земных связях. При этом нет однозначного ответа на вопрос о реальных механизмах формирования изменений в атмосферной циркуляции [Топтунова, Анискина, 2015].

Наряду с температурой, изменяются и характеристики атмосферных осадков. По данным метеостанций, общее годовое количество осадков на Кольском полуострове в последние десятилетия статистически существенно не изменилось. Однако изменилась внутригодовая структура их выпадения: весной стало существенно более влажно, тогда как осенью наблюдается некоторое снижение осадков. Увеличение весенних осадков связывают с изменениями циркуляции – ослаблением в последнее время весенних антициклонов и общим понижением давления, что приносит больше циклонов и влажных масс. В то же время уменьшение осенних осадков может быть связано с изменениями в Атлантике и сокращением поступления влаги в этот сезон. Следует отметить, что общее количество дней с осадками и их интенсивность могут меняться неравномерно. В частности, отмечаются более

частые случаи сильных ливней в тёплый период и одновременно сокращение продолжительности устойчивого снежного покрова из-за более раннего весеннего таяния. Так, по данным наблюдений в центральной части региона, окончание периода снежного покрова сдвинулось на 10–15 дней раньше по сравнению с серединой XX века. Важным проявлением изменения климата является изменение частоты и интенсивности экстремальных метеорологических явлений. Для арктических регионов потепление климата зачастую приводит к учащению аномальных погодных ситуаций. В Мурманской области за последнее десятилетие зафиксировано двукратное увеличение числа опасных гидрометеорологических явлений (штормов, сильных осадков, экстремальных температур и др.). Более мягкие зимы означают не только повышение средних значений температуры, но и уменьшение числа экстремально холодных событий, что снижает некоторые климатические риски (например, реже наблюдаются крайне сильные морозы и связанные с ними явления). С другой стороны, общее повышение влажности и температуры может усиливать другие риски: чаще стали фиксироваться зимние оттепели и гололёдные явления, случаются рекордно тёплые дни даже в холодное время года. Например, в отдельные годы наблюдались эпизоды дождя в разгар зимы на фоне аномального потепления воздуха до оттепели. Летом возрастает вероятность сильных ливней и шторма. В целом, возрастание частоты опасных погодных явлений на Кольском полуострове соответствует наблюдаемой тенденции по всей России, где число опасных метеорологических явлений за последние десятилетия существенно возросло. Климатическая система региона становится более подвижной и контрастной: тёплые и холодные воздушные массы чаще чередуются, что приводит к более резким перепадам температуры и осадков. По оценкам, дальнейшее потепление в Арктике может привести к ещё большей изменчивости погоды и необходимости адаптации к новым климатическим условиям. В третьем отчете Росгидромета об изменении климата на территории Российской Федерации ожидается дальнейший рост средней годовой температуры

воздуха. Для Арктической зоны отмечается уменьшение средней годовой амплитуды экстремальной температуры воздуха за счет опережения роста минимальной суточной температуры воздуха нах максимальной суточной (рис. 2.2.1).

На протяжении XXI века ожидается рост количества осадков зимой на всей территории Российской Федерации [Третий оценочный доклад..., 2022]. Прогнозируется сокращение площади снежного покрова, а уменьшение зоны распространения вечной мерзлоты, по оценкам ряда климатических сценариев, может составить от 40 % до 72 % — в зависимости от сценария (SSP2-4.5 и SSP5-8.5, соответственно).

Особенности крупномасштабных колебаний атмосферной циркуляции и связанных с ними климатическими изменениями тесно связана с решением задачи долгосрочных и сверхдолгосрочных метеорологических прогнозов [Савичев, Мироничева, Цепелев, 2015] и, в вследствие, долгосрочных прогнозов сроков появления осенних ледовых явлений. Для анализа изменчивости крупномасштабных синоптических процессов использована классификации форм атмосферной циркуляции Вангенгейма-Гирса. В основу классификации положено понятие элементарного синоптического процесса [Вангенгейм, 1933]. По характеру преобладающих тропосферных переносов были выделены три формы атмосферной циркуляции: западная – W, восточная – E и меридиональная – C [Вангенгейм, 1938]. В 1948 г. А. А. Гирс исследовал вертикальную организацию форм макропроцессов W, E и C и показал, что каждой форме атмосферной циркуляции соответствует специфический набор макродеформационных полей. Форме W присущ зональный режим: в тропосфере доминируют малоамплитудные волны, быстро смещающиеся с запада на восток. Формы E и C отражают меридиональный режим, для которого характерны стационарные крупноамплитудные волны в тропосфере.

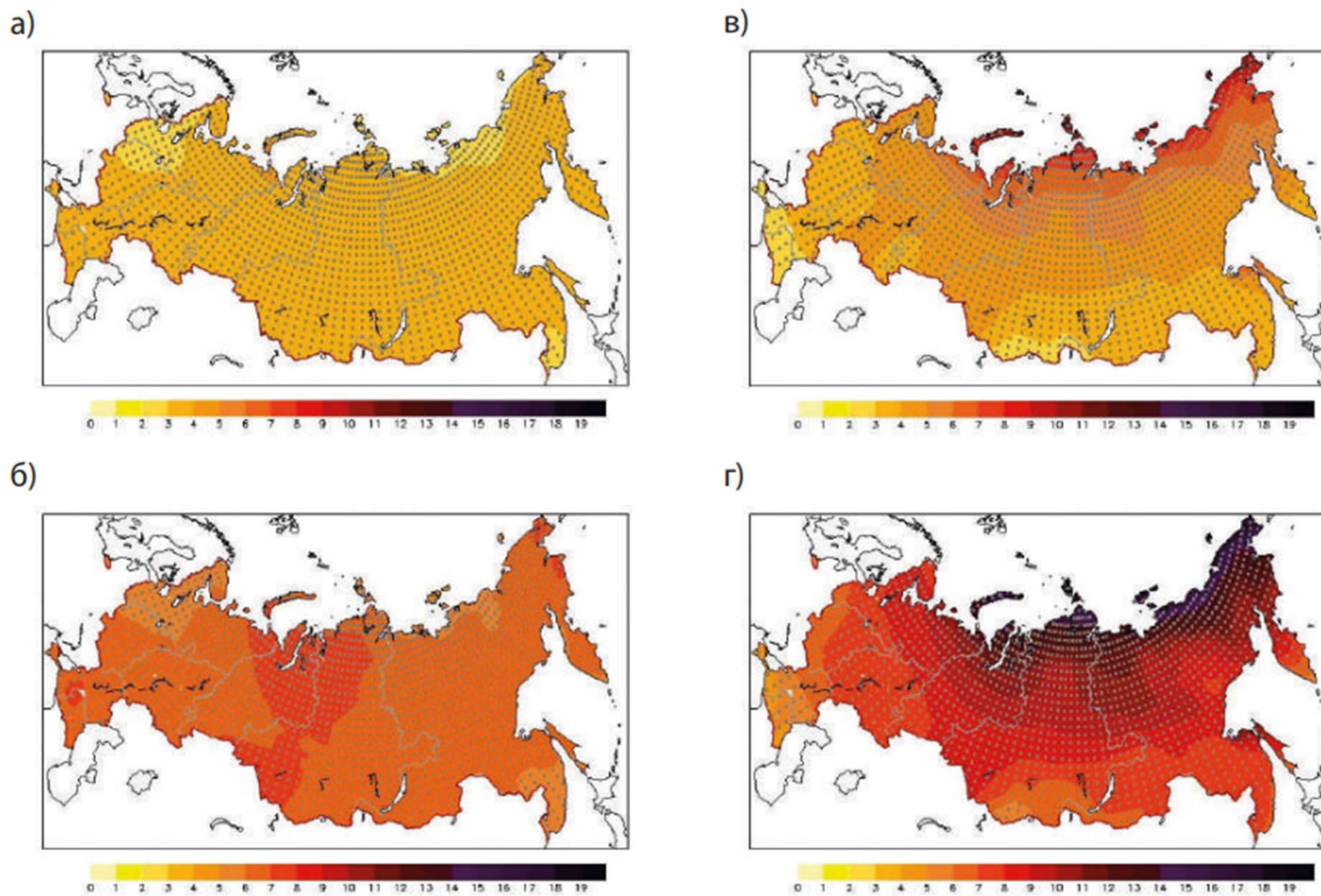


Рисунок 2.2.1. Изменения средней сезонной температуры приземного воздуха в период 2081-2100 гг. по отношению к периоду 1995-2014 гг. летом (а, б) и зимой (в, г) [Третий оценочный доклад..., 2022]

Географические положения высотных гребней и ложбин при формах (E) и (C) взаимно противоположны: там, где при (E) фиксируется гребень, при (C) располагается ложбина, и наоборот. Анализ повторяемости типов атмосферной циркуляции, характерной для Кольского полуострова за многолетний период позволил установить преобладание восточного переноса (E) в периоды 1929 – 1939 гг., 1966 – 1990 гг. (рис. 2.2.2.). Преобладание меридиональной формы переноса (C) наблюдалось в период с 1940 по 1948 годы, смешанный тип (E+C) наблюдался в 1949 – 1965 годы. С 1990 года и по настоящее время характеризуется преобладанием западного переноса (W) [Савичев, Мироничева, Цепелев, 2015].

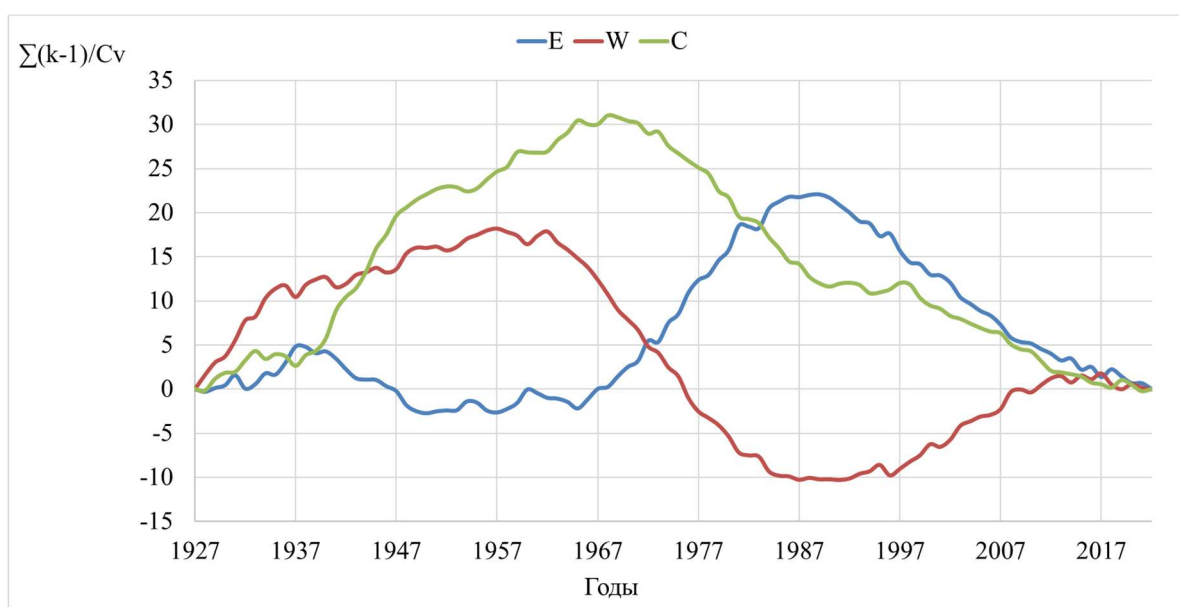


Рисунок 2.2.2. Интегральная кривая типов атмосферной циркуляции

В результате статистических обобщений выявлено, что формы циркуляции атмосферы имеют закономерности преобразования и преемственности. После развития периода западной циркуляции следует развитие восточной формы, которая сменяется периодом с преобладающей меридиональной составляющей. В результате анализа типов циркуляции атмосферы были выделены сценарии смены форм атмосферной циркуляции для раннего и позднего замерзания рек и озер Мурманской области [Методика долгосрочного прогноза ..., 1972]. Таким образом, перед ранним замерзанием

в первом полугодии преобладают меридиональные процессы в сочетании с восточным переносом, в июне преобладает западный тип, в июле – восточный с максимумом развития в августе. В сентябре несмотря на преобладание восточного переноса усиливается меридиональный тип с наибольшим влиянием в октябре, что приводит к ранним похолоданиям. Позднее замерзание характеризуется преобладанием восточной формы циркуляции в первом полугодии. В июне преобладают типы W и C, в июле четкого преобладания какого-либо типа не наблюдается. В сентябре преобладает меридиональный тип, который к октябрю сменяется сочетанием всех типов. Таким образом, общности процессов как для лет с ранним замерзанием не наблюдается [Методика долгосрочного прогноза ..., 1972].

На основе полученных результатов можно выделить основные этапы повторяемости форм циркуляции. Для периода установления ледостава 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 E отмечается в июне и сентябре–октябре (рис. 2.2.3.).

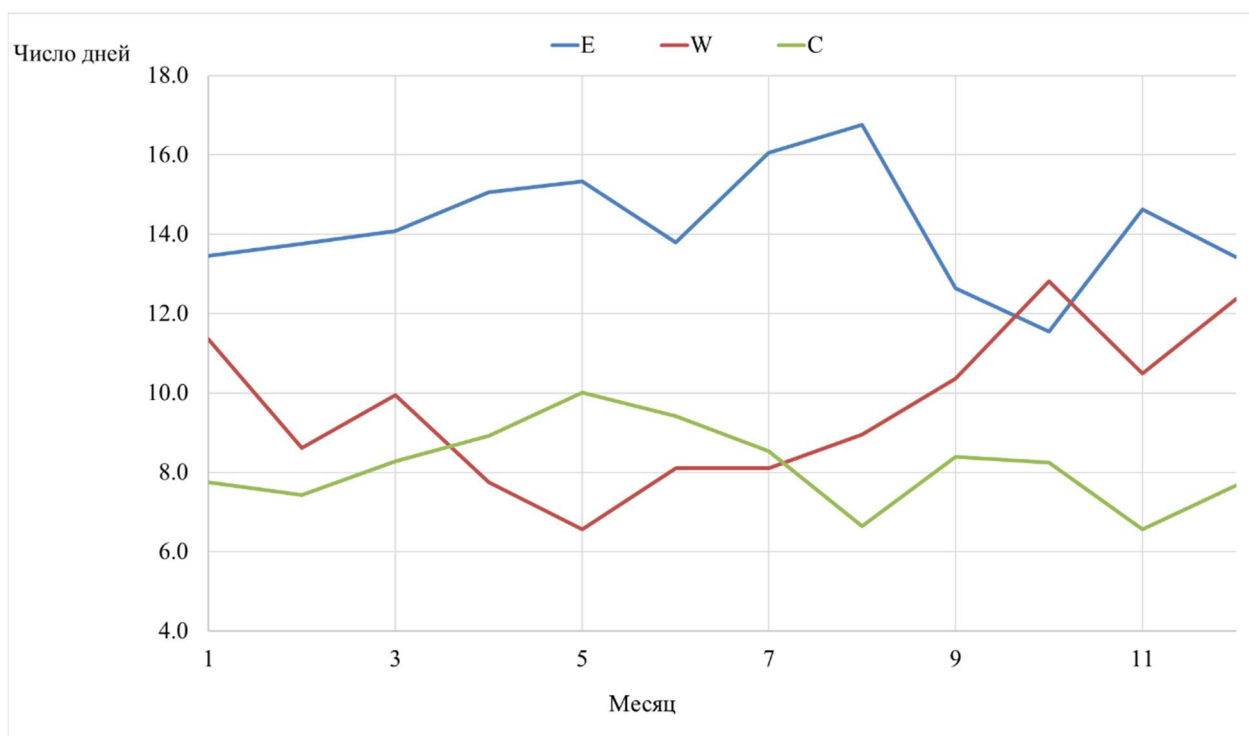


Рисунок 2.2.3. Среднее многолетнее изменение индексов циркуляции атмосферы [Савичев, Мироничева, Цепелев, 2015]

2.3. Многолетние колебания температуры воздуха за холодный период

Анализ многолетних изменений температуры воздуха в холодный сезон имеет важное значение для изучения ледового режима рек, поскольку именно эти изменения во многом определяют климатические изменения, а значит, и особенности формирования ледовых явлений, включая их продолжительность и характер. При этом для большей части эмпирических и теоретических прогнозных зависимостей для сроков появления ледовых явлений и установления ледостава температура воздуха за холодный период является ключевым предиктором.

Для оценки влияния температуры воздуха на сроки формирования ледовых явлений был рассчитан индекс суровости зимы (ИСЗ), который позволяет оценить зимние условия относительно синоптических. В литературе данный индекс встречается под названием сумма градусо-дней мороза (СГДМ) и используется для оценки изменения дат появления ледяного покрова,

толщины льда, темпов его накопления, промерзания и др. под влиянием изменяющегося климата [Гидрометеорология и гидрохимия морей..., 1990; Тимофеева А. Б., Шаратунова, 2021; Interannual variability of..., 2022].

В данной работе в качестве индекса суровости зимы принята сумма отрицательных температур воздуха за холодный период по 26 метеорологическим станциям Кольского полуострова с 1900 по 2021 годы.

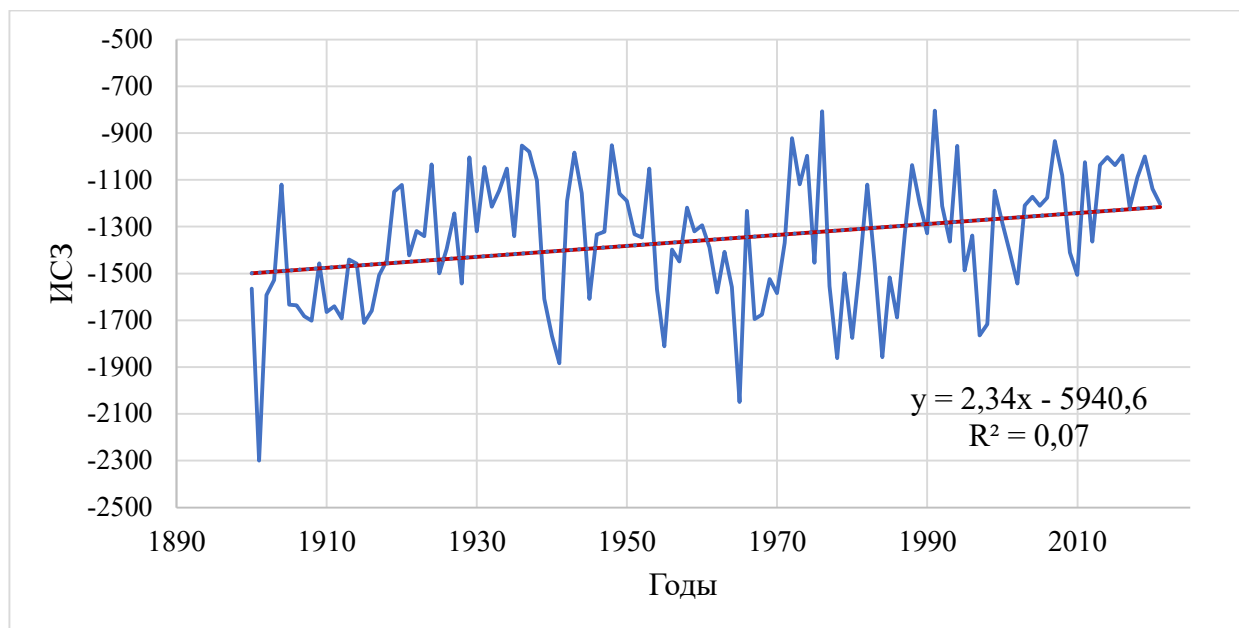
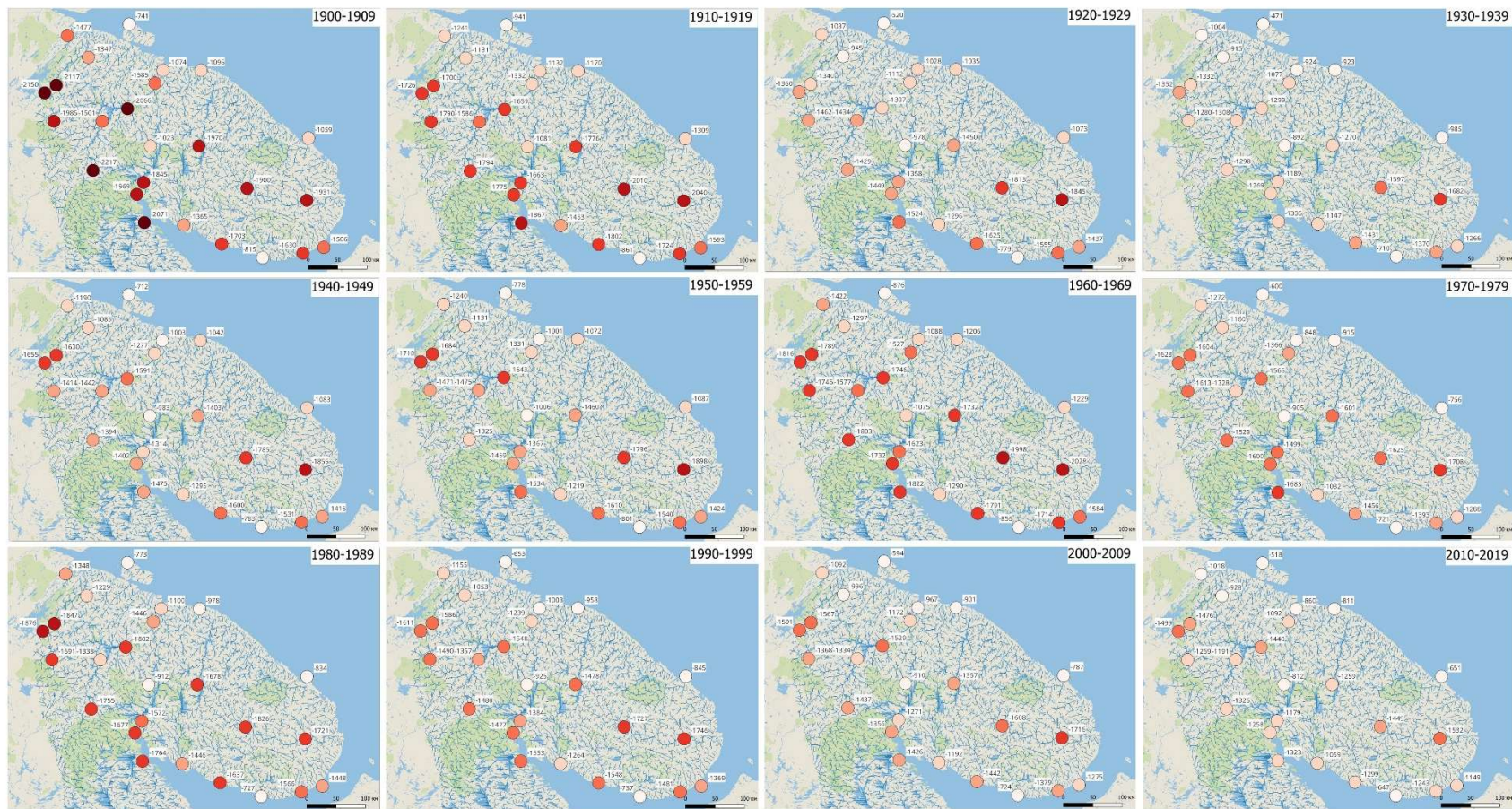


Рисунок 2.3.1. Средние многолетние индексы суровости зимы для Кольского Полуострова

Для более детального анализа, учитывая цикличность атмосферных процессов, был выполнен анализ пространственно-временной изменчивости ИСЗ по десятилетиям.

Пространственный анализ изменения индекса суровости зимы показал наибольшее изменение сумм отрицательных температур воздуха в центральной части Кольского полуострова. В прибрежных районах за счет влияния теплых течений Баренцева и Белых морей наблюдается уменьшение сумм отрицательной температуры воздуха, хотя и не так акцентировано, как внутри полуострова (рис. 2.3.2.).

По результатам анализа можно заключить статистически значимое увеличение сумм отрицательных температур воздуха по большинству метеорологических станций в среднем на 58°C (рис. 2.3.1).



Условные обозначения

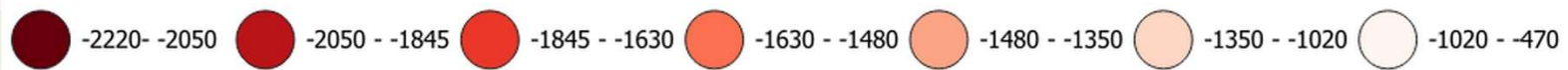


Рисунок 2.3.2. Пространственно-временная изменчивость индекса суровости зимы.

Также была выявлена цикличность в рассчитанных индексах суровости зимы. За рассматриваемый период можно выделить два основных цикла смены преобладающих мягких и суровых холодных периодов с 1899-1953 гг. и с 1954-2019 гг. С 1960 года можно выделить три цикла изменения индекса суровости зимы средней продолжительностью около 16 лет (рис. 2.3.3.).

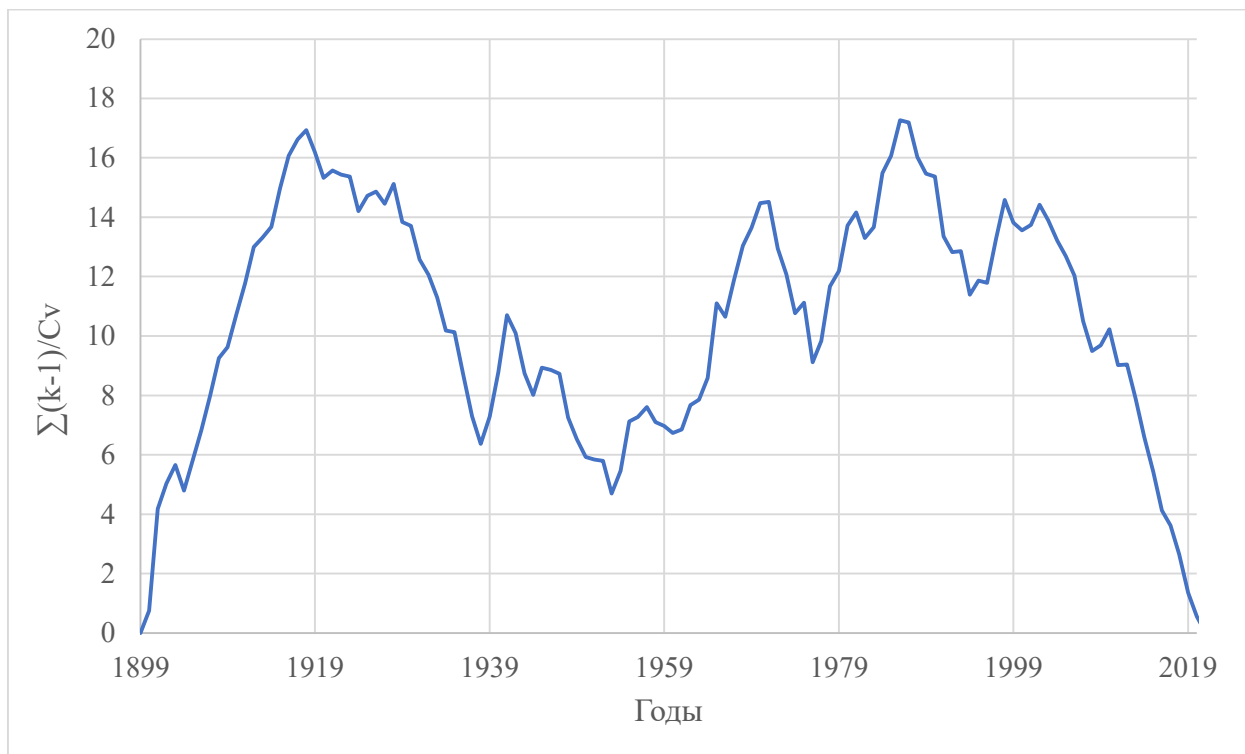


Рисунок 2.3.3. Разностно-интегральная кривая индекса суровости зимы для Кольского полуострова

Начало ветви подъема разностно-интегральной кривой в конце 1910-х гг. и в 1990-х гг. обусловлены не локальными причинами, а особенностями крупномасштабной климатической изменчивости в Северо-Атлантическом секторе. Максимум конца 1910-х гг. отражает завершение холодной фазы перед ранним арктическим потеплением 1920–1940-х гг., тогда как участок 1990-х гг. связан с накопленным эффектом последовательности более суровых зим на фоне изменения преобладающего типа атмосферной циркуляции.

Для анализа процессов формирования первичных ледовых явлений, установления ледостава и общей продолжительности замерзания ключевое значение имеет характеристика температурного режима в период, предшествующий и сопровождающий начало ледовых процессов. С этой

целью был использован индекс условий замерзания, основанный на сумме отрицательных среднемесячных температур воздуха, отражающий вклад каждого месяца в формирование указанных стадий ледового режима. Индекс условий замерзания (ИУЗ) схож с индексом суровости зимы и основан на СГДМ. В данной работе в качестве ИУЗ используется сумма отрицательной температуры воздуха за каждый месяц за период появления первичных ледовых явлений и формирования ледостава [Доклад об особенностях климата..., 2025; River-ice break-up..., 2007; Graf, Tomczyk, 2018].

По всем метеостанциям за многолетний период с 1841 по 2024 год прослеживается общий положительный тренд. Вместе с тем внутри этого интервала выделяются холодные периоды с отрицательной динамикой (в частности, 1841–1868 гг.), а также годы с экстремально низкими значениями индексов условий замерзания (табл. 2.3.1). В расчёт индексов включены суммы отрицательных температур за октябрь. В этом месяце среднесуточная температура воздуха, как правило, лишь незначительно ниже 0 °С, чего достаточно для начала переохлаждения воды и формирования первичных ядер кристаллизации.

Сравнительный анализ индексов условий замерзания октября за различные периоды показал, что тренд незначим. Наименьшее значение наблюдалось в 1903 году $\sum(-T_x)_{\min} = -7,3^\circ\text{C}$, наибольшее - 2008 г., $\sum(-T_x)_{\max} = 0^\circ\text{C}$, среднее значение $\sum(-T_x)_{\text{cp}} = -0,6^\circ\text{C}$.

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.

Таблица 2.3.1.

Характеристики индекса условий замерзания с октября по январь за период 1841-2024 гг.

октябрь						
периоды		1841-1868	1869-1930	1930-1979	1980-2024	1840-2024
ИУЗ	минимальный	-4,8	-7,3	-3,4	-3,9	-7,3
	максимальный	-0,4	-0,3	-0,1	0	0
	средний	-0,8	-0,8	-0,6	-0,4	-0,6
	Δ	-0,8	0,4	-0,8	0,3	0,5
тренд	Положительный отрицательный	-	+	-	+	+
	Значимый/ незначимый	Незначим	Незначим	Незначим	Незначим	Незначим
ноябрь						
периоды		1841-1868	1869-1930	1930-1979	1980-2024	1840-2024
ИУЗ	минимальный	-14,4	-21,3	-11,3	-12,1	-21,3
	максимальный	-2,5	-2,5	-2,1	-1,6	-1,6
	средний	-8,3	-8,2	-5,1	-4,8	-6,6
	Δ	-3,5	4,1	-4,3	3,8	5
тренд	Положительный отрицательный	-	+	-	+	+
	Значимый/ незначимый	Значим	значим	значим	значим	значим
декабрь						
периоды		1841-1868	1869-1930	1930-1979	1980-2024	1840-2024
ИУЗ	минимальный	-28,3	-32,8	-27	-20,8	-32,8
	максимальный	-8,4	-6,1	-13,6	-5,5	-5,5
	средний	-18,1	-18,9	-13,6	-13,3	-16,1
	Δ	-4,5	8,5	-7	7,9	-8,7
тренд	Положительный отрицательный	-	+	-	+	+
	Значимый незначимый	Значим	значим	значим	значим	значим
январь						
периоды		1841-1868	1869-1930	1930-1979	1980-2024	1840-2024
ИУЗ	минимальный	-41,4	-47,4	-36,3	-33	-47,4
	максимальный	-18,3	-12	-13,1	-11,9	-11,9
	средний	-29,3	-29,3	-23,6	-20,4	-26,2
	Δ	-10	-24,2	-28,1	-17	-20,9
тренд	Положительный отрицательный	-	+	-	+	+
	Значимый /незначимый	Значим	значим	значим	значим	значим

В ноябре происходит постепенное накопление сумм отрицательных температур воздуха, достаточных для формирования первичных ледовых явлений – заберегов, шуги. При $\sum(-T_{X-XI}) = -10^{\circ}\text{C}$ ледовые явления будут носить устойчивый характер, в первом периоде в 56% случаев, во втором – 63%, а в третьем и четвертом 28% и 24% случаев. Таким образом, потепление ноябрьских температур привело к тому, что первичные ледовые явления неустойчивы.

Сравнительный анализ индексов условий замерзания ноября за различные периоды показал, что тренд значим. Наименьшее значение наблюдалось в 1865 году $\sum(-T_{X-XI})_{\min} = -21,3^{\circ}\text{C}$, наибольшее – 2021 г., $\sum(-T_{X-XI})_{\max} = 1,6^{\circ}\text{C}$, среднее значение $\sum(-T_{X-XI})_{\text{cp}} = -6,6^{\circ}\text{C}$.

В декабре, в зависимости от особенностей морфологического строения русел рек Кольского полуострова, когда на озерных и равнинных участках уже будет наблюдаться интенсивное нарастание толщины льды в условиях сплошного ледостава, на перекатах и участках с значительными уклонами могут наблюдаться открытые участки реки с интенсивным шугообразованием и участки с неполным ледоставом, промоинами и разводьями, а для формирования сплошного ледостава требуется значительное накопление сумм отрицательных температур. Сравнительный анализ индексов условий замерзания на декабрь за различные периоды показал, что тренд значим. Наименьшее значение наблюдалось в 1868 году $\sum(-T_{X-XII})_{\min} = -32,8^{\circ}\text{C}$, наибольшее - 2008 г., $\sum(-T_{X-XII})_{\max} = 0^{\circ}\text{C}$, среднее значение $\sum(-T_{X-XII})_{\text{cp}} = -0,6^{\circ}\text{C}$ в декабре при $\sum(-T_{X-XII}) = -15^{\circ}\text{C}$ ледостав будет сплошным, в первом периоде в 75% случаев, во втором – 77%, а в третьем и четвертом – 47% и 40% случаев. Таким образом потепление декабрьских температур привело к тому, что ледостав все чаще носит несплошной характер, лед торосится и включает в себя значительное количество шуги.

Анализ данных о ледовых явлениях за современный период (1980-2024гг.) показал, что в отдельные годы ледостав может формироваться только

в январе, поэтому в общий расчетный период индекса условий замерзания был включен и январь.

Сравнительный анализ индексов условий замерзания января за различные периоды показал, что тренд значим. Наименьшее значение наблюдалось в 1868 году $\sum(-T_{X-XII})_{\min}=-47,7^{\circ}\text{C}$, наибольшее – 2008 г. $\sum(-T)_{\max}=11,9^{\circ}\text{C}$, среднее значение $\sum(-T)_{\text{cp}}=-26,2^{\circ}\text{C}$. (рис. 2.3.4.).

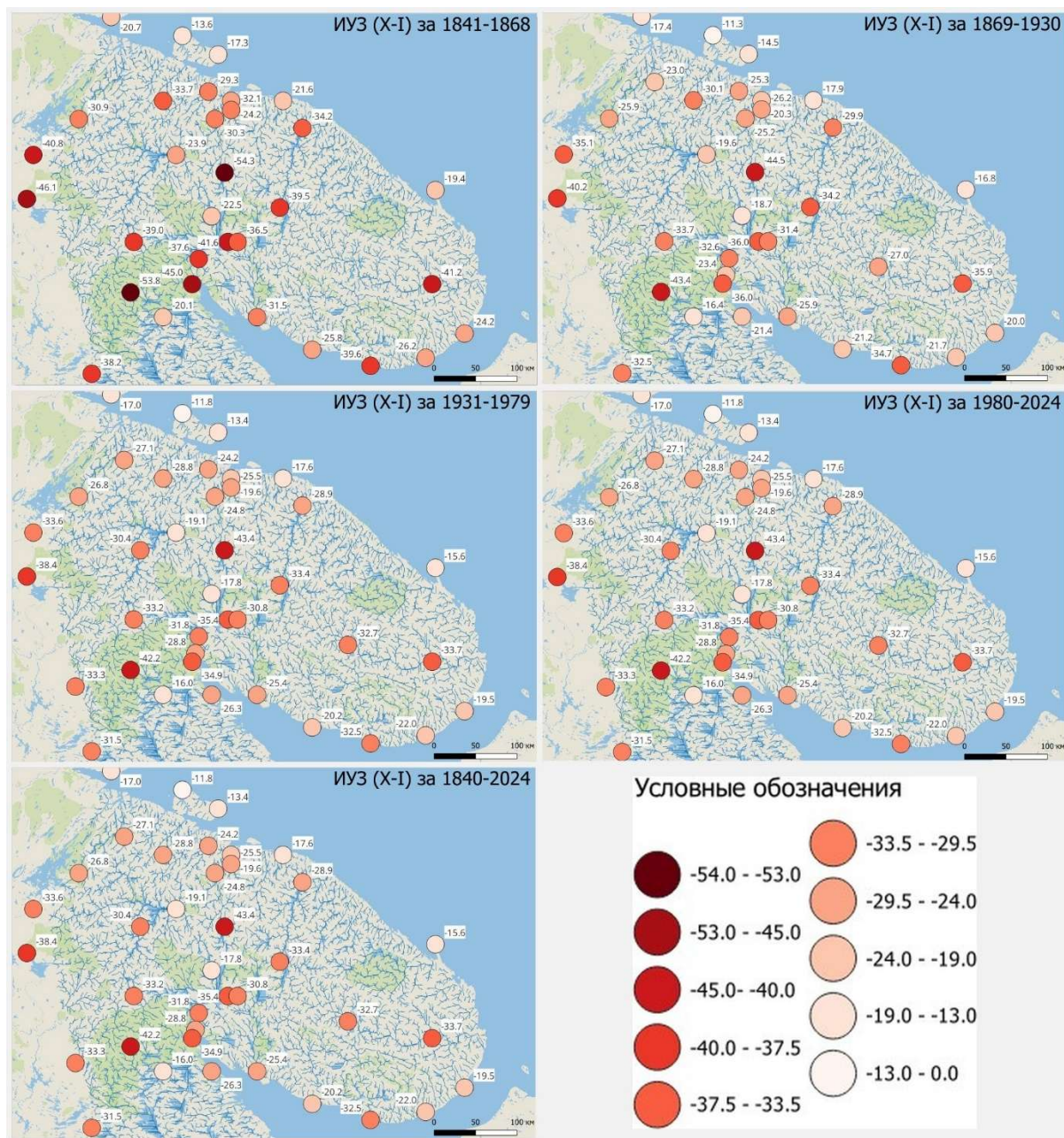


Рисунок 2.3.4 – Распределение индекса условий замерзания, октябрь-январь

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

В зависимости от сочетания последовательности условий замерзания за каждый месяц значения сумм отрицательных температур воздуха по месяцам (индекс условий 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). Для градации на суровые умеренные и теплые месяца (периоды) наибольшие отклонения от средней многолетней суммы температур за период формирования ледовых явлений, как в сторону максимальных, так и в сторону минимальных значений поделены на три части за каждый месяц. Градация выполнена по следующему алгоритму: расчет сумм отрицательных температур за период, расчет среднемноголетнего, максимального и минимального значения, предельные пороговые значения. 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.

В многолетнем разрезе наибольшее число случаев, когда все индексы условий замерзания за каждый месяц относятся к (X тип) умеренному типу приходится 52% (95 случаев), 10% - II тип, по одному числу случаев (0,5%) приходится на типы IX, VII, VIII, XIV, XIX, XV, XVI, XVII, XVIII. В таблице 2.3.2 приведены характеристики всех типов ИУЗ.

Таблица 2.3.2.

Типизация ИУЗ и видов ледовых явлений.

тип ИУЗ	X	III	VI	II	V	XII	I	V	XI	XIII	IX	VII	VIII	XIV	XIX	XV	XVI	XVII	XVIII	
число случаев	95	19	16	15	13	5	3						1							
% от общего числа	52	10	8,7	8,2	7,1	2,7	1,6						0,5							
тип ИУЗ *	октябрь	у	у	у	т	т	У	т	у	у	у	т	у	т	х	у	у	у	х	х
	ноябрь	у	т	т	у	т	X	т	у	у	х	у	у	у	у	х	у	х	х	у
	декабрь	у	у	т	у	у	X	т	т	х	х	т	у	у	у	у	х	х	у	у
	январь	у	у	т	у	у	X	т	т	у	х	т	т	т	х	у	х	у	х	у

тип ИУЗ	X	III	VI	II	IV	XII	I	V	XI	XIII	IX	VII	VIII	XIV	XIX	XV	XVI	XVII	XVIII	
Ля**	октябрь	-	-	-	-	-	;)*) шс	-	-	-	;)*) * ш с	-	-	-	;)*) * ш с	;)*) * ш с	;)*) * ш с	;)*) * ш с	;)*) * ш с	;)*) * ш с
	ноябрь	*) ш Z	;)*) * ш	;)*) * ш	;)*) * ш с	-	*) шZ]	-	*) ш	*) ш	IZ	) * ш	) * ш	) * ш	*) ш Z	*) ш Z	*) ш Z	*) шI Z	*) ш IZ	*) ш IZ
	декабрь	IZ]	IZ]	*)ш IZп	IZ]	*) ш Z	IZ	*) ш	*) ш	I	I	) * ш ]	) * ш Z	) * ш Z	IZ	IZ	IZ	I	I	I
	январь	I Z]	I Z]	*) шI]Zп	IZ	*) ш IZ п	IZ) * ш Z) * ш Z	I	I) * ш Z) * ш Z) * ш Z	I	I	I	I	I	I	I

Примечание: у – умеренная зима, т -теплая зима, х – холодная зима,) – забереги, ш-средний и густой шугоход, * - шугоход редкий, Z- неполный ледостав,] – шуга подо льдом, I – ледостав.

Таким образом, проведённый пространственно-временной анализ многолетних сумм отрицательных температур воздуха выявил статистически значимую изменчивость условий замерзания рек в период формирования ледостава. В то же время статистически значимого уменьшения сумм отрицательных температур, влияющих на сроки появления первичных ледовых явлений, установлено не было. Это может быть связано с преобладающим влиянием локальных факторов на процессы начального образования льда, особенно учитывая, что большинство водотоков Кольского полуострова относятся к малым рекам. В условиях сложного холмисто-горного рельефа формирование первичных ледовых явлений может определяться разнообразными локальными условиями, такими как скорость течения, сложная гидрографическая обстановка, антропогенное влияние. Наиболее существенные изменения температурного режима отмечены в центральной части полуострова, тогда как прибрежные районы в меньшей степени подвержены потеплению вследствие регулирующего влияния Баренцева и Белого морей.

Глава 3. Особенности ледового режима рек и озер Кольского полуострова

Методики, которые используются для прогноза сроков появления льда и установления ледостава на реках и озерах Кольского полуострова, были разработаны ещё в середине XX века основаны на эмпирических зависимостях, полученных по данным наблюдательной сети за многолетний период. Для их совершенствования требуется комплексное исследование характеристик ледового режима рек, а также формирующих его процессов.

В рамках диссертационного исследования были проанализированы данные об ежедневном уровне и ледовом режиме рек и озер, от начала периода замерзания до появления устойчивых ледовых явлений и от начала появления устойчивых ледовых явлений до формирования ледостава, а также метеорологические характеристики.

Начало формирования ледового покрова на реках Кольского полуострова определяются рядом физико-географических факторов, среди которых ключевую роль играют широтное положение, интенсивность охлаждения водной массы, морфометрические характеристики русла, степень естественной и антропогенной зарегулированности стока.

Основным условием начала замерзания рек является переохлаждение воды, выполняемое при полном расходе тепла в активном слое перемешивания. Процесс переохлаждения зависит от интенсивности перемешивания водной массы. При слабом перемешивании переохлаждение воды происходит только в верхнем слое, где происходит формирование поверхностного льда. При интенсивном перемешивании активный слой охватывает всю водную массу, что приводит к формированию внутриводного льда.

На малых равнинных водотоках первичные ледовые явления, как правило, проявляются в виде заберегов, формирующихся у берегов и в зонах с замедленным течением при первых устойчивых отрицательных температурах. Эти образования представляют собой тонкий прозрачный лед,

постепенно распространяющийся по руслу. В условиях дальнейшего охлаждения воды происходит нарастание заберегов, их смыкание и формирование сплошного ледового покрова — ледостава. Образование шуги в таких условиях определяется гидравлическим режимом потока, в частности, скоростью течения и наличием промоин. Наиболее типичными зонами генерации шуги являются участки с порожистым руслом, повышенными уклонами, а также места выхода грунтовых или подогретых вод.

На малых и средних реках осенний ледоход, как правило, не наблюдается, а переход от заберегов к ледоставу осуществляется в течение 3–5 суток. Для водотоков, протекающих по холмистым территориям, включая подавляющее большинство рек Кольского полуострова – установление устойчивого ледяного покрова связано с формированием зажоров и достижением температурного минимума.

В соответствии с классификацией замерзания рек, предложенной Р.В. Донченко, выделяются три типа режима образования льда [Донченко, 1987]:

Первый тип характерен для малых и средних рек с незначительной водностью в осенне-зимний период. Ледообразование происходит преимущественно в поверхностном слое при относительно невысокой толщине льда. Ледостав формируется за счёт смыкания заберегов.

Второй тип наблюдается на средних и крупных реках. Ледообразование происходит в активно перемешиваемом слое толщиной 20–30 см. После формирования заберегов начинается дрейф льдин вниз по течению. Ледоход начинается через 2–3 суток. Неоднородность гидрологических и морфологических характеристик вызывает колебания ледотранспортирующей способности потока, особенно в зонах слияния рукавов, притоков и на поворотах русла. Формирование ледостава осуществляется через образование перемычек и поступательное продвижение ледяной кромки вверх по течению.

Третий тип характерен для рек с высокими скоростями течения и нестабильными метеоусловиями, особенно в периоды повышенной водности. Замерзание сопровождается формированием шуги по всей глубине потока.

Ледостав возникает при её сплочении и смерзании. На участках с повышенными уклонами возможны зажоры, существенно замедляющие продвижение ледяной кромки (до 3–6 км/сутки против 50 км/сутки в равнинных условиях) [Донченко 1987; Бузин 2007; Агафонова, 2009].

Реки Кольского полуострова по характеру формирования ледового покрова наиболее близки к первому и третьему типу. Однако, ледостав на них формируется не постепенно, а почти одновременно по всей ширине русла при возникновении зажоров. Нестабильность погодных условий в переходный период способствует усилению процессов зажорообразования [Козлов, 2000]. Зажоры являются типичным явлением для рек северной части Европейской территории России; их повторяемость в осенне-зимний период достигает 100 % на большинстве гидрологических постов [Агафонова, 2009]. На реках Кольского полуострова зажорные скопления на порожистых участках наблюдаются практически ежегодно. [Опасные гидрологические явления..., 2023]. При этом наблюдается тенденция к снижению частоты зажоров с востока на запад региона.

Анализ данных о ледовой обстановке за многолетний период позволил оценить пространственную изменчивость и выделить зоны установления первичных ледовых явлений в зависимости от их видов: шугоход или забереги (рис. 3.1.).

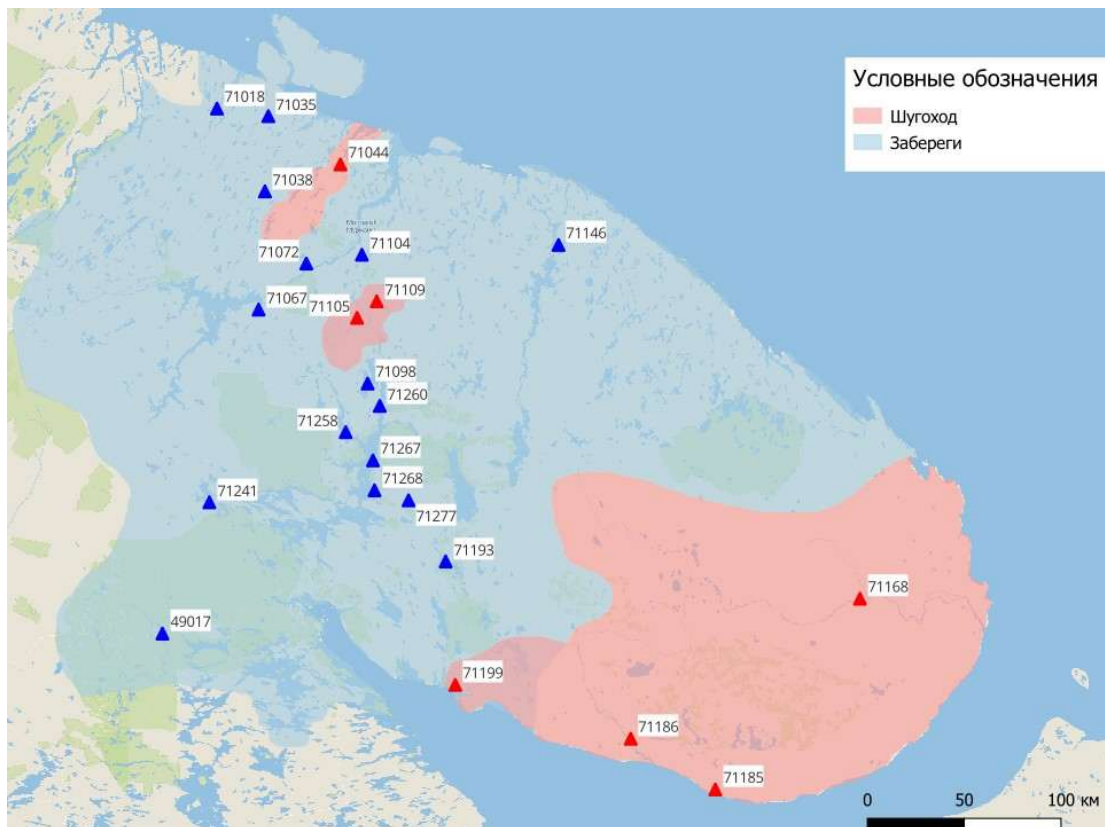


Рисунок 3.1. Пространственное распределение типов появления первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова.

Роль водности реки в формировании сроков начала ледообразования реализуется через величину уровня и расхода воды, скорости течения. В годы с повышенной водностью, обусловленной интенсивными осадками в осенний период, наблюдается увеличение уровня воды и усиление течения, что способствует задержке образования ледяного покрова. Напротив, в маловодные годы, характеризующиеся сухими осенними условиями, особенно на малых водотоках с мелководным руслом, ледообразование может начинаться раньше среднегодовых сроков, поскольку меньший объём воды подвержен более быстрому охлаждению. Однако определяющим фактором в инициировании ледовых процессов остаётся температура воздуха. В многолетнем аспекте статистическая связь между стоком воды и датами появления первых ледовых явлений выражена слабо; преимущественно прослеживается синхронность начала ледообразования на большинстве водотоков в годы с аномально холодной или тёплой осенью.

Замерзание рек Кольского полуострова происходит в различных условиях, обусловленных их географическим положением, размером бассейна. В более холодных внутренних районах полуострова малые реки начинают формирование первичных заберегов уже в первой половине октября в годы с отрицательной температурной аномалией. В то же время в прибрежных районах, благодаря смягчающему влиянию морского климата и относительно тёплым погодным условиям в осенний период, сроки начала ледообразования, как правило, смещаются на более поздние даты.

Для Кольского полуострова появление первичных ледовых явлений и замерзание рек также связано с определенными синоптическими процессами:

1. Над Западной Европой и севером Атлантики располагается область антициклонической деятельности. Ядра высокого давления входят с Гренландии с большой меридиальной составляющей через Скандинавию на юг ЕТС и далее на восток. На Кольский полуостров поступает холодный воздух с севера и северо-запада. Циклоны «ныряют» с Гренландии на юг Баренцева моря, принося холодный воздух. Температура воздуха понижается примерно до $-3 - -6^{\circ}\text{C}$.

2. При этой ситуации область высокого давления располагается над полярным бассейном и южными районами Западной Европы и ЕТС. Циклоническая деятельность проходит в умеренных широтах. Циклоны с Атлантики смещаются с запада на восток через Балтийское море на горло Белого моря и далее на восток. В тыл уходящим циклона на полуостров поступает холодный воздух с северо-востока. Температура воздуха при этом понижается до $-5 - -10^{\circ}\text{C}$, однако похолодание может быть непродолжительным.

3. Для этой ситуации характерно развитие области высокого давления над Кольским полуостровом, Карелией. Циклоническая деятельность проходит в северо-восточной Атлантике и в северных морях, а также над югом Западной Европы и севером Западной Сибири. По

классификации этот тип относится к восточному. Температура воздуха может колебаться в широких пределах.

Продолжительность процесса ледообразования обусловлена степенью устойчивости атмосферной циркуляции, то есть тип и динамика замерзания водных объектов напрямую зависят от характера господствующих синоптических условий.

3.1. Ледовый режим рек в период замерзания

Как упоминалось ранее все реки Кольского полуострова в зависимости от их географического положения и рельефа можно разделить на три группы: полуравнинные, озерного типа и горные [Водные ресурсы России..., 2008]. В связи с этим дальнейшее исследование процессов замерзания рек были проведены в соответствии данной типизацией (рис. 3.1.1.).

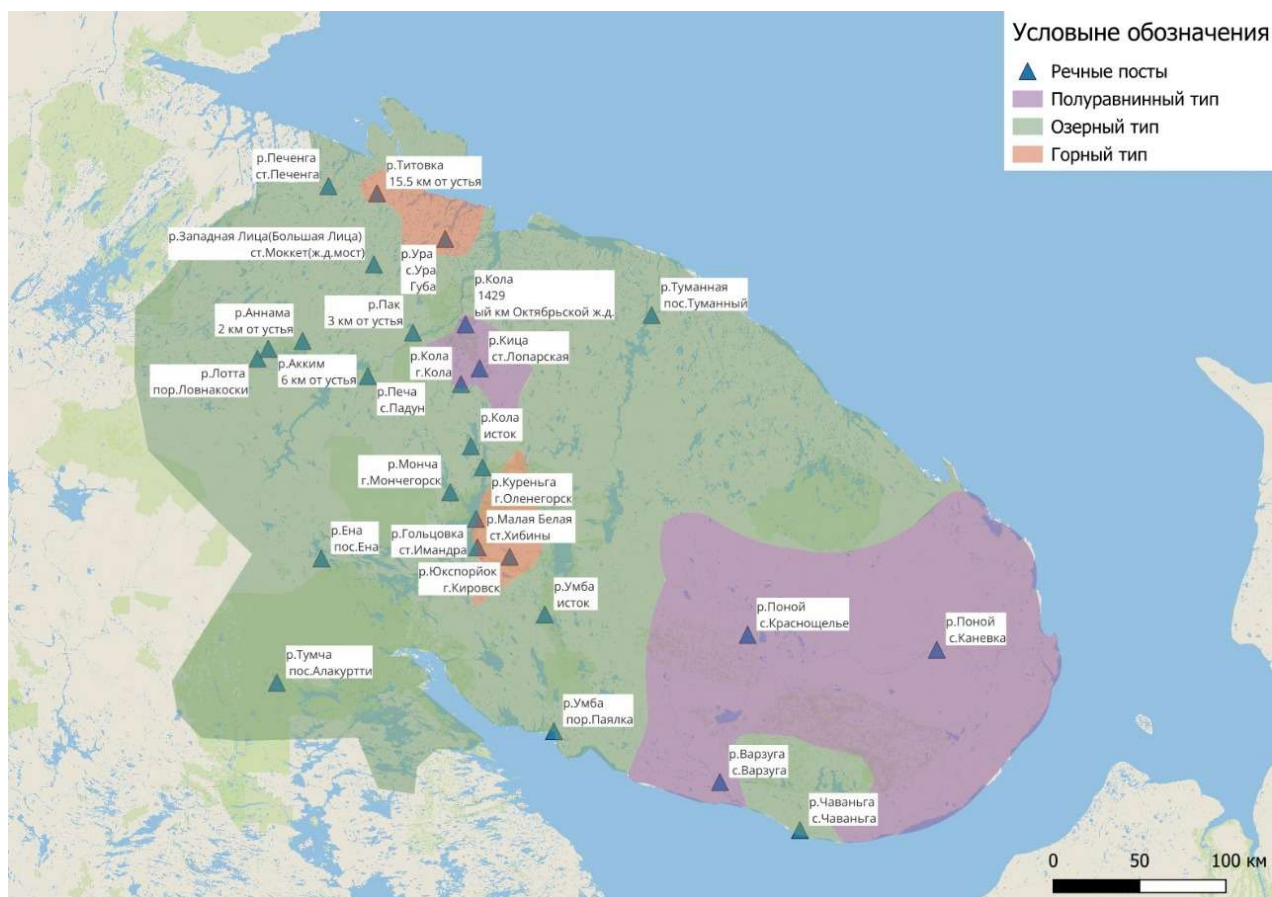


Рисунок 3.1.1. Типизация рек по условиям их протекания.

К рекам полуравнинного типа из исследуемых в данной работе отнесены Варзуга, Поной, Кица и участки реки Кола в нижнем и среднем течении.

Замерзание на этих реках, как правило, начинается с образования заберегов и сала. На реке Варзуга эти явления, как правило, носят кратковременный характер, после чего наблюдается образование шуги (64%) [Ледовый режим реки..., 2022]. Для реки Поной образование шуги зафиксировано в 56% случаев. В нижнем и среднем течении реки Колы зажоры и шугоход образуются редко и имеют непродолжительный характер. Для реки Кица характерно кратковременное появление заберегов и сала, после которых возникает шугоход в 70% случаев за наблюдаемый период. Средняя продолжительность шугохода на реке Кица составляет 8 дней. Несмотря на отмечаемые изменения многолетних сроков ледообразования, средняя дата появления первичных ледовых явлений на этих реках по-прежнему приходится на третью декаду октября. Под влиянием современных климатических изменений сроки начала ледообразования на реках полуравнинного типа существенно не изменились: для р. Варзуги – сдвиг на 2 дня, для р. Поной – на 5 дней (рис. 3.1.3) [Канашин, Банщикова, Сумачев, 2025]. Также стоит отметить увеличение продолжительности шугохода для рек Варзуга и Поной в среднем на 4 дня за период после 1980 года (рис. 3.1.2) [Опасные гидрологические явления..., 2023].

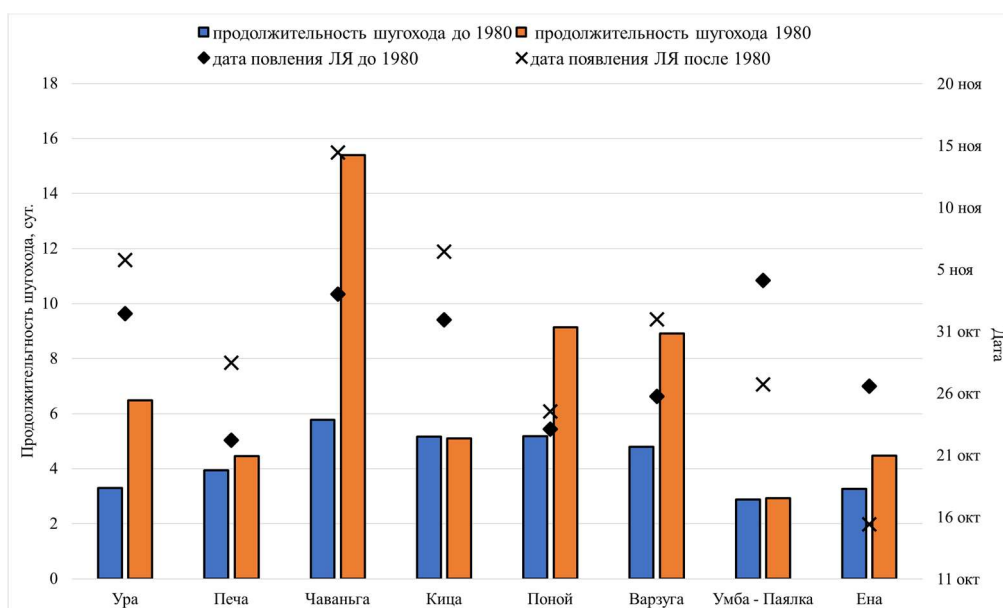


Рисунок 3.1.2. Изменение сроков и продолжительности шугохода за период до и после 1980 года.

Большинство малых и средних рек Мурманской области относятся к водотокам озёрного типа. Среди исследуемых объектов к данной категории можно отнести, в частности, реки Чаваньга, Кола, Ура, Умба, Печенга, Западная Лица и ряд других. На формирование ледового режима, помимо озёр, оказывают существенное влияние тёплые морские течения Баренцева и Белого морей, в связи с чем первичные ледовые явления наблюдаются с середины октября до начала ноября (рис. 3.1.3). Выполненный анализ показал статистически значимое влияние климатических изменений на сроки начала ледообразования. В среднем, наблюдается смещение сроков появления льда на более поздний период, составляющее 2 – 3 дня. Замерзание рек, как правило, начинается с срастания заберегов. Ледоход на большинстве рек не наблюдается. Появление шуги для большинства рек данного типа наблюдается меньше чем в 20% случаев за исследуемый период и носит кратковременный характер. Только для реки Умба характерно частое появление шуги. В 73% случаев наблюдается шугоход продолжительностью, в среднем, около 4 дней.

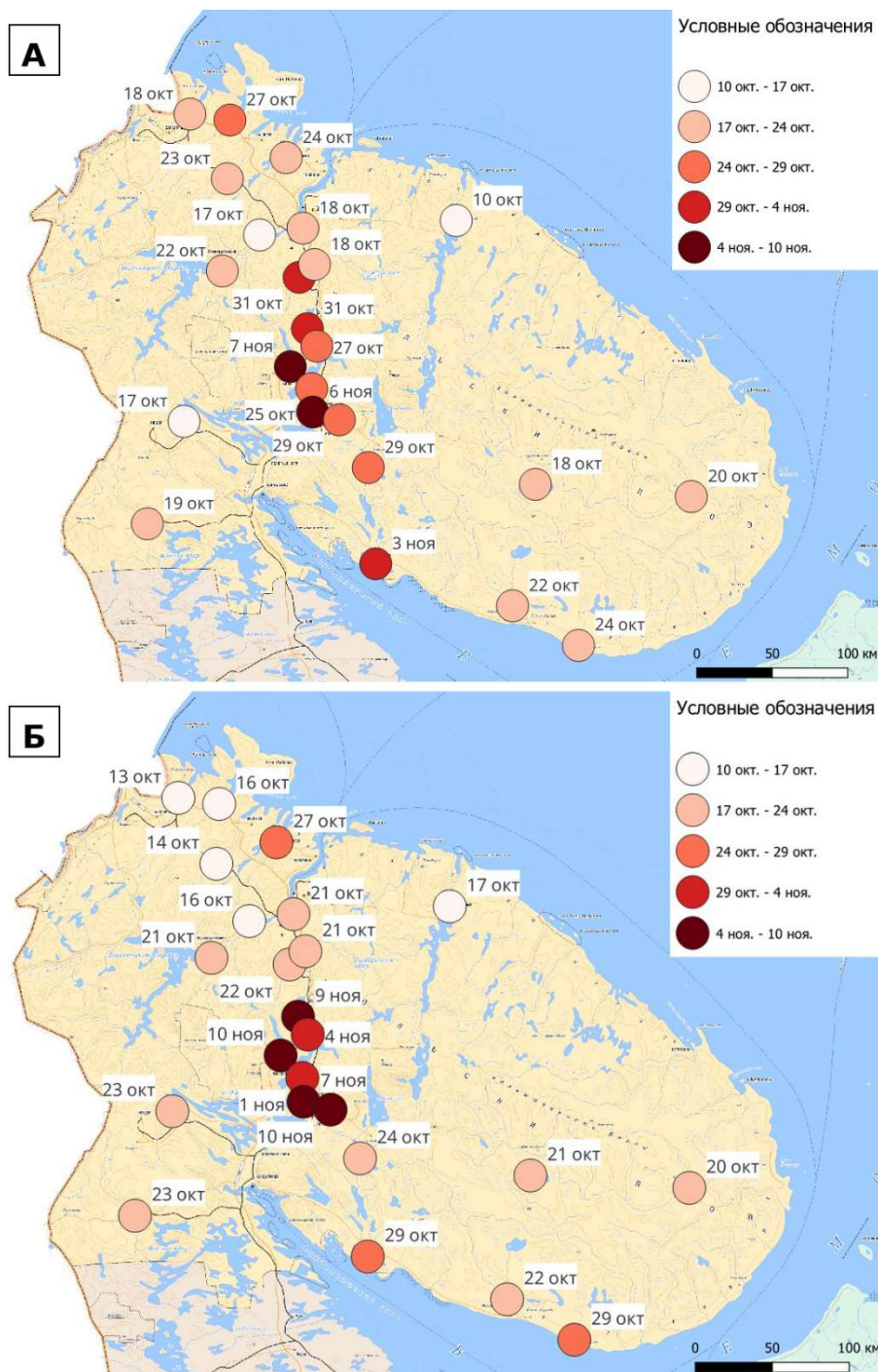


Рисунок 3.1.3. Изменения сроков появления первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова за период до (а) и после (б) точки смены тренда.

К горному типу относятся малые водотоки, берущие начало на возвышенностях Кольского полуострова. Эти реки характеризуются значительными уклонами русел, протекают в узких скалистых долинах и имеют развитую порожисто-водопадную структуру. Типичным

представителем данной группы является р. Малая Белая, р. Юкспорйок, р. Тумча, р. Титовка. Появление льда на реках горного типа происходит позднее исследуемых рек за счет турбулентного перемешивания и высокой скорости потока (рис. 3.1.3). Устойчивые первичные ледовые явления на реках данного типа преимущественно представлены заберегами и наблюдаются в конце октября – первой декаде ноября. В верховьях и на мелководных перекатах за счет заморозков быстро образуют забереги, после чего в течение нескольких недель устанавливается ледовый покров. Также как и для всех рек Кольского полуострова, для рек горного типа характерен значимый сдвиг сроков появления льда, но в количественном выражении не существен. (рис. 3.1.4).

Для большинства исследуемых рек была определена точка смены тренда в рядах дат появления ледовых явлений (табл. 3.1.1).

Таблица 3.1.1.

Оценка изменения трендов в многолетних рядах дат появления первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова

Река – Пост	Год разрыва тренда	До точки разрыва тренда		После точки разрыва тренда	
		Направленность тренда	Значимость тренда	Направленность тренда	Значимость тренда
Полуравнинный тип					
р.Поной - с.Краснощелье	1993	↗	Незначим	↘	Значим
р.Поной - с.Каневка	1974	↗	Значим	↘	Значим
р.Варзуга - с.Варзуга	1977	↗	Значим	↘	Значим
р.Кица - ст.Лопарская	1978	↗	Значим	↘	Значим
Озерный тип					
р.Печа - с.Падун	1977	↗	Значим	↘	Значим
р.Пак - 3 км от устья	1961	↘	Незначим	↗	Незначим
р.Кола - Исток	1973	↗	Незначим	↘	Значим
р.Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	1978	↗	Незначим	↘	Значим
р.Чаваньга - с.Чаваньга	1977	↗	Незначим	↘	Незначим

Река – Пост	Год разрыва тренда	До точки разрыва тренда		После точки разрыва тренда	
		Направленность тренда	Значимость тренда	Направленность тренда	Значимость тренда
р.Умба - пор.Паялка	1959	↗	Значим	↘	Значим
р.Монча - г.Мончегорск	2005	↘	Значим	↗	Значим
Горный тип					
р.Ура - с.Ура-Губа	1993	↗	Незначим	↘	Значим
р.Куреньга - г.Оленегорск	1977	↗	Незначим	↘	Значим
р.Гольцовка - ст.Имандра	1974	↗	Незначим	↘	Значим
р.Малая Белая - ст.Хибины	1968	↗	Значим	↘	Значим

Примечание: ↗ – раннее появления льда, ↘ – позднее появление льда

Несмотря на значимость трендов на позднее появление первичных ледовых явлений после точки смены тренда сдвиг появления льда наблюдается в среднем на 4 дня. Отсутствие выраженных тенденций к смещению сроков формирования первичных ледовых 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. Увеличение периода шугохода в условиях современного изменения климата регистрируется не на всех водотоках с данным типом замерзания и, в среднем, имеет незначительное увеличение продолжительности на 3-4 дня. Анализ метеорологических данных за октябрь—ноябрь показывает, что характерные температурные значения и даты их наступления остаются относительно стабильными на протяжении исследуемого периода.

Большинство рек Кольского полуострова характеризуются чередованием плесовых и порожистых участков, поэтому установление ледостава происходит крайне неоднородно – как по длине реки, так и по территории полуострова.

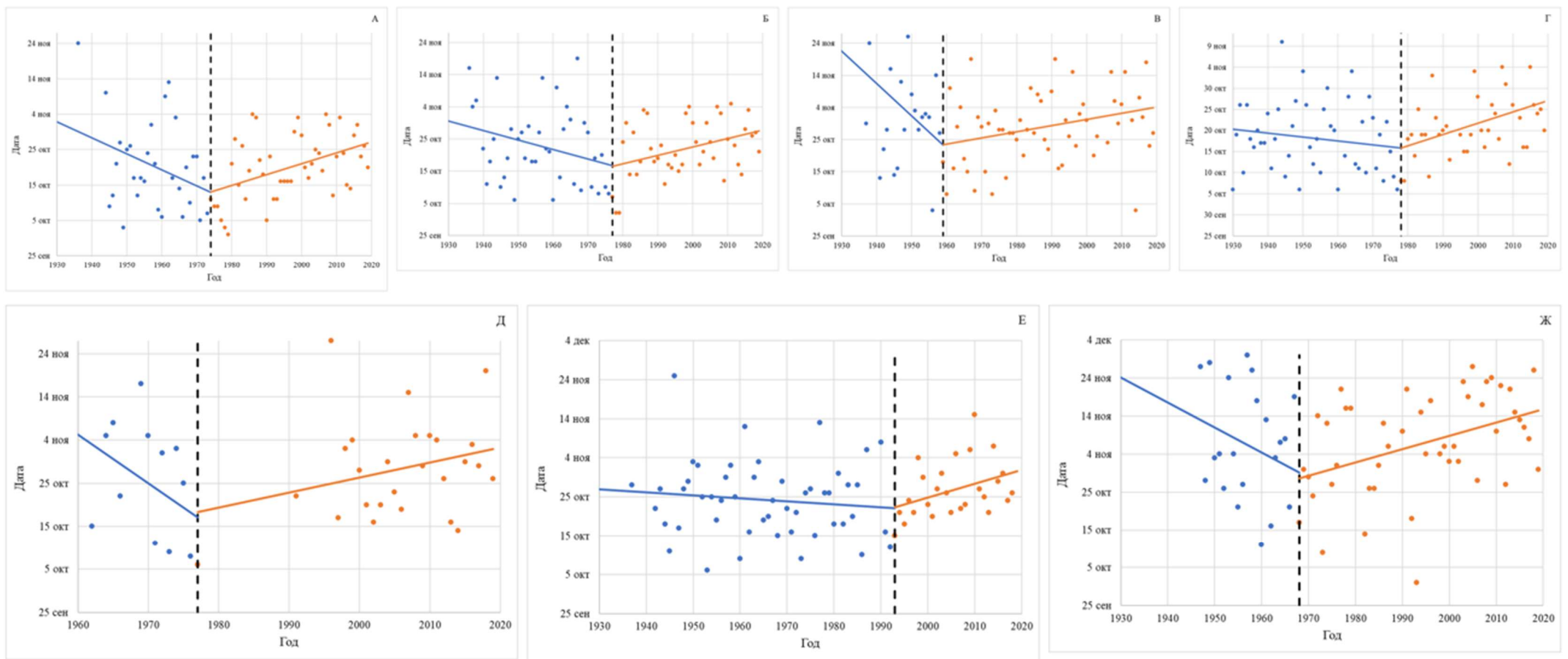


Рисунок 3.1.4. Хронологические графики появления первичных ледовых явлений на реках Кольского полуострова по типам рек: (а, б) полуравнинные, (в, г, д) озерного типа, (е, ж) горные

Для рек полуравнинного типа характерно формирование устойчивого ледостава в первой декаде декабря. Водотоки озёрного типа, как упоминалось ранее, преимущественно малые водотоки, демонстрируют высокую чувствительность к локальным климатическим и ландшафтным условиям, что обуславливает широкий диапазон сроков установления ледостава — от начала ноября до января. На горных реках ледостав формируется, как правило, в середине декабря (рис. 3.1.6).

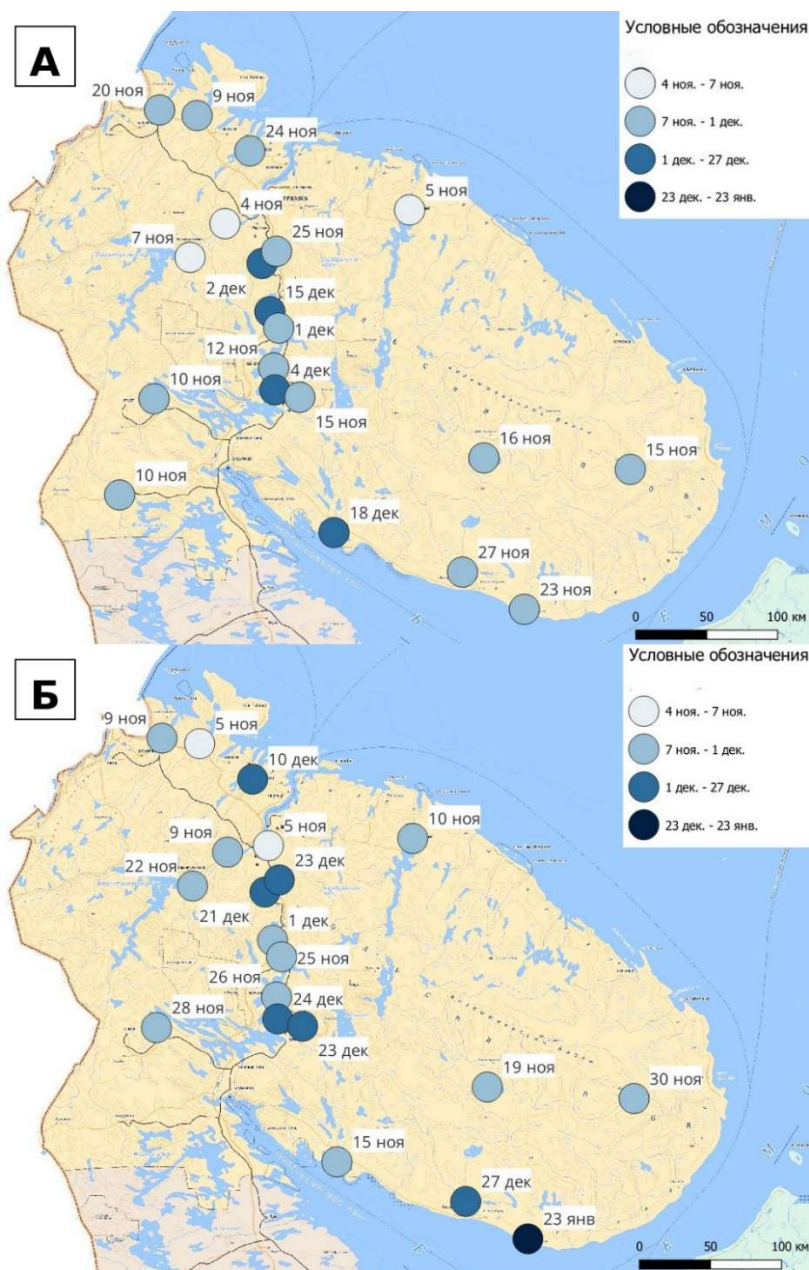


Рисунок 3.1.6. Изменения сроков установления ледостава на реках Кольского полуострова за период до (а) и после (б) точки смены тренда.

Анализ многолетних наблюдений свидетельствует о тенденции к более позднему формированию ледостава за последние 35 – 50 лет по сравнению с предшествующим периодом (рис. 3.1.6, табл. 3.1.2). 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.

Таблица 3.1.2.

Оценка изменения трендов в многолетних рядах дат установления ледостава на реках Кольского полуострова

Река - Пост	Год разрыва тренда	До точки разрыва тренда		После точки разрыва тренда	
		Направленность тренда	Значимость тренда	Направленность тренда	Значимость тренда
Полуравнинный тип					
р.Поной - с.Краснощелье	1997	Незначим	↗	Незначим	↘
р.Поной - с.Каневка	1971	Незначим	↗	Значим	↘
р.Варзуга - с.Варзуга	1992	Значим	↘	Значим	↘
р.Кица - ст.Лопарская	1995	Незначим	↘	Значим	↘
Озерный тип					
р.Печа - с.Падун	1993	Незначим	↘	Значим	↘
р.Пак - 3 км от устья	1969	Значим	↘	Значим	↗
р.Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	1948	Незначим	↗	Значим	↘
р.Кола - Кола	1986	Значим	↘	Значим	↘
р.Чаваньга - с.Чаваньга	1976	Незначим	↗	Значим	↘
р.Умба - пор.Паялка	1963	Значим	↗	Незначим	↗
р.Ена - пос.Ена	1978	Незначим	↗	Значим	↘
Горный тип					
р.Ура - с.Ура-Губа	1979	Незначим	-	Значим	↘
р.Куреньга - г.Оленегорск	1960	Незначим	↗	Незначим	↗
р.Гольцовка - ст.Имандра	1973	Незначим	↗	Значим	↘
р.Малая Белая - ст.Хибины	1992	Значим	↗	Значим	↘
р.Юкспорйок - г.Кировск	1998	Незначим	↘	Значим	↘

Так, на реке Чаваньга ледостав в последние десятилетия формируется, в среднем, на 61 день позже (рис. 3.1.7). 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. Так, на участке р. Умба – порог Паялка в последние годы наблюдается преобладание фазы неполного ледостава, в результате чего общее время замерзания даже сократилось. Устойчивый ледостав на данном участке регистрируется лишь в условиях экстремально холодных зим.

В редких случаях образование ледостава на реках может происходить без появления устойчивых первичных ледовых явлений. Такое замерзание происходит не более чем в 6 случаях за рассматриваемые период наблюдений (табл. 3.1.3). Сумма отрицательных температур воздуха в таких случаях принимает большие значения и превосходит температуры, при которых происходит замерзание в обычных условиях. В данном случае период замерзания наблюдаются оттепели, которые увеличивают продолжительность замерзания и не дают сформироваться устойчивым первичным ледовым явлениям.

Таблица 3.1.3.

Количественная характеристика условий замерзания рек Кольского полуострова

Река -Пост	Число лет без ПЛЯ	$\Sigma-t, ^\circ\text{C}$ без ПЛЯ	Число лет с ПЛЯ и ледоставом	$\Sigma-t, ^\circ\text{C}$ на дату наступления ПЛЯ	$\Sigma-t, ^\circ\text{C}$ на дату наступления ледостава при появлении ПЛЯ
р.Тумча-пос.Алакуртти	5	-320.8	13	-16.2	-23.7
р.Печенга-ст.Печенга	2	-368.9	34	-2.2	-11.4
р.Титовка-15.5кмотустья	1	-113.0	29	-2.2	-7.3
р.ЗападнаяЛица(БольшаяЛица)-ст.Моккет(ж.д.мост)	1	-433.0	25	-7.1	-30.6
р.Ура-с.Ура-Губа	2	-619.6	60	-11.9	-60.1
р.Печа-с.Падун	3	-602.5	59	-9.7	-44.1
р.Пак-3кмотустья	0		18	-5.5	-18.7
р.Кола-исток	2	-610.7	20	-61.9	-222.5
р.Кола-1429-ыйкмОктябрьскойж.д.	4	-325.6	57	-9.9	-18.6
р.Кола-г.Кола	2	-670.3	15	-16.2	-240.9
р.Кица-ст.Лопарская	2	-602.1	59	-9.4	-82.1
р.Туманная-пос.Туманный	1	-400.5	32	-1.1	-9.3
р.Поной-с.Каневка	1	-1057.6	56	-10.7	-75.8
р.Варзуга-с.Варзуга	1	-779.8	62	-5.4	-55.4
р.Умба-исток	3	-625.9	38	-12.6	-88.6
р.Умба-пор.Паялка	6	-349.4	67	-19.0	-109.8
р.Ена-пос.Ена	1	-760.1	39	-17.6	-43.0
р.Монча-г.Мончегорск	1	-690.9	40	-50.1	-348.4
р.Куреньга-г.Оленегорск	0		36	-24.7	-153.6
р.Гольцовка-ст.Имандра	1	-690.9	39	-24.5	-113.2
р.МалаяБелая-ст.Хибины	4	-741.8	40	-61.4	-394.9
р.Юкспорйок-г.Кировск	1	-690.9	32	-46.5	-256.0

Таким образом, процесс формирования устойчивого ледостава на реках 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 продолжительности 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.

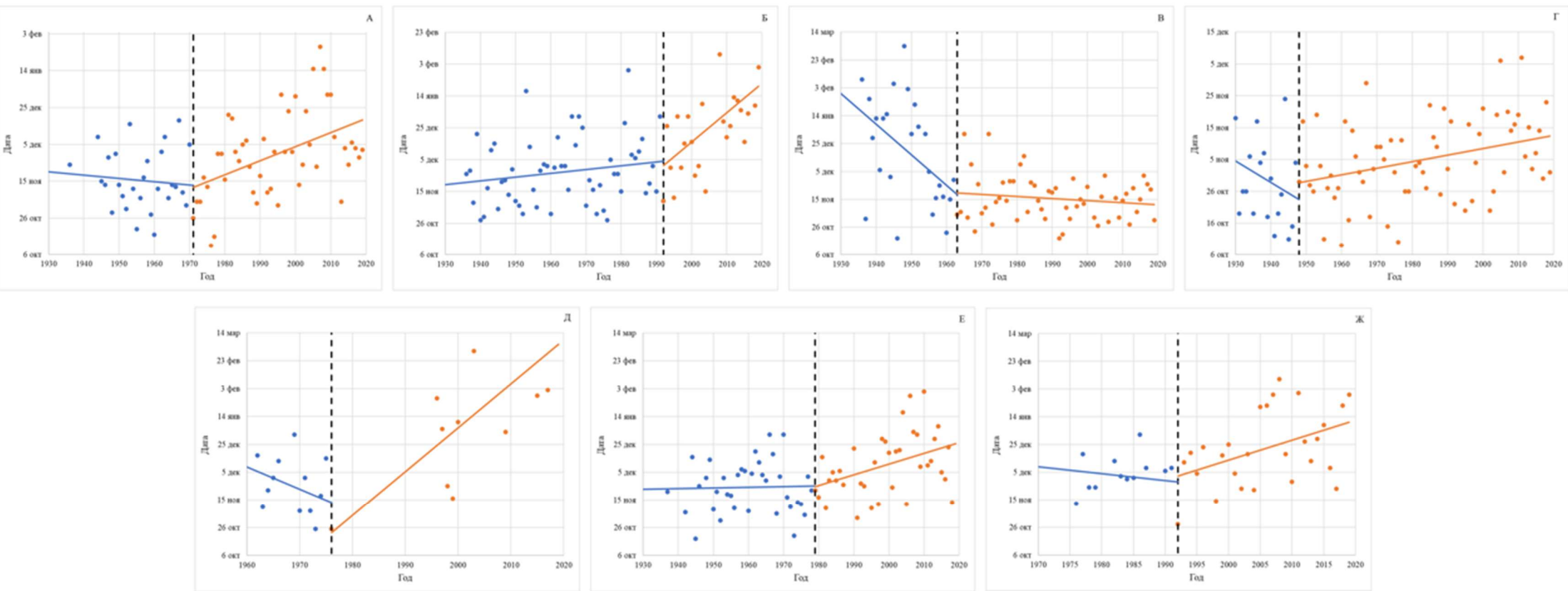


Рисунок 3.1.7. Хронологические графики сроков установления ледостава на реках Кольского полуострова по типам рек: (а, б) полуравнинные, (в, г, д) озерного типа, (е, ж) горные.

3.2. Ледовый режим озер в период замерзания

Большинство озер полуострова небольшие по площади, поэтому они быстро охлаждаются и срок их замерзания определяются преимущественно температурами воздуха. Процесс замерзания водоемов, как правило, начинается с образования первичных ледовых явлений – заберегов, сала, шуги. Раньше всех появление льда происходит на малых и средних водоемах, в среднем, в третьей - четвертой декаде октября. Появление первичных ледовых явлений на крупных озерах и водохранилищах происходит в начале и середине ноября (рис. 3.2.1). В результате статистического анализа ряда дат появления ледовых явлений на водоемах Кольского полуострова были выделены точки смены трендов (табл. 3.2.1). Для всех озер и водохранилищ характерно более позднее замерзание после смены трендов в среднем на 7 дней (рис. 3.2.2).

Таблица 3.2.1

Оценка изменения трендов в многолетних рядах дат появления первичных ледовых явлений на водоемах Кольского полуострова

Озеро - Пост	Год разрыва тренда	До точки разрыва тренда		После точки разрыва тренда	
		Направленность тренда	Значимость тренда	Направленность тренда	Значимость тренда
Верхне-Тулумское - с. Ниванкюль	1994	↘	Незначим	↘	Значим
Имандра-Зашеек	1976	↗	Значим	↘	Значим
Имандра-Хибины	1985	↘	Незначим	↘	Значим
Иовское - пос. Зареченск	1993	↘	Значим	↘	Значим
Княжегубское - с. Ковдозеро	1993	↘	Незначим	↘	Значим
Куэтс-ярви - пгт. Никель	1990	↗	Незначим	↘	Значим
Ловозеро - с. Ловозеро	1976	↗	Незначим	↘	Значим
Пермус-озеро - г. Оленегорск	1979	↗	Незначим	↘	Значим
Пулозеро-ст. Пулозеро	1975	↗	Незначим	↘	Значим
Серебрянское - пос. Серебрянский	1995	↗	Незначим	↘	Значим
Умб-озеро - исток р. Умбы	1991	↗	Незначим	↘	Значим

В зависимости от хода температур воздуха первичные ледовые явления могут иметь неустойчивый характер: и несколько раз появляться и разрушаться, вплоть до свободного русла перед установлением ледостава [Методика долгосрочного прогноза..., 1972]. 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 (табл. 3.2.2). Неполный ледостав наблюдается редко и, как правило, наступает после первичных ледовых явлений, имеет продолжительность не более нескольких дней.

Таблица 3.2.2.

Количественная характеристика условий замерзания озер Кольского полуострова

Озеро -Пост	Число лет без ПЛЯ	$\sum-t, ^\circ\text{C}$ без ПЛЯ	Число лет с ПЛЯ и ледоставом	$\sum-t, ^\circ\text{C}$ на дату наступления ПЛЯ	$\sum-t, ^\circ\text{C}$ на дату наступления ледостава при появлении ПЛЯ
Иовское - пос. Зареченск	8	-231	38	-125	-174
Княжегубское - с. Ковдозеро	0	-	45	-149	-214
Куэтс-ярви-пгт. Никель	1	-17	38	-40	-71
В. Туломское-с. Ниванкюль	15	-146	30	-101	-139
Пулозеро-ст. Пулозеро	0	-	55	-8	-32
Ловозеро-с. Ловозеро	2	-27	44	-7	-44
Серебрянское-пос. Серебрянский	5	-44	30	-51	-79
Умб-озеро-исток р. Умбы	0	-	35	-10	-56
Имандра-пгт. Зашеек	4	-52	50	-50	-94
Имандра-ст. Хибины	11	-65	36	-70	-110
Пермусозеро-г. Оленегорск	14	-87	35	-16	-38

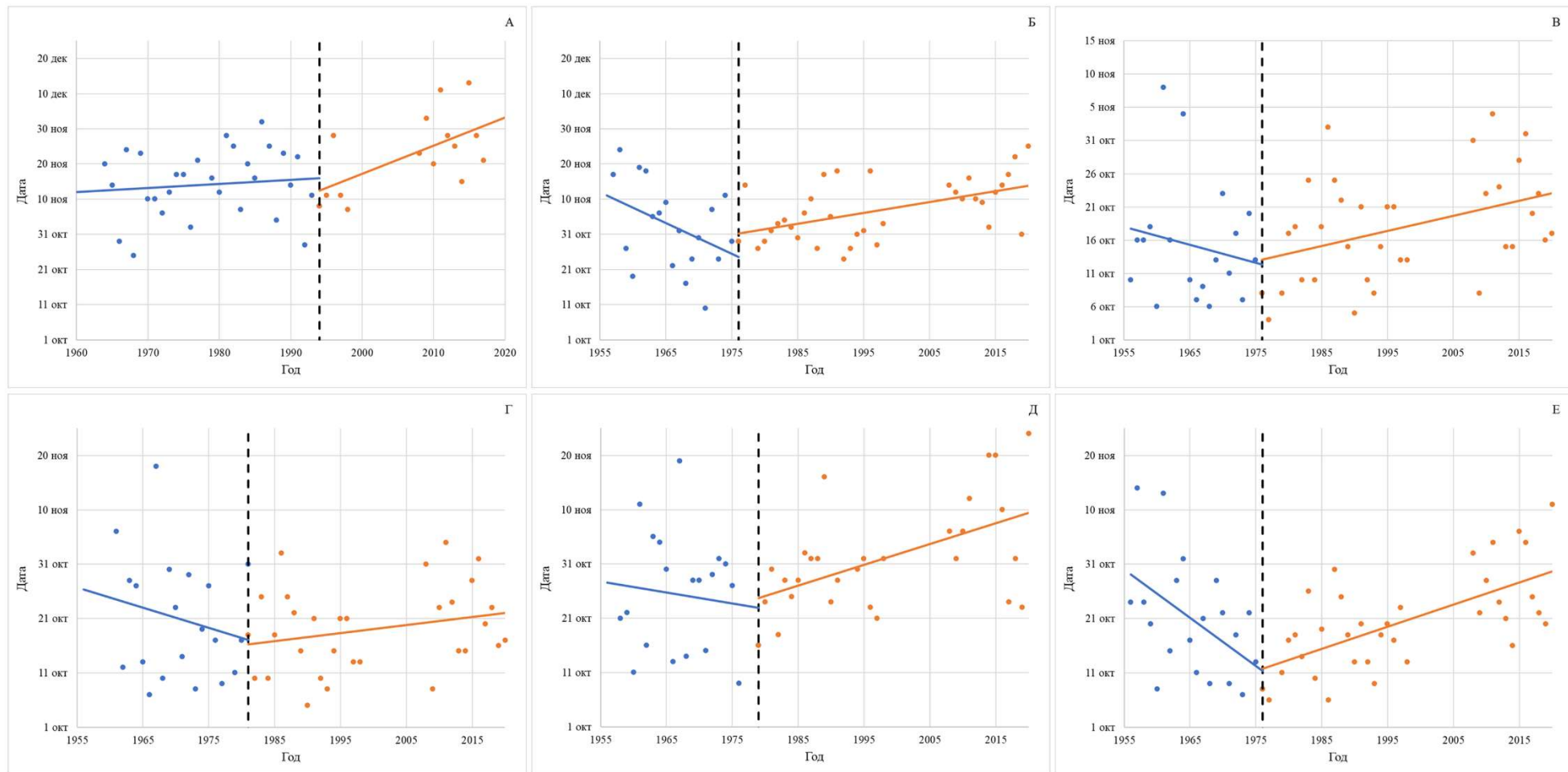


Рисунок 3.2.1 Хронологические графики сроков появления первичных ледовых явлений на озерах Кольского полуострова по площади водного зеркала: (а, б) >500 км², (в, г) 100-500 км², (д, е) <100 км².

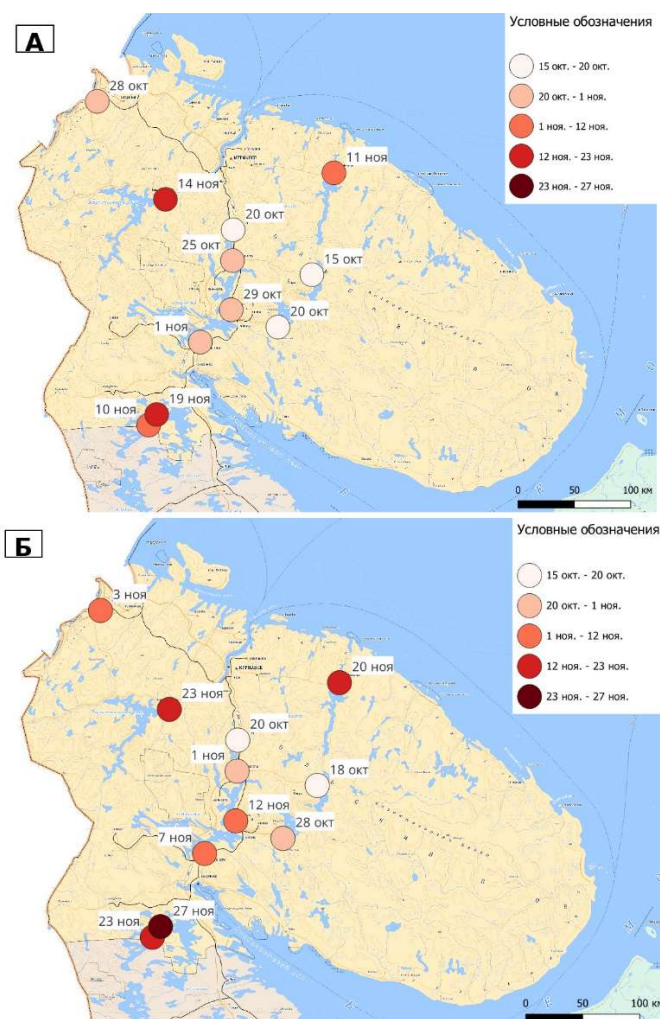


Рисунок 3.2.2. Изменения сроков появления первичных ледовых явлений на озерах Кольского полуострова за период до (а) и после (б) точки смены тренда.

На малых и средних озерах ледостав устанавливается во второй половине октября, на крупных – в первой декаде ноября (рис. 3.2.4). 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 (рис. 3.2.3, табл. 3.2.3).

Таблица 3.2.3

**Оценка изменения трендов в многолетних рядах дат установления
ледостава на водоемах Кольского полуострова**

Озеро - Пост	Год разрыва тренда	До точки разрыва тренда		После точки разрыва тренда	
		Направленность тренда	Значимость тренда	Направленность тренда	Значимость тренда
Верхне-Тулomское - с. Ниванкюль	1994	↘	Незначим	↘	Значим
Имандра-Зашеек	1976	↗	Значим	↘	Значим
Имандра-Хибины	1985	↘	Незначим	↘	Значим
Иовское - пос. Зареченск	1993	↘	Значим	↘	Значим
Княжегубское - с. Ковдозеро	1993	↘	Незначим	↘	Значим
Куэ́тс-ярви - пгт. Никель	1990	↗	Незначим	↘	Значим
Ловозеро - с. Ловозеро	1976	↗	Незначим	↘	Значим
Пермус-озеро - г. Оленегорск	1979	↗	Незначим	↘	Значим
Пулозеро-ст. Пулозеро	1975	↗	Незначим	↘	Значим
Серебрянское - пос. Серебрянский	1995	↗	Незначим	↘	Значим
Умб-озеро - исток р. Умбы	1991	↗	Незначим	↘	Значим

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. Основными факторами, влияющими на сроки появления ледовых явлений, является температура воздуха, дата перехода ее через 0°C и скорость накопления отрицательных значений.

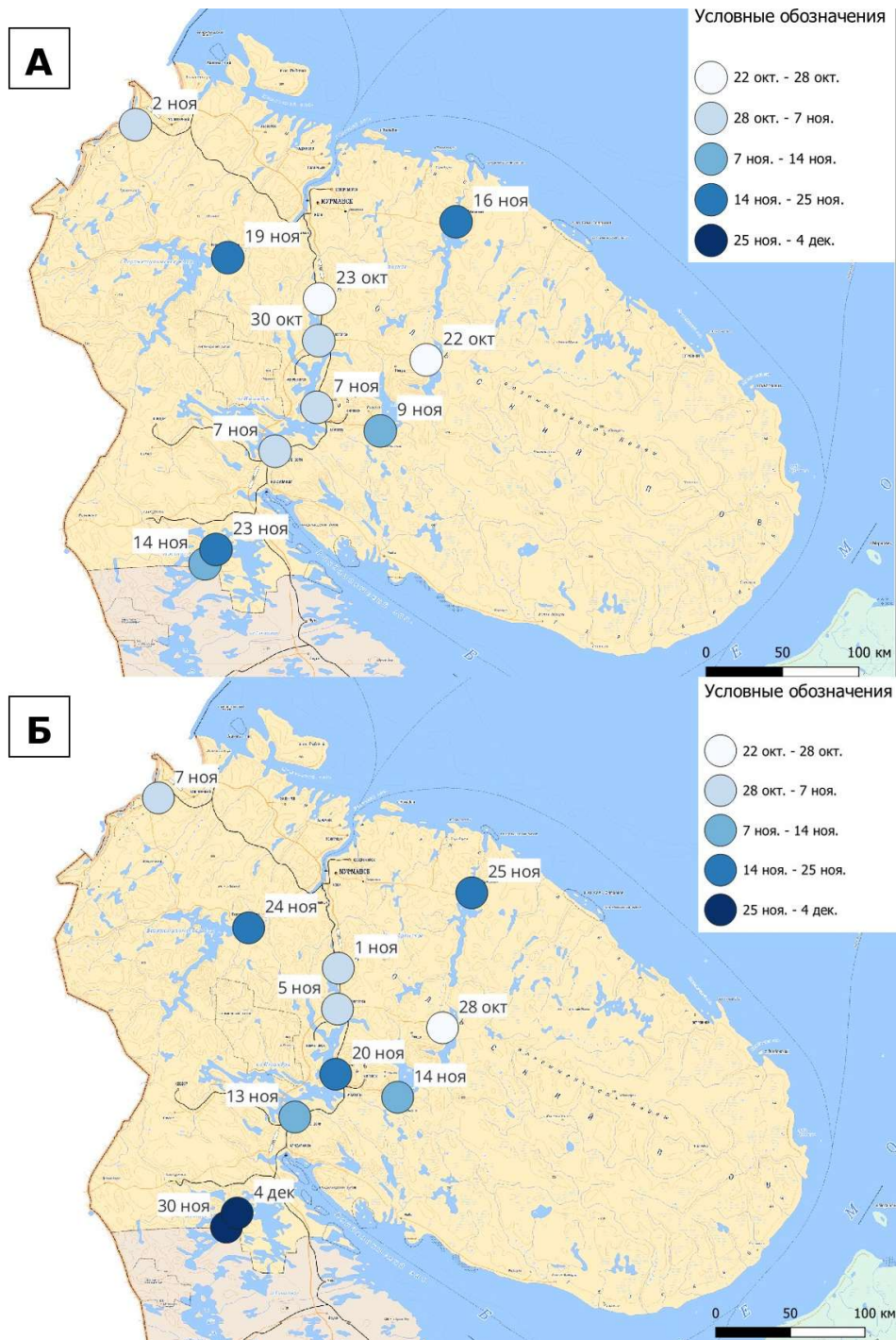


Рисунок 3.2.3. Изменения сроков появления первичных ледовых явлений на озерах Кольского полуострова за период до (а) и после (б) точки смены тренда.

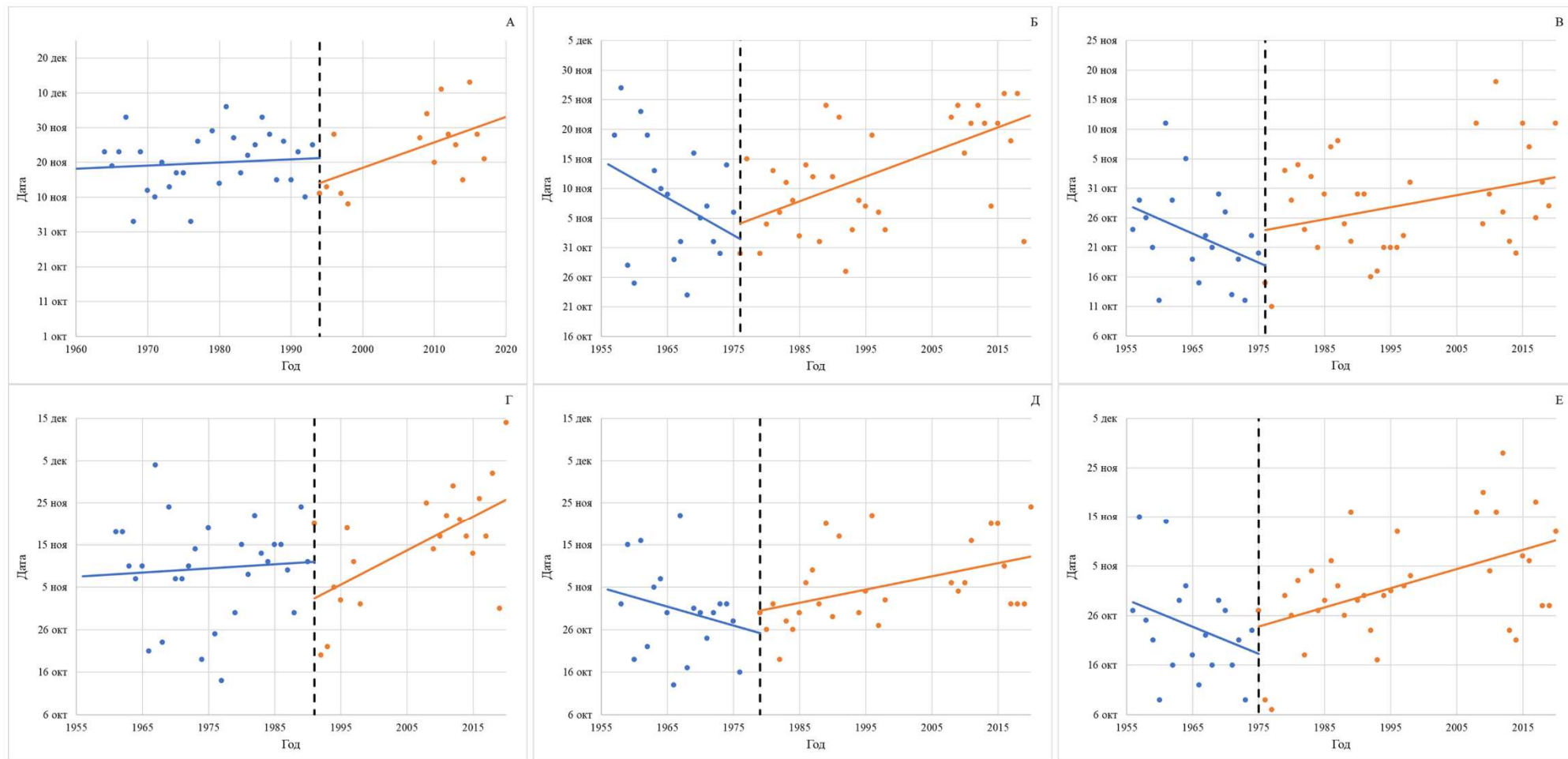


Рисунок 3.2.4. Хронологические графики дат установления ледостава на озерах Кольского полуострова по площади водного зеркала: (а, б) >500 км², (в, г) 100-500 км², (д, е) <100 км².

Глава 4. Методики прогноза характеристик ледового режима рек и озер Кольского полуострова

При прогнозировании характеристик ледового режима, в том числе сроков появления ледовых явлений, как правило, используются эмпирические подходы на основе регрессионных моделей, которые могут быть реализованы в виде регрессионных уравнений или моделей искусственных нейронных сетей, описание которых приведено в разделе 1.3 настоящей работы. При этом как к новым, так и к уточняемым методикам можно предъявить ряд обязательных требований:

1. число предикторов должно быть минимально;
2. предикторы должны однозначно определяться;
3. предикторы должны измеряться непосредственно на сети Росгидромета;
4. заблаговременность прогнозов должна быть не менее, чем у существующих методик;
5. качество выпускаемых прогнозов должно быть не ниже, чем у существующих методик.

Одним из важнейших требований к прогностическим моделям, предназначенным для внедрения на сети Росгидромета, является простота в практическом применении, предикторы должны определяться непосредственно наблюдателями.

Систематический выпуск прогнозов сроков появления ледовых явлений в России начался в 1940-х годах и к настоящему времени достиг значительных результатов. Краткосрочные прогнозы ледовых явлений основываются не только на эмпирических зависимостях, но и на физико-математических методах, в том числе использующих уравнение теплового баланса. Для составления таких прогнозов на реках и водохранилищах разработаны методики расчёта охлаждения воды, появления плавучего льда, начала ледостава, а также стока шуги и льда в период замерзания [Агафонова, 2019].

Мурманским УГМС для краткосрочного прогноза сроков появления льда и дат установления ледостава используются эмпирические зависимости вида:

$$\theta = f(t_w), \quad (4.1)$$

$$\theta = f(H), \quad (4.2)$$

где θ – минимальная среднесуточная температура воздуха, t_w – температура воды на момент перехода температуры воздуха через 0°C , H – уровень воды.

С учетом прогнозной информации о температуре воздуха и уровне воды составляется прогноз сроков появления льда и дат установления ледостава. Данный подход имеет ряд недостатков, в первую очередь, связанных с недостаточностью наблюдаемых на сети данных о температуре воды для части водных объектов Кольского полуострова. Эмпирические зависимости представлены в виде номограмм на бумажных носителях, что также увеличивает погрешность прогноза за счет субъективного фактора аппроксимации исторических данных и фактора прогнозиста. В таблице 4.1 представлены результаты ретроспективного прогноза сроков появления первичных ледовых явлений и дат установления ледостава с использованием существующих эмпирических зависимостей.

Таблица 4.1.

Ретроспективный прогноз сроков появления льда и установления ледостава на реках и озерах Кольского полуострова

Год	Первичные ледовые явления			Ледостав		
	Фактическая дата	Прогнозная дата	Ошибка	Фактическая дата	Прогнозная дата	Ошибка
оз. Куэтс-ярви - пгт. Никель						
1970	22 окт	27 окт	-5	30 окт	28 окт	2
1973	16 окт	14 окт	2	19 окт	17 окт	2
1975	28 окт	26 окт	2	27 окт	31 окт	-4
1980	23 окт	23 окт	0	29 окт	24 окт	5
1981	2 ноя	18 окт	15	3 ноя	19 окт	15
1985	28 окт	30 окт	-2	30 окт	31 окт	-1
1987	7 ноя	6 ноя	1	9 ноя	8 ноя	1

Год	Первичные ледовые явления			Ледостав		
	Фактическая дата	Прогнозная дата	Ошибка	Фактическая дата	Прогнозная дата	Ошибка
1990	5 ноя	23 окт	13	7 ноя	5 ноя	2
оз. Ловозеро - Ловозеро						
1966	7 окт	4 окт	3	15 окт	10 окт	5
1968	6 окт	7 окт	-1	21 окт	9 окт	12
1970	23 окт	20 окт	3	27 окт	27 окт	0
1980	17 окт	15 окт	2	29 окт	23 окт	6
1981	18 окт	18 окт	0	4 ноя	29 окт	6
1982	10 окт	7 окт	3	24 окт	17 окт	7
1985	18 окт	15 окт	3	30 окт	21 окт	9
1990	5 окт	3 окт	2	30 окт	7 окт	23
р.Кола - 1429 км. Октябрьской ж/д						
1965	17 окт	11 окт	6	–	–	–
1966	11 окт	5 окт	6	–	–	–
1968	9 окт	7 окт	2	–	–	–
1970	23 окт	20 окт	3	–	–	–
1973	7 окт	8 окт	-1	–	–	–
1975	15 окт	12 окт	3	–	–	–
1980	18 окт	15 окт	3	–	–	–
1981	19 окт	17 окт	2	–	–	–
1982	14 окт	16 окт	-2	–	–	–
1985	19 окт	26 окт	-7	–	–	–
1987	2 ноя	3 ноя	-1	–	–	–
1990	20 окт	5 окт	15	–	–	–
1991	21 окт	19 окт	2	–	–	–
р. Ена - пос. Ена						
1965	10 окт	7 окт	3	19 окт	10 окт	9
1968	10 окт	3 окт	7	16 окт	8 окт	8
1970	23 окт	20 окт	3	31 окт	21 окт	10
1973	8 окт	6 окт	2	15 окт	7 окт	8
1975	19 окт	7 окт	12	6 ноя	18 окт	19

Примечание: для р. Кола прогноза дат установления ледостава не был выполнен из-за отсутствия в доступе прогнозных зависимостей.

Для большинства рассматриваемых лет ошибка прогноза превышает допустимую в 2 дня, при заблаговременности прогноза осенних ледовых явлений составляющей 4 дня [Наставление по службе..., 1962].

Долгосрочные прогнозы базируются на выявлении закономерностей развития атмосферных процессов и преемственности их изменения в течение последующего периода [Георгиевский, 1986]. В последние годы получили

развитие методы, основанные на регрессионном анализе температуры поверхности океана, а также синоптико-статистические подходы, использующие характеристики атмосферной циркуляции в качестве предикторов [Методический кабинет Гидрометцентра]. Уточнение долгосрочных прогнозов осуществляется с использованием декадных прогнозов средней температуры воздуха, формируемых Гидрометцентром России на основе интеграции гидродинамических моделей атмосферы [Васильев, 1989]. За последние годы точность таких прогнозов значительно возросла. В качестве индикаторов фоновых условий, определяющих устойчивость атмосферных процессов, применяются показатели температуры поверхности океана за предшествующие месяцы [Сильницкая, 1993].

Ледовый режим водотоков оказывает значительное влияние на функционирование водозаборных систем, эксплуатацию водного транспорта и гидротехнических сооружений, определяет продолжительность использования ледовых переправ, а также существенно влияет на проведение дорожных работ и прокладку магистральных нефтепроводов и газопроводов. Рациональное использование водных ресурсов в зимний период возможно на основе прогноза ледовых явлений [Георгиевский, Шаночкин, 2007].

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 [Методика долгосрочного прогноза..., 1972]. Основной вид прогностической зависимости:

$$\Delta D_3 = f(\Sigma \Delta H, \Delta t_w^\circ), \quad (4.3)$$

где ΔD_3 – аномалия дат замерзания, $\Sigma \Delta H$ – сумма аномалий средних за сентябрь геопотенциалов, Δt_w° – изменение аномалии температуры воды на

Кольском разрезе Баренцева моря от апреля к августу. Данный вид зависимости дает возможность предсказать даты с заблаговременностью 15-45 дней.

Для прогноза с большей заблаговременностью построены прогностические зависимости вида:

$$\Delta D_3 = f(\Sigma J_B, \Delta t_W^\circ), \quad (4.4)$$

где ΣJ_B – суммарный индекс Воробьевой за характерные месяцы

Учитывая изложенное, можно сделать вывод, что методики долгосрочного прогнозирования ледовых явлений, разработанные на основе анализа атмосферной циркуляции, представляют собой важный инструмент в гидрометеорологической практике. Они опираются на физически интерпретируемые индексы, отражающие крупномасштабные особенности синоптических процессов, и позволяют с определённой степенью достоверности прогнозировать сроки наступления фаз ледового режима, особенно для крупных и средних водных объектов. 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 методик, в том числе обновления регрессионных зависимостей, расширения базы наблюдений и внедрения новых подходов к комплексному анализу изменчивости климатической системы и ледового режима.

Глава 5. Разработка моделей машинного обучения для прогнозирования характеристик ледового режима

Прогнозирование ледовых явлений на реках представляет собой важную и научно сложную задачу в области гидрологии. Ледовые процессы оказывают существенное влияние на водный режим, экологическое состояние водных объектов, а также на безопасность прибрежных территорий, в частности — в связи с рисками ледовых заторов и последующих паводков [Graf, Kolerski, Zhu, 2022; Методы оценки последствий..., 2012; Добровольский, Истомина, 2006; Бузин, 2009].

На ранних этапах прогнозирования применялись преимущественно эмпирико-статистические методы — в частности, пороговые критерии, логистическая регрессия, дискриминантный анализ, динамико-стохастические модели и другие традиционные методы [Сумачев, 2022; Гельфан, Морейдо, 2014; Гельфан, Морейдо, 2015]. Разрабатывались и физически ориентированные модели, такие как RIVICE и DynaRICE, основанные на термогидродинамических уравнениях. Однако их практическое применение нередко затруднено высокой вычислительной трудоёмкостью и повышенными требованиями к качеству и детализованности входных данных.

С развитием технологий искусственного интеллекта появились новые подходы к прогнозированию ледового режима. Методы машинного обучения (ML) и глубинного обучения (DL) демонстрируют способность выявлять нелинейные взаимосвязи между множеством климатических и гидрологических параметров, что особенно актуально при работе с разнородными и неполными данными.

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 [OPENFORECAST: The First..., 2019, Возможности краткосрочного прогнозирования..., 2020, Айзель, 2017, Кузьменко, Лисецкий, Пичура, 2012]. 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 то же время в зарубежной научной литературе описаны успешные примеры использования моделей искусственных нейронных сетей (Artificial Neural Networks, ANN) для задач прогнозирования замерзания рек, формирования ледяного покрова, оценки толщины льда и идентификации риска ледяных заторов [Graf, Kolerski, Zhu, 2022]. Кроме того, в ряде работ применялись нечеткие логические системы, а также гибридные архитектуры, включающие нейро-нечеткие модели и волновые нейронные сети, для прогнозирования сроков ледохода [Over-Learning Phenomenon..., 2017; Sun, Trevor, 2015].

Ключевым преимуществом методов ML/DL является их способность выявлять сложные нелинейные зависимости между переменными, а также адаптироваться к разнородным входным данным, что особенно важно при работе с комплексными метеорологическими и гидрологическими показателями.

Настоящая работа направлена на обзор и сравнительный анализ современных моделей машинного и глубокого обучения, применимых к задаче прогнозирования сроков появления первичных ледовых явлений и установлении ледостава. Особое внимание уделяется различным постановкам задач (регрессионные модели для предсказания конкретных дат и классификационные подходы для идентификации наступления ледовых явлений).

5.1. Обзор существующих подходов к созданию нейросетевых моделей для прогностических задач и оценка их качества

Ансамблевые деревья решений: Random Forest, XGBoost, CatBoost.

Random Forest (RF) и градиентные бустинговые алгоритмы (XGBoost, CatBoost) – мощные методы машинного обучения, широко применяющиеся для прогнозирования в гидрологии [Graf, Kolerski, Zhu, 2022]. Они основаны на ансамбле деревьев решений и способны моделировать нелинейные зависимости между множеством входных факторов и целевым показателем. Преимущество RF – устойчивость к переобучению за счет усреднения множества деревьев, каждое из которых обучается на случайной выборке признаков. XGBoost и CatBoost – методы градиентного бустинга, которые строят ансамбль последовательно, каждое новое дерево корректирует ошибки предыдущих, что повышает точность. В контексте ледовых явлений эти модели привлекательны тем, что хорошо работают даже при относительно небольших и неполных данных, автоматически учитывая неявные взаимодействия между переменными и не требуя ручного подбора сложных функций.

Ансамблевые методы могут напрямую предсказывать дату наступления прогнозируемого ледового явления. Так, в недавнем исследовании для реки Хэйлуцзян сравнивали несколько алгоритмов (нейросеть, RF, SVM и XGBoost) для прогноза даты весеннего ледохода; наилучший результат показал XGBoost – среднеквадратичная ошибка около 2 дней, что свидетельствует о высокой точности определения даты [Forecasting the River..., 2025]. Схожие подходы применимы и к прогнозу сроков осенних ледовых явлений. Для классификации (например, «проойдет ли ледостав в пределах заданного окна» или распознавание самого дня события) ансамблевые деревья могут прогнозировать вероятность наступления события на данный день, либо класс «лед есть/нет». Random Forest уже применялся для классификации фаз ледового режима: например, с его помощью моделировали

пространственное распределение дат замерзания/вскрытия на больших реках [Chu, Lindenschmidt, 2019].

Особого внимания заслуживает возможность построения гибридных ансамблей, основанных на комбинировании различных моделей, что позволяет учитывать преимущества каждого из подходов и повышать общую устойчивость и точность прогноза. В гидрологии набирают популярность ансамбли второго уровня (stacking), объединяющие прогнозы нескольких алгоритмов для повышения надежности работы общей модели [Zhang, Zhao, Zheng, 2020]. Один из рассматриваемых подходов – XGBoost+LSTM – как раз относится к гибридным схемам, где предполагается совместное использование градиентного бустинга и рекуррентной нейросети. В литературе имеются примеры гибридных нейросетевых моделей с традиционными – например, применение в гидрологических прогнозах wavelet-преобразований совместно с ANN, нейро-нечетких моделей [Zhao, 2012], или объединение статистических методов с алгоритмами машинного обучения обеспечила прирост точности в задаче оценки толщины ледяного покрова [Using Remote Sensing..., 2024].

Рекуррентные нейронные сети: LSTM, BiLSTM, GRU

Архитектуры рекуррентных нейронных сетей (RNN), в частности, модели с долгой краткосрочной памятью (LSTM), являются хорошим выбором для анализа последовательностей, к которым относятся временные ряды метеорологических и гидрологических характеристик. В отличие от методов на основе деревьев решений, RNN неявно моделируют зависимость текущего состояния от предшествующих, проходя по последовательности входов день за днем. LSTM обладает механизмом долговременной памяти, позволяющим хранить информацию о прошлых шагах на большой дистанции, что особенно важно для ледовых процессов (например, для учета накопленной суммы отрицательных температур воздуха за многие недели до наступления события). RNN уже успешно применяются для гидрометеорологических задач – например, LSTM отлично зарекомендовала себя в прогнозировании

суточного стока и уровня воды в условиях снегового питания. Установлено, что модели типа LSTM демонстрируют превосходство над традиционными методами при прогнозировании паводков в холодных климатических регионах, где критическую роль играют длительные временные зависимости — например, накопление талых вод или процессы замерзания [Atashi, Taheri Gorji, 2025]. По аналогии, можно обоснованно предположить, что LSTM будет эффективно применима и для моделирования процессов ледообразования и установления ледостава, поскольку главным предиктором для прогноза сроков осенних ледовых явлений является температура воздуха.

Следует упомянуть, что RNN можно строить не только одномерными (вперед по времени), но и двунаправленными. BiLSTM (Bidirectional LSTM) — это архитектура, в которой последовательность обрабатывается в двух направлениях: от начала к концу и от конца к началу, а результаты объединяются. В гидрологической литературе двунаправленные рекуррентные нейронные сети (BiLSTM) применяются преимущественно для распознавания сложных закономерностей в структуре временных рядов.

GRU (gated recurrent unit) — это облегченная альтернатива LSTM, тоже относящаяся к рекуррентным сетям. GRU имеет упрощенную структуру памяти с меньшим числом параметров, но при многих задачах показывает сравнимую с LSTM точность. В задачах прогнозирования гидрологических временных рядов GRU широко применялась наряду с LSTM [Convolutional neural network..., 2022]. Например, для прогноза уровня воды или осадков GRU иногда выбирают, если данных не очень много или нужны более простые модели. В контексте моделирования ледовых процессов использование архитектуры GRU (Gated Recurrent Unit) может оказаться целесообразным в случаях, когда необходимо ускорить перебор различных конфигураций нейросетевых моделей или при наблюдаемом переобучении более глубокой LSTM-архитектуры. За счёт упрощённой структуры GRU обладает меньшим числом параметров и, как следствие, сниженным риском переобучения на

ограниченных выборках, что делает её привлекательной альтернативой в задачах оперативного прогноза.

Свёрточные и гибридные глубокие модели: CNN+LSTM, Transformer

Для повышения эффективности анализа временных данных в последнее время широко применяются гибридные нейросетевые архитектуры, сочетающие различные типы моделей. Одним из перспективных подходов является использование сверточных нейронных сетей (CNN) в сочетании с рекуррентными сетями (LSTM). В такой архитектуре сверточные слои выполняют функцию автоматического извлечения локальных признаков во временном ряду — например, характерных суточных или многодневных колебаний температуры воздуха, предшествующих началу ледообразования, — в то время как рекуррентные слои агрегируют извлечённую информацию во времени и устанавливают связь между обнаруженными шаблонами и целевым исходом (наступление ледостава или его отсутствие).

Эффективность подхода CNN+LSTM подтверждена в ряде прикладных исследований. Так, в одном из недавних исследований, охватывающем данные по 150 рекам провинции Квебек, данная архитектура была использована для классификации вероятности формирования ледяных заторов на основе многодневных гидрометеорологических наблюдений. Гибридная модель показала наилучшие результаты по сравнению с отдельно применяемыми CNN и LSTM: на тестовой выборке значение F1-score достигало 0.92, что указывает на высокую точность классификации. Авторы подчеркивают, что именно сочетание свёрточных и рекуррентных компонентов позволяет учесть как пространственно-временные закономерности в данных, так и их долговременные зависимости [Convolutional neural network..., 2022].

Трансформеры (Transformer) представляют собой современный класс моделей глубокого обучения, специально разработанный для обработки последовательностей и основанный на механизме самовнимания (self-attention). Первоначально предложенные в задачах обработки естественного

языка, трансформер-архитектуры в последние годы находят всё более широкое применение в анализе временных рядов, включая гидрологические и климатические данные [Subhadarsini et al., 2025].

В гидрологических исследованиях модели-трансформеры уже демонстрируют удовлетворительные результаты при прогнозировании речного стока, уровней воды и температурных режимов [Orozco López et al., 2024]. Согласно этим работам, использование механизмов внимания способствует увеличению точности моделей за счёт более гибкого учёта как краткосрочных, так и долговременных факторов, влияющих на целевую переменную. Несмотря на отсутствие прямых публикаций, посвящённых применению трансформеров к прогнозу процессов ледообразования, можно ожидать, что по мере накопления данных и увеличения длины доступных последовательностей они смогут превзойти традиционные рекуррентные подходы благодаря отсутствию эффекта исчезающего градиента.

При создании моделей машинного обучения для прогнозирования дат начала ледообразования и установления ледостава на реках важно правильно оценивать точность предсказаний. Для этого применяются специализированные метрики, выбор которых определяется характером решаемой задачи. В диссертационной работе рассматриваются два подхода: классификация (определение класса ледовых явлений на каждый день прогнозируемого периода) и регрессия (прогноз конкретной календарной даты наступления события). В тексте приводится обзор ключевых метрик, используемых для оценки моделей в каждом из подходов, с пояснением их смысла, сферы применения и ограничений с учётом особенностей ледовых процессов. Также даётся обоснование выбора этих метрик на основе современных научных подходов в области машинного обучения и гидрологических прогнозов.

Метрики для задач классификации

Для оценки эффективности классификационных моделей широко применяются метрики, основанные на анализе матрицы ошибок (confusion

matrix). В рассматриваемом исследовании используются такие показатели, как Accuracy, Precision, Recall и F1-мера. Каждая из них характеризует различные стороны качества классификации: Accuracy отражает общую долю правильных предсказаний, Precision оценивает точность положительных предсказаний, Recall показывает полноту выявления положительных случаев, а F1-score балансирует между точностью и полнотой, предоставляя сводную оценку [Evaluation metrics and statistical..., 2024].

Accuracy – это доля правильных предсказаний модели, рассчитываемая как отношение количества верно классифицированных примеров ко всему числу примеров:

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN}, \quad (5.1.1)$$

где TP , TN , FP , FN – элементы матрицы ошибок (истинно положительные, истинно отрицательные, ложноположительные и ложноотрицательные срабатывания). Данная метрика показывает общую точность модели, то есть какую часть всех случаев она классифицирует верно [Михайличенко, 2022].

В контексте ледовых явлений высокая accuracy указывает на большую долю сезонов, в которых модель правильно спрогнозировала наступление льда (либо правильное отсутствие события) относительно фактических данных. Область применения: accuracy особенно информативна, когда классы сбалансированы и ошибки всех видов критичны примерно в равной степени. Ограничения: при дисбалансе классов данный показатель может вводить в заблуждение.

Precision (положительная прогностическая ценность) отражает долю случаев, в которых предсказанное моделью наступление события действительно имело место. Формально метрика вычисляется как:

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP}, \quad (5.1.2)$$

Высокое значение precision означает, что большинство «срабатываний» модели были оправданными, то есть она редко выдает ложные прогнозные значения. В контексте ледовых прогнозов это особенно важно, если

последствия ложного сигнала (например, преждевременного ожидания появления первичных ледовых явлений) могут привести к неоправданным затратам или рискам.

Recall – это доля реально произошедших событий, которые модель сумела предсказать. Иначе говоря, recall (полнота) равен:

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP+FN}, \quad (5.1.3)$$

Полнота особенно ценна при прогнозировании редких, но значимых событий, например, аномально раннего ледостава, где пропуск может повлечь серьёзные последствия. Однако односторонняя ориентация на повышение recall может привести к росту количества ложных срабатываний: модель может предсказывать событие повсеместно, достигая recall, близкого к 100%, но при этом precision (точность) сильно снизится. Поэтому на практике recall всегда анализируют в паре с precision — для оценки баланса между чувствительностью модели и её точностью. Оба показателя необходимы для объективной и всесторонней оценки качества классификатора, особенно в задачах с дисбалансом классов [Sokolova, Lapalme, 2009].

F1-score представляет собой гармоническое среднее между точностью (precision) и полнотой (recall), объединяя эти два показателя в единый сбалансированный критерий. F1 особенно полезна в задачах, где классы несбалансированы (например, редкие ледовые аномалии), а также когда важно получить обобщённую оценку качества модели одним числом — с учётом как ложных срабатываний модели, так и пропущенных событий. Это делает F1 практичным инструментом для оценки моделей, используемых в прогнозировании ледовых явлений. F1-score предполагает равную важность точности и полноты.

Таким образом, использование комплекса метрик — accuracy, precision, recall и F1-score — позволяет провести всестороннюю и обоснованную оценку классификационной модели. Это особенно важно в гидрологической

практике, где от качества прогноза зависят управленческие и инфраструктурные решения.

Метрики для задач регрессии

В регрессионной постановке задача модели заключается в прогнозировании точной календарной даты наступления ледового события — дня появления первичных ледовых явлений и установления ледостава на реке. Поскольку и предсказание, и наблюдаемое значение являются количественными временными величинами, оценка качества модели основывается на анализе величины временной ошибки прогноза.

В данной работе используются три группы метрик. Первая — MAE (Mean Absolute Error), или средняя абсолютная ошибка, выраженная в днях. Она показывает, на сколько дней в среднем модель отклоняется от реальной даты события, вне зависимости от направления ошибки (раньше или позже). MAE является простой и интерпретируемой метрикой, позволяющей количественно оценить точность модели. MAE широко используется в задачах временного прогнозирования, включая исследования ледового режима, благодаря своей простоте и интерпретируемости. Она линейно учитывает ошибки: каждое отклонение влияет на итог одинаково, вне зависимости от его величины. В отличие от RMSE (среднеквадратическая ошибка), метрика не завышает вклад единичных крупных ошибок, что делает её менее чувствительной к выбросам. Это особенно важно в условиях нестабильности отдельных лет, вызванной, например, экстремальными погодными условиями.

Вторая группа метрик в регрессионной постановке — это доля предсказаний, попавших в заданные интервалы допустимой ошибки: ± 2 , ± 3 , ± 5 , ± 10 и ± 15 дней от фактической даты события. Эти метрики характеризуют надёжность модели в прикладном смысле: они позволяют понять, насколько часто модель даёт результат с необходимой оправдываемостью. В отличие от MAE, который отражает среднюю ошибку, пороговые метрики позволяют оценить надёжность модели в конкретных временных пределах, что особенно важно для задач, где существует установленный допуск на ошибку прогноза.

В гидрологической практике такие метрики имеют высокую прикладную ценность. Например, в ряде служб считается, что прогноз соответствует I категории качества, если ошибка не превышает ± 3 дней при горизонте прогноза в 10 суток. Следовательно, показатель доли попаданий в это окно напрямую соотносится с отраслевыми стандартами. Так, в исследовании по реке Хэйлуцзян модель XGBoost достигла 85,7% попаданий в диапазон ± 3 дней, что соответствует высшему классу прогноза [Forecasting the River..., 2025]. Для прогнозов ледовых явлений такие оценки позволяют определить, насколько модель пригодна для оперативного планирования. Например, доля попаданий в окно ± 15 дней, близкая к 95%, свидетельствует о высокой общей надёжности модели, тогда как показатель ± 3 дней (например, 60%) позволяет судить о точности в строгом смысле. Пороговые интервалы также учитывают специфику практического применения: прогноз, отклоняющийся от фактической даты на несколько суток, может сохранять прикладную ценность и оставаться полезным для принятия решений. Поэтому анализ распределения точности по различным временным окнам даёт более полную картину, чем единичная метрика вроде MAE. Таким образом, анализ долей прогнозов, попадающих в установленные интервалы, представляет собой важное дополнение к средним ошибкам и обеспечивает всестороннюю оценку точности регрессионной модели с учётом практической значимости.

В практике гидрологических прогнозов допускается оценивать методику, не имеющую фиксированной даты составления прогноза по средней квадратической погрешности проверочных прогнозов (S). Методика считается допустимой для выпуска прогнозов, если погрешность проверочных прогнозов в 85% случаев из их общего числа не превышает допустимую. Допустимая погрешность (± 2 дня) назначается исходя из средней заблаговременности прогнозов, которая для осенних ледовых явлений составляет 4 дня. Хорошей моделью считается при соотношении $S \leq 3.0$, удовлетворительной при $S \leq 4.8$ [Наставление по службе..., 1962]. Стоит отметить, что для оценки качества методик будет использоваться

ненормированная S на число постоянных в прогностическом уравнении, так как построенные архитектуры имеют достаточно большое количество параметров.

5.2. Прогноз сроков появления льда и установления ледостава с использованием регрессионного подхода

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.

Заблаговременность прогнозов сроков первичных ледовых явлений и дат установления ледостава, полученных с помощью моделей регрессионного подхода, соответствует заблаговременности прогнозов метеорологических параметров и составляет 4 дня. Применительно к долгосрочному прогнозированию, разработанные модели могут иметь рекомендательный характер, так как прогноз появления классов ледовых явлений выполняется с использованием данных за предшествующие прогнозируемому явлению 14

дней. Точность же данного прогноза будет зависеть от точности долгосрочных прогнозов метеорологических и гидрологических параметров.

В первую очередь была использована модель градиентного бустинга на деревьях решений — XGBoost Regressor, предложенная Т. Ченом и К. Гестрином [Chen, Guestrin, 2016]. Так как прогностическая модель создавалась для всех исследуемых постов Кольского полуострова, то одним из признаков модели является код поста. Так как он является категориальным признаком, то напрямую его использование в методах машинного обучения не всегда возможно. Для их преобразования в нужный формат применялся метод one-hot encoding, реализованный через класс OneHotEncoder из библиотеки scikit-learn. One-hot encoding позволяет: избежать введения ложного порядка между категориями, что может произойти при использовании методов, присваивающих числовые значения категориям; представить категориальные данные в формате, пригодном для большинства алгоритмов машинного обучения [Hancock, Khoshgoftaar, 2020].

Перед обучением данных предикторы модели нормализовались с помощью метода StandardScaler. Масштабирование признаков является критически важным этапом предварительной обработки данных, особенно при использовании алгоритмов, чувствительных к масштабам входных данных. Стандартизация данных позволяет: устранить влияние различий в масштабах признаков на обучение модели, ускорить сходимость алгоритмов оптимизации, повысить стабильность и точность модели. Исследования показывают, что выбор метода масштабирования существенно влияет на производительность моделей классификации и регрессии [De Amorim, Cavalcanti, Cruz, 2023]. Обучение модели проводилось со следующими параметрами:

- `n_estimators = 100` — число базовых моделей (деревьев), формирующих ансамбль. Увеличение этого значения позволяет модели учитывать более сложные зависимости, но может привести к переобучению.

Выбор 100 деревьев является стандартной начальной настройкой и обеспечивает разумный баланс между точностью и скоростью обучения;

- `max_depth = 4` – максимальная глубина каждого дерева. Более глубокие деревья способны моделировать более сложные зависимости, но повышают риск переобучения. Деревья глубиной от 3 до 6 являются оптимальными для большинства прикладных задач, включая задачи регрессии во временных рядах [Kuhn, Johnson, 2013];

- `learning_rate = 0.1` – скорость обучения, контролирующая вклад каждого дерева в итоговое предсказание. Низкие значения `learning rate` позволяют улучшить обобщающую способность модели, компенсируя это увеличением числа деревьев. Значение 0.1 широко используется как базовое и рекомендовано в классической литературе [Friedman, Hastie, Tibshirani, 2009];

- `random_state = 42` — параметр инициализации генератора случайных чисел, необходимый для воспроизводимости результатов;

- `eval_metric = "mae"` – метрика качества, использованная для оценки ошибок модели на валидационной выборке. Средняя абсолютная ошибка (MAE) предпочтительна в задачах, где важно минимизировать модуль ошибки в днях, что особенно актуально для прогнозирования дат.

По результатам работы модели был построен график изменения средней ошибки на обучающей и тестовой выборке в зависимости от числа итераций, что позволило контролировать переобучение модели. Под переобучением понимается ситуация, когда модель машинного обучения слишком точно запоминает тренировочные данные включая шум и случайные колебания, и из-за этого плохо работает на новых, ранее не используемых данных.

Следующим исследуемым методом стала модель CatBoost Regressor — градиентный бустинг на симметричных деревьях, разработанный компанией Яндекс [CatBoost: unbiased boosting..., 2018]. Обучение проводилось на тех же исходных данных и с такими же параметрами, как и в случае с XGBoost. Единственным отличием в подходах стал ввод ранней остановки обучения (early stopping), при увеличении средней ошибки в процессе обучения.

Дальнейшим шагом в исследовании был переход от методов машинного обучения к глубокому обучению. Первой была реализована нейросетевая архитектура Bidirectional LSTM (BiLSTM). Такая архитектура позволяет учитывать как прямую, так и обратную временную зависимость во входной последовательности, что критически важно для задач, связанных с прогнозом переходов состояний на основе временных рядов [Graves, Schmidhube, 2005]. Архитектура модели представлена в таблице 5.2.1. Для масштабирования и кодирования постов, как и во всех последующих нейронных сетях используется one-hot encoder и StandardScaler, соответственно.

Таблица 5.2.1.

Архитектура нейросетевой модели типа Bidirectional LSTM

№	Слой	Параметры	Назначение
1	Вход		Подготовка признаков к LSTM-формату
2	Bidirectional LSTM	Количество нейронов 64	Обработка временных зависимостей в двух направлениях
3	Dropout	30% отключаемых нейронов	Регуляризация, предотвращение переобучения
4	Dense	Количество нейронов 32, метод активации Relu	Нелинейное преобразование, уменьшение размерности
5	Выход		Прогноз количества дней до события

В каждом слое нейронной сети используется функция активации. Для полносвязанного слоя (Dense) используется функция Relu, в остальных случаях линейная. Функция активации — это математическая операция, применяемая к выходу нейронов, позволяющая нейросети обучаться нелинейным зависимостям между входами и целевой переменной. Без применения активации, даже глубокая нейросеть сводится к обычному линейному преобразованию, а значит, теряет свою обучающую мощьность [Goodfellow, Bengio, Courville, 2016]. Среди наиболее распространенных функций можно выделить: сигмоиду, тангенсальную и Relu. Преимуществами функции активации Relu является сохранение градиента при больших входных значениях обеспечивая более быструю и устойчивую сходимость [Glorot, Bordes, Bengio, 2011]. При отрицательных входах ReLU возвращает 0,

что способствует разреженности сети (активируются не все нейроны), снижая переобучение и улучшая обобщающую способность модели.

Обязательным модулем в работе нейронных сетей является оптимизатор. Оптимизатор – это алгоритм, используемый для обновления параметров нейронной сети (весов и смещений) в процессе обучения. Его задача — минимизировать функцию потерь, которая измеряет расхождение между предсказанием модели и реальными значениями [Goodfellow, Bengio, Courville, 2016]. На каждом шаге обучения оптимизатор определяет направление и величину изменений параметров с учётом значения градиента функции потерь. Таким образом, оптимизатор играет ключевую роль в эффективном и устойчивом обучении нейронной сети. В данной работе в качестве оптимизатора используется Adam (Adaptive Moment Estimation) — один из самых популярных и эффективных алгоритмов оптимизации в глубоком обучении. Он совмещает в себе преимущества адаптивных методов, таких как AdaGrad и RMSProp, автоматически настраивая скорость обучения для каждого параметра. Это особенно важно при работе с данными, характеризующимися разреженностью и шумами, как это часто бывает в гидрометеорологических временных рядах. Adam устойчив к колебаниям градиентов и обеспечивает быструю сходимость даже при плохой инициализации параметров [Kingma, Ba J. Adam, 2015].

Алгоритм Adam основан на адаптивной оценке первого и второго моментов градиентов. Он рассчитывает экспоненциально сглаженные оценки среднего и дисперсии градиента, после чего масштабирует шаг обновления параметров в соответствии с их исторической изменчивостью. Благодаря этому обеспечивается как стабильность, так и высокая скорость обучения. В отличие от стохастического градиентного спуска (SGD), Adam менее чувствителен к выбору начального темпа обучения и часто не требует его ручной настройки, что делает его универсальным решением для большинства архитектур.

В процессе обучения модели использовались следующие параметры. Обучение проводилось в течение 50 эпох, однако оно могло завершиться досрочно благодаря использованию механизма ранней остановки (EarlyStopping). Этот механизм позволяет контролировать качество модели по валидационной выборке: если метрика `val_loss` (валидационная ошибка) не улучшается в течение 10 последовательных эпох (параметр `patience = 10`), обучение автоматически прекращается, а модель возвращается к лучшим зафиксированным весам. Размер батча (`batch size`) был установлен равным 32. Такое значение обеспечивает разумный компромисс между скоростью итераций и стабильностью обновления градиента. Более крупные батчи приводят к сглаживанию градиента, но требуют больше памяти, в то время как меньшие обеспечивают более частое обновление весов, но вносят дополнительный шум в обучение. Выбор `batch size = 32` хорошо зарекомендовал себя в задачах, связанных с временными рядами и ограниченными выборками.

Модель на основе GRU (Gated Recurrent Unit) реализована как последовательная архитектура, предназначенная для моделирования временной зависимости во входных признаках. В отличие от LSTM, GRU использует упрощённую структуру, объединяя механизмы "запоминания" и "забывания" в едином блоке, что снижает вычислительную нагрузку без значительной потери точности. Параметры обучения, функции активации и оптимизатор были идентичны тем, что применялись в модели Bidirectional LSTM.

Комбинированная нейросетевая архитектура, сочетающая сверточные слои (CNN) и рекуррентные слои с долгой краткосрочной памятью (LSTM) (табл. 5.2.2). Такая структура позволяет одновременно извлекать локальные зависимости между признаками и учитывать их временную динамику, что особенно актуально для задач прогнозирования природных процессов, включая дату наступления ледовых явлений. Параметры обучения, функции активации и оптимизатор были идентичны предыдущим моделям.

Таблица 5.2.2.

Архитектура нейросетевой модели типа CNN+LSTM

№	Слой	Параметры	Назначение
1	Вход		Формат временного ряда для LSTM и Conv1D
2	Conv1D	64 фильтра, метод активации Relu	Извлечение локальных закономерностей во входных признаках
3	BatchNormalization		Нормализация выхода свёрточного слоя, ускорение обучения
4	LSTM	Количество нейронов 64	Извлечение временной зависимости из данных
5	Dropout	30% отключаемых нейронов	Предотвращение переобучения путём случайного отключения нейронов
6	Dense	Количество нейронов 32, метод активации Relu	Нелинейное преобразование, переход к регрессии
7	Выход		Выходной слой: предсказание количества дней до события

Следующая модель построена на основе механизма самовнимания (Self-Attention), реализованного через Transformer Encoder (табл. 5.2.3). Она позволяет извлекать глобальные зависимости между входными признаками, независимо от их порядка, что особенно полезно при анализе сложных структур данных.

Таблица 5.2.3.

Архитектура нейросетевой модели типа Transformer

№	Слой	Параметры	Назначение
1	Вход (embedding encoding)	Dense слой, кодирующий вход в векторное представление	Представление признаков в высокоразмерном пространстве
2	Positional Encoding	Добавляется к embedding-вектору	Введение информации о порядке признаков
3	TransformerEncoder	MultiHeadAttention + нормализация + FFN	Извлечение контекста и глобальных зависимостей
4	GlobalAveragePooling1D		Сжатие выхода по временной оси
5	Dropout	30% отключаемых нейронов	Регуляризация
6	Dense	Количество нейронов 64, метод активации Relu	Переход к выходу
7	Выход		Прогноз количества дней до события

Помимо идентичных с предыдущими нейронными сетями параметров обучения и компиляции в архитектуре присутствуют мощные компоненты, значительно отличающие архитектуру Transformer от других нейросетевых моделей. Механизм внимания (attention) позволяет каждому элементу последовательности «взвешенно» обращаться к другим элементам, определяя, какие из них наиболее важны для текущего предсказания. При этом MultiHeadAttention расширяет базовый подход, разделяя входные данные на несколько подпространств признаков и обучая отдельные механизмы внимания — так называемые «головы». Каждая из голов работает независимо, фокусируясь на разных аспектах входной информации, после чего их выходы объединяются и проецируются обратно в исходное пространство признаков. Таким образом, сеть может одновременно учитывать несколько типов отношений между входными элементами [Attention is All..., 2017].

Сравнение работы методов машинного обучения и нейросетевых методик для рек представлены в таблице 5.2.4 и рисунке 5.2.1, для озер – в таблице 5.2.6 и рисунке 5.2.2.

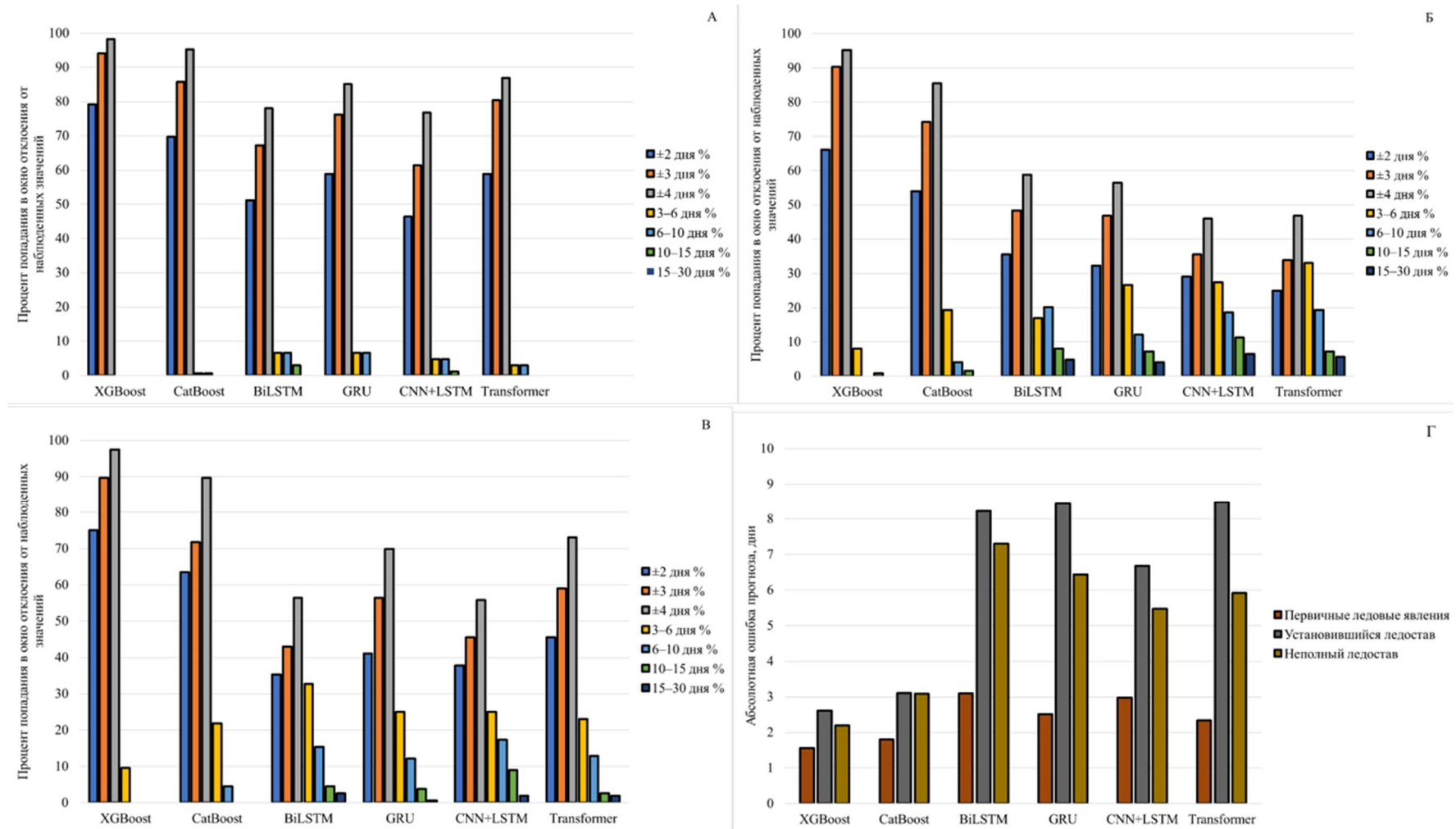


Рисунок 5.2.1. Оценка точности прогностических моделей регрессионного типа для рек. (а) первичные ледовые явления, (б) установившийся ледостав, (в) неполный ледостав, (г) абсолютная ошибка прогноза

Таблица 5.2.4.

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

Метрика	Первичные ледовые явления					
	XGBoost	CatBoost	BiLSTM	GRU	CNN+LSTM	Transformer
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
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. 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. В таблице 5.2.5 приведены оценки работы модели для исследуемых рек, для которых есть ряды наблюдений в тестовом периоде.

Таблица 5.2.5.

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

Река -пост	S	%4дня	S	%4дня	S	%4дня
XGBoost						
р.Чаваньга - с.Чаваньга	1.4	100	2.1	100	2.8	100
р.Ена - пос.Ена	1.7	100	2.0	100	2.2	100
р.Гольцовка - ст.Имандра	2.0	100			2.5	90
р.Кица - ст.Лопарская	1.8	100	2.0	100	2.2	88
р.Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	2.1	100	1.9	100	2.0	100
р.Кола - исток	1.5	100	2.3	100		
р.Малая Белая - ст.Хибины	2.6	100			2.0	90
р.Монча - г.Мончегорск	2.4	90			1.6	100
р.Печа - с.Падун	1.8	100	2.4	100	2.2	90
р.Поной - с.Каневка	1.8	100	2.2	100	1.6	100
р.Поной - с.Краснощелье	1.6	100	2.0	100	1.8	100
р.Туманная - пос.Туманный	2.3	90	2.1	100	1.7	100
р.Тумча - пос.Алакуртти	1.4	100	2.1	100	2.3	100
р.Умба - исток	1.5	100			2.2	100
р.Умба - пор.Паялка	1.5	100			2.1	100
р.Ура - с.Ура-Губа	1.8	100	23.9	80	2.1	90
р.Варзуга - с.Варзуга	1.4	100	2.1	100	2.7	100
р.Юкспорйок - г.Кировск	2.4	100	3.8	67	2.5	100
CatBoost						
р.Чаваньга - с.Чаваньга	1.9	100	4.2	70	3.4	86
р.Ена - пос.Ена	2.0	90	2.6	90	3.4	83
р.Гольцовка - ст.Имандра	2.3	100			12.3	90

Река -пост	S	%4дня	S	%4дня	S	%4дня
р.Кица - ст.Лопарская	2.6	90	3.5	91	2.5	88
р.Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	2.5	89	2.3	100	2.1	100
р.Кола - исток	1.5	100	13.8	60		
р.Малая Белая - ст.Хибины	2.7	90			17.3	80
р.Монча - г.Мончегорск	2.4	100			5.3	71
р.Печа - с.Падун	2.4	90	3.3	90	2.4	90
р.Поной - с.Каневка	2.2	100	3.5	80	2.6	90
р.Поной - с.Краснощелье	2.2	100	2.7	90	2.4	100
р.Туманная - пос.Туманный	2.2	100	2.7	90	1.8	100
р.Тумча - пос.Алакуртти	1.5	100	2.0	100	3.3	80
р.Умба - исток	2.0	100			2.8	90
р.Умба - пор.Паялка	2.1	100			10.5	91
р.Ура - с.Ура-Губа	2.7	90	16.5	70	3.0	90
р.Варзуга - с.Варзуга	1.8	100	3.6	91	3.4	89
р.Юкспорйок - г.Кировск	3.3	80	5.7	33	5.0	67

Примечание: S – средняя квадратическая ошибка проверочных прогнозов, %4 дня – количество прогнозных значений, отличающихся от зафиксированных дат появления ледового явления не более чем на 4 дня (в %).

По результатам анализа работы модели отдельно по каждой реке к применению можно рекомендовать метод, основанный на работе алгоритма XGBoost. Несмотря на то, что по прогнозам первичных ледовых явлений обе модели можно признать хорошими, по результатам прогноза ледостава модель CatBoost не следует рекомендовать для прогноза сроков осенних ледовых явлений. Для большинства рек она показывает удовлетворительные результаты, однако, для ряда рек превышает допустимые погрешности по средней ошибке прогноза и не выдерживает требований по заблаговременности прогноза. Метод, основанный на XgBoost, показывает хорошие результаты прогноза дат установления ледостава для всех рек, за исключением рек Ура и Юкспорйок.

Таблица 5.2.6.

Сравнение методов машинного обучения и нейросетевых моделей для прогноза сроков появления льда и установления ледостава на озерах 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
±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. 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 удовлетворительным. 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 таблице 5.2.7 приведены оценки работы модели для исследуемых озер, для которых есть ряды наблюдений в тестовом периоде.

Таблица 5.2.7.

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

Озеро-пост	ПЛЯ		Ледостав	
	S	%4дня	S	%4дня
XGBoost				
Имандра-пгт. Зашеек	1.5	100	2.3	91
Имандра-ст. Хибины	1.7	100	2.4	100
Иовское - пос. Зареченск	3.1	73	6.6	73
Княжегубское - с. Ковдозеро	3.2	80	6.9	73
Куэтс-ярви-пгт. Никель	2.3	100	2.3	100
Ловозеро-с. Ловозеро	1.9	91	2.4	91
Пермус-озеро-г. Оленегорск			2.7	88
Пулозеро-ст. Пулозеро	2.2	100	2.6	91
Серебрянское-пос. Серебрянский	1.7	100	2.5	91
Умб-озеро-исток р. Умбы	1.9	100	3.0	91
В. Туломское-с. Ниванкюль			4.2	63
CatBoost				
Имандра-пгт. Зашеек	2.2	100	3.0	91
Имандра-ст. Хибины	2.1	100	2.5	100
Иовское - пос. Зареченск	3.5	73	7.1	73
Княжегубское - с. Ковдозеро	3.7	80	8.0	55
Куэтс-ярви-пгт. Никель	1.6	100	2.3	100
Ловозеро-с. Ловозеро	2.0	91	2.5	91
Пермус-озеро-г. Оленегорск			2.2	88
Пулозеро-ст. Пулозеро	2.0	100	2.8	100
Серебрянское-пос. Серебрянский	2.1	100	2.7	91
Умб-озеро-исток р. Умбы	2.3	91	4.6	91
В. Туломское-с. Ниванкюль			4.5	63
Transformer				
Имандра-пгт. Зашеек	2.4	100	3.1	91
Имандра-ст. Хибины	2.6	100	3.8	82
Иовское - пос. Зареченск	3.8	73	8.7	55
Княжегубское - с. Ковдозеро	4.8	70	9.4	45
Куэтс-ярви-пгт. Никель	1.6	100	2.9	89

Озеро-пост	ПЛЯ		Ледостав	
	S	%4дня	S	%4дня
Ловозеро-с. Ловозеро	2.5	100	2.2	91
Пермус-озеро-г. Оленегорск			2.6	88
Пулозеро-ст. Пулозеро	2.5	100	2.2	100
Серебрянское-пос. Серебрянский	1.9	100	2.0	100
Умб-озеро-исток р. Умбы	2.1	100	3.4	73
В. Туломское-с. Ниванкюль			2.8	88

Для прогноза сроков появления ПЛЯ модель XGBoost показала наилучшие результаты. Для всех озер по качеству можно отнести к хорошей, за исключением водохранилищ Иовское и Княжегубское. Качество модели для этих водоемов удовлетворительное, хотя и близко к граничному с хорошей значению (средняя квадратическая ошибка прогноза составила 3.1 и 3.2, соответственно), но лишь 73% и 80% прогнозных значений из тестового набора соответствуют интервалу погрешности 4 дня, соответственно. Для прогноза сроков установления ледостава модель, основанную на алгоритме XGBoost можно рекомендовать для всех водоемов кроме водохранилищ Иовское, Княжегубское и Верхнетуломское.

На основе полученных результатов, 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.

В таблице 5.2.8 представлены результаты сравнения прогнозов сроков появления льда и установления ледостава с помощью разработанных методов, основанных на алгоритме XGBoost и используемых на сети эмпирических

зависимостях. С учетом доступности эмпирических зависимостей прогноз был выполнен для р. Кола, р. Ена, оз. Ловозера и оз. Куэтс-ярви за период с 2010 по 2019 годы. Для р. Кола не был выполнен прогноз с использованием эмпирических зависимостей по причине отсутствия в доступе прогнозных зависимостей.

Таблица 5.2.8.

Сравнение разработанных методов и эмпирических зависимостей для прогноза сроков появления льда и установления ледостава на реках и озерах Кольского полуострова.

Водный объект		оз. Ловозеро - с. Ловозеро	оз. Куэтс-ярви - пгт Никель	р. Кола - 1429 км. Октябрьской ж/д	р. Ена - с. Ена
Первичные ледовые явления					
Эмпирические зависимости	±2 дня %	30	0	40	0
	±3 дня %	40	25	50	20
	±4 дня %	40	25	50	30
	3–6 дня %	10	0	20	20
	6–10 дня %	30	38	10	10
	10–15 дня %	0	38	10	20
	15–30 дня %	30	0	0	20
Разработанный метод	±2 дня %	90	78	78	80
	±3 дня %	90	78	89	100
	±4 дня %	90	89	100	100
	3–6 дня %	10	11	0	0
	6–10 дня %	0	0	0	0
	10–15 дня %	0	0	0	0
	15–30 дня %	0	0	0	0
Ледостав					
Эмпирические зависимости	±2 дня %	10	0	–	10
	±3 дня %	30	25	–	20
	±4 дня %	40	25	–	20
	3–6 дня %	20	0	–	30
	6–10 дня %	10	13	–	30
	10–15 дня %	20	38	–	20
	15–30 дня %	0	25	–	0
Разработанный метод	±2 дня %	70	55	90	80
	±3 дня %	80	89	100	90
	±4 дня %	90	100	100	100
	3–6 дня %	10	0	0	0
	6–10 дня %	0	0	0	0
	10–15 дня %	0	0	0	0
	15–30 дня %	0	0	0	0

Результаты, представленные в таблице, свидетельствуют о существенном преимуществе разработанного метода по сравнению с прогнозами, полученными на основе эмпирических зависимостей. 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, при прогнозировании ледостава разработанный метод превосходит эмпирические зависимости в несколько раз и обеспечивает существенно более стабильные результаты на разных гидрологических постах.

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.

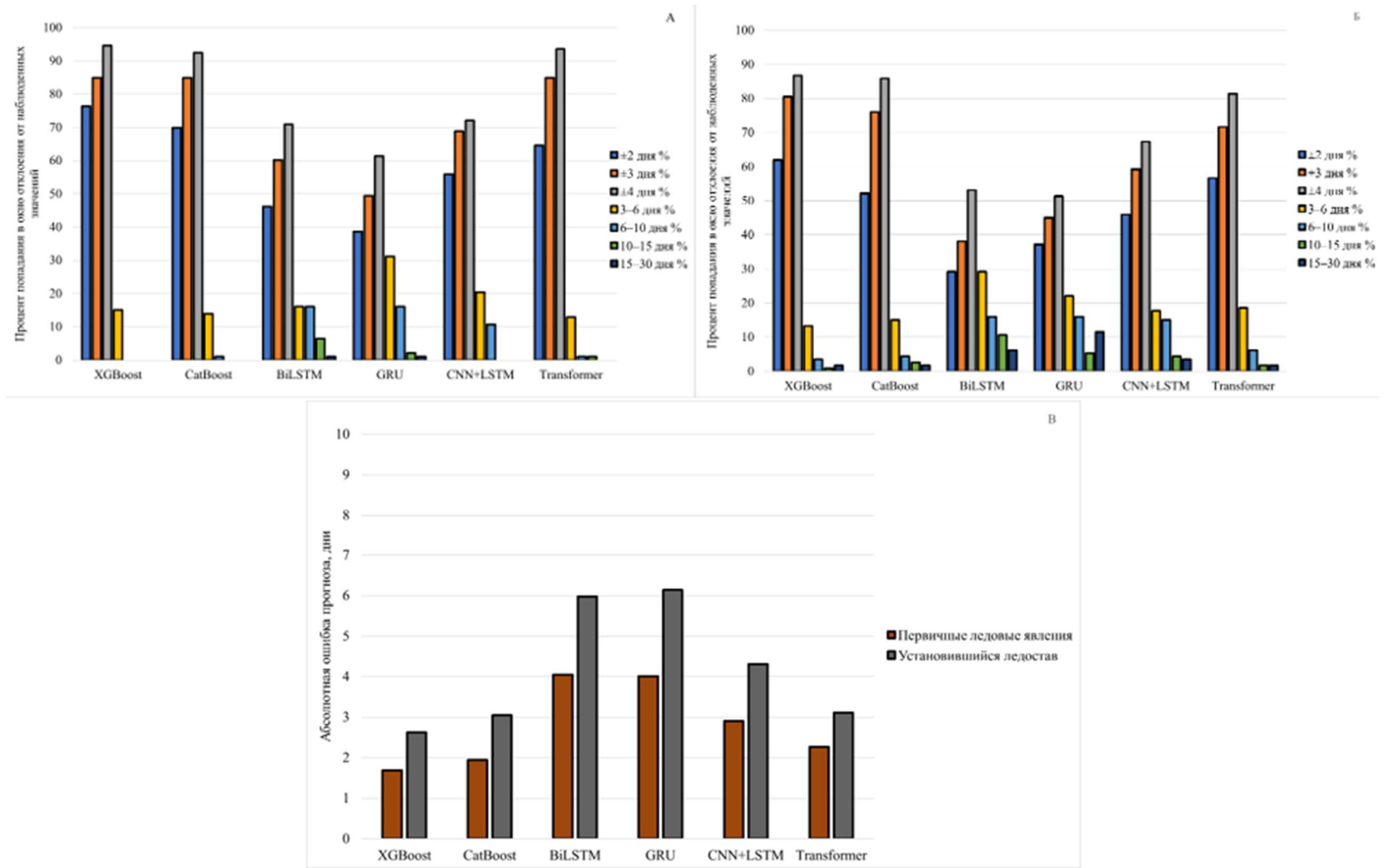


Рисунок 5.2.2. Оценка точности прогностических моделей регрессионного типа для озер. (а) первичные ледовые явления, (б) установившийся ледостав, (в) абсолютная ошибка прогноза.

5.3. Прогноз сроков появления льда и установления ледостава с решением задачи классификации

Наличие многолетних суточных данных за метеорологическими и гидрологическими характеристиками, фазами водного режима позволяют применить методы нейросетевого моделирования, основанные на типизации характеристик ледового режима. 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 обстановке. Данные представлены за период с 1 октября по 31 января каждого гидрологического года для исследуемых рек. Выбор такого временного периода продиктован наиболее ранним началом перехода температуры воздуха через 0°C и наиболее поздней датой формирования ледостава.

Заблаговременность прогнозов сроков первичных ледовых явлений и дат установления ледостава, полученных с помощью моделей классификационного подхода, соответствует заблаговременности прогнозов метеорологических параметров и составляет 4 дня. Применительно к долгосрочному прогнозированию, разработанные модели могут иметь рекомендательный характер, так как прогноз появления классов ледовых явлений выполняется на каждый день интересующего периода. Точность же данного прогноза будет зависеть от точности долгосрочных прогнозов метеорологических и гидрологических параметров.

Для решения задачи классификации ледовых явлений была использована гибридная модель, объединяющая метод машинного обучения XGBoost и нейросетевые модели CNN, GRU (табл. 5.3.1). Применение моделей гибридного типа в гидрологических задачах успешно зарекомендовало себя в ряде зарубежных исследований [Flood flow prediction..., 2023; Ougahi, Rowan, 2025; Chang, Chen, He, Zhou, 2023]. Подобные архитектуры позволяют учитывать сложные временные зависимости и пространственную изменчивость гидрологических процессов.

Таблица 5.3.1.

Архитектура нейросетевой модели типа XGBoost+CNN-GRU

№	Слой	Параметры	Назначение слоя
1	XGBoost	Число деревьев 300, глубина деревьев 6, скорость обучения=0.05	Обучение на исходных признаках; получение вероятностей принадлежности к классам.
2	Конкатенация	—	Объединение нормализованных признаков с выходом XGBoost (4 признака).
3	Conv1D	32 фильтра, метод активации Relu	Выделение локальных закономерностей во временном ряду (например, всплесков температуры).
4	BatchNormalization	—	Стабилизация обучения, ускорение сходимости.
5	GRU	Количество нейронов 64	Учет долгосрочных зависимостей и запоминание временной информации.
6	Dropout	30% отключаемых нейронов	Предотвращение переобучения путем случайного "выключения" нейронов.
7	GRU	Количество нейронов 32	Углубленная обработка временного контекста и извлечение финального состояния.
8	Dropout	30% отключаемых нейронов	Регуляризация модели.
9	Dense	Количество нейронов 16, метод активации Relu	Промежуточная нелинейная трансформация признаков.
10	Dense	Количество нейронов 4, метод активации softmax	Финальная классификация по 4 классам ледового явления.

Исходные данные были разделены на обучающую выборку (до 2010 г.) и тестовую (с 2010 г.). Код гидрологического поста закодирован методом one-hot-encoding, Для учета временной зависимости были созданы лаговые признаки (1, 3, 7, 14, 21, 30 суток) по температуре, осадкам и уровню воды.

После классификации исходный ряд наблюдений оказался достаточно несбалансированным. Это объясняется достаточно большой временной вариативностью дат появления льда и установления ледостава по территории Кольского Полуострова. Для настройки модели и учета наименьших классов

(первичные ледовые явления) был применен метод ADASYN (Adaptive Synthetic Sampling Approach for Imbalanced Learning) — адаптивный метод синтетической выборки [ADASYN: Adaptive synthetic..., 2008]. Данный метод представляет собой усовершенствование метода SMOTE и направлен на адаптивное пополнение выборки за счёт генерации новых синтетических наблюдений исключительно для классов с недостаточной представленностью.

Основная идея метода заключается в следующем:

- для каждого объекта класса меньшинства оценивается степень сложности его классификации на основе доли ближайших соседей, принадлежащих к классам большинства;
- чем выше эта доля, тем выше вероятность, что данный пример окажется неправильно классифицирован, и тем больше синтетических наблюдений будет сгенерировано в его окрестности;
- новые примеры создаются путём линейной интерполяции между объектом меньшинства и одним из его ближайших соседей.

Таким образом, ADASYN позволяет сместить внимание модели на наиболее трудные для различия области признакового пространства, не увеличивая избыточно общее количество синтетических примеров. Это особенно важно в условиях ограниченного набора данных и высокой вариативности природных процессов.

На первом этапе обучение модели проводилось с помощью XGBClassifier, по результатам работы сохранялись вероятности принадлежности к каждому из классов (4 класса), которые затем добавлялись к исходной нормализованной матрице признаков (рис. 5.3.1) [Канашин, 2025].

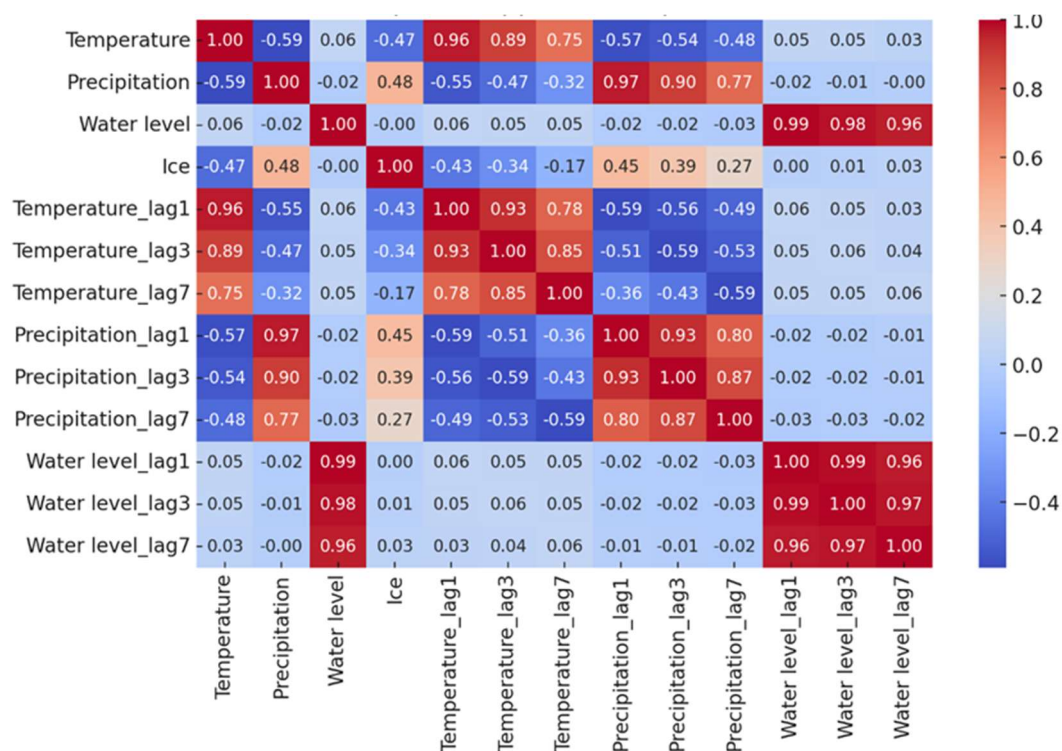


Рисунок 5.3.1. Корреляционная матрица предикторов гибридной модели

Как и в прошлых нейросетевых моделях был использован оптимизатор ADAM и остановка при отсутствии улучшения через 10 эпох обучения. Для оценки работы модели была построена матрица ошибок и рассчитаны основные метрики качества модели (табл. 5.3.2)

Таблица 5.3.2.

Оценка качества гибридной нейросетевой модели.

Класс ледового явления	precision	recall	f1-score
Реки			
Отсутствие льда	0.89	0.89	0.89
Первичные ледовые явления	0.63	0.62	0.63
Ледостав	0.91	0.77	0.83
Неполный ледостав	0.58	0.74	0.65
accuracy	0.77		
Озера			
Отсутствие льда	0.94	0.81	0.87
Первичные ледовые явления	0.36	0.49	0.41
Ледостав	0.91	0.95	0.93
accuracy	0.87		

Самым простым для классификации классом ледовых явлений является установившийся ледостав. Для фаз формирования льда и неполного ледостава наблюдается некоторая переоценка случаев появлений за счет чего оцениваемые метрики данных классов ниже, чем у ледостава. Для повышения качества классификации были использованы дополнительные метеорологические параметры: облачность, направление ветра, скорость ветра, температура почвы, атмосферное давление. Однако они не привели к значительному улучшению качества модели, так как их использование подразумевает сокращение исходной информации на 15 лет наблюдений.

По полученным ежедневным прогнозным значениям класса ледового явления были определены даты наступления первичных ледовых явлений, неполного ледостава и установившегося ледостава (табл. 5.3.3 – для рек, табл. 5.3.4 – для озер)

Таблица 5.3.3.

Оценка методики прогноза сроков наступления осенних ледовых явлений на реках (гибридная нейросетевая модель)

Река-пост	Первичные ледовые явления		Неполный ледостав		Установившийся ледостав	
	S	% 4 дня	S	% 4 дня	S	% 4 дня
р.Тумча - пос.Алакуртти	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 показала 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 5.3.4.

Оценка методики прогноза сроков наступления осенних ледовых явлений на озерах (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. Хибины	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 подходе, нельзя рекомендовать для использования. 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.

5.4. Метод гидрологической аналогии для рядов наблюдений за ледовым режимом рек и озер

Для выполнения поставленной цели исследования и распространения предложенных ранее методов прогноза сроков появления льда и установления ледостава на территории, частично освещенной наблюдениями за гидрологическим и ледовым режимами, может быть выполнено с помощью метода гидрологической аналогии с использованием уравнений линейной регрессии [Канашин, 2025].

Для подбора аналогов были построены корреляционные матрицы дат появления первичных ледовых явлений и ледостава для рек и озер Кольского

полуострова (Приложение 2). При выборе реки-аналога учитываются следующие моменты [Орлов, Сикан, 2003]:

- Расчетная река и река-аналог должны находиться в пределах одного гидрологически однородного района;
- Обе реки должны иметь схожие гидрографические и морфометрические характеристики. Площади водосбора не должны отличаться в 5-10 раз;
- Режим аналога не должен искажаться под влиянием антропогенной деятельности;
- Совместный период наблюдений должен быть не менее 10 лет.

Так как большинство рек Кольского полуострова относятся к малым рекам основными критериями для выбора реки-аналога были выбраны: коэффициент корреляции, совместный период наблюдений, географическое положение наблюдательного пункта (схожие условия формирования ледовых явлений). Для озер за счет преимущественного их расположения в центральной и западной частях исследуемой территории основным критериями являются: коэффициент корреляции, совместный период наблюдений, площадь водного зеркала.

Результаты подбора озер-аналогов для сроков появления осенних ледовых явлений приведены в таблицах 5.4.1 и 5.4.2, соответственно. Для трех наблюдательных пунктов не удалось подобрать аналог для дальнейшего прогноза сроков появления первичных ледовых явлений и установления ледостава. Однако, для представленных озерных постов собраны продолжительные ряды наблюдений, что позволяет выполнить прогноз ледовых характеристик с учетом имеющихся данных.

Таблица 5.4.1.

Подбор озера-аналога для прогноза сроков появления первичных ледовых явлений

Озеро-пост	Озеро-аналог	R	период совместных наблюдений
Верхне-Тулومское - с. Ниванкюль	Иовское - пос. Зареченск	0.87	40
Имандра-Зашеек	Иовское - пос. Зареченск	0.74	43
Имандра-Хибины	Имандра-Зашеек	0.74	54
Иовское - пос. Зареченск	Имандра-Хибины	0.75	48
Князегубское - с. Ковдозеро	Иовское - пос. Зареченск	0.76	46
Куэтс-ярви - пгт. Никель	Имандра-Зашеек	0.77	48
Ловозеро - с. Ловозеро	-		
Пермус-озеро - г. Оленегорск	-		
Пулозеро-ст. Пулозеро	-		
Серебрянское - пос. Серебрянский	Имандра-Зашеек	0.79	37
Умб-озеро - исток р. Умбы	-		

Таблица 5.4.2.

Подбор озера-аналога для прогноза дат установления ледостава

Озеро-пост	Озеро-аналог	R	период совместных наблюдений
Верхне-Тулومское - с. Ниванкюль	Иовское - пос. Зареченск	0.76	40
Имандра-Зашеек	Имандра-Хибины	0.69	54
Имандра-Хибины	Имандра-Зашеек	0.69	54
Иовское - пос. Зареченск	Имандра-Хибины	0.78	48
Князегубское - с. Ковдозеро	Иовское - пос. Зареченск	0.87	46
Куэтс-ярви - пгт. Никель	Иовское - пос. Зареченск	0.74	42
Ловозеро - с. Ловозеро	-		
Пермус-озеро - г. Оленегорск	Куэтс-ярви - пгт. Никель	0.71	44
Пулозеро-ст. Пулозеро	-		
Серебрянское - пос. Серебрянский	Иовское - пос. Зареченск	0.80	37
Умб-озеро - исток р. Умбы	-		

Для рек Кольского полуострова были выделены наблюдательные посты, наблюдения на которых имеют наибольшую продолжительность. С учетом этого для рек с меньшим периодом наблюдений были подобраны реки-аналоги для прогноза сроков появления осенних ледовых явлений. Для прогноза дат появления первичных ледовых явлений не удалось подобрать реку-аналог для

4 постов (табл. 5.4.3). Данные посты отличаются особенными условиям формирования ледовых явлений. Так, например, для р. Умбы – пост Исток большое влияние на появление первичных ледовых явлений оказывает Умб-озеро, пост на реке Монча в г. Мончегорск находится под влиянием Мончозера.

Таблица 5.4.3.

Подбор реки-аналога для прогноза сроков появления первичных ледовых явлений

Река-пост	Река-аналог	R	период совместных наблюдений
р. Печенга - ст. Печенга	р. Кица - ст. Лопарская	0.92	37
р. Титовка - 15.5 км от устья	р. Умба - пор. Паялка	0.71	39
р. Западная Лица (Большая Лица) - ст. Моккет (ж.д. мост)	р. Титовка - 15.5 км от устья	0.88	40
р. Ура - с. Ура-Губа	продолжительный ряд наблюдений		
р. Печа - с. Падун	продолжительный ряд наблюдений		
р. Пак - 3 км от устья	р. Гольцовка - ст. Имандра	0.74	18
р. Кола - Исток	продолжительный ряд наблюдений		
р. Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	продолжительный ряд наблюдений		
р. Кола - Кола	р. Печенга - ст. Печенга	0.73	37
р. Кица - ст. Лопарская	продолжительный ряд наблюдений		
р. Туманная - пос. Туманный	р. Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	0.89	37
р. Поной - с. Краснощелье	р. Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	0.83	52
р. Поной - с. Каневка	продолжительный ряд наблюдений		
р. Чаваньга - с. Чаваньга	-		
р. Варзуга - с. Варзуга	продолжительный ряд наблюдений		
р. Умба - Исток	-		
р. Умба - пор. Паялка	продолжительный ряд наблюдений		
р. Ена - пос. Ена	р. Поной - с. Каневка	0.85	40
р. Монча - г. Мончегорск	-		
р. Куреньга - г. Оленегорск	р. Умба - пор. Паялка	0.71	38
р. Гольцовка - ст. Имандра	р. Пак - 3 км от устья	0.74	18
р. Малая Белая - ст. Хибины	продолжительный ряд наблюдений		
р. Юкспорйок - г. Кировск	р. Умба - пор. Паялка	0.72	34
р. Тумча - пос. Алакуртти	р. Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	0.88	26

Подбор реки-аналога для дат установления ледостава не дал хорошего результата. Надежный аналог с наибольшей продолжительностью наблюдений удалось подобрать лишь для 2 постов (табл. 5.4.4). Для 3 постов удалось подобрать пост – аналог с меньшей продолжительностью, но удовлетворяющей требованиям подбора аналога для гидрологических характеристик.

Таблица 5.4.4.

Подбор реки-аналога для прогноза дат установления ледостава

Река-пост	Река-аналог	R	период совместных наблюдений
р. Печенга – ст.Печенга	р. Западная Лица (Большая Лица) – ст. Моккет (ж.д. мост)	0.75	28
р. Титовка – 15.5 км от устья	-		
р. Западная Лица (Большая Лица) – ст. Моккет(ж.д.мост)	р. Кола – 1429-ый км Октябрьской ж.д.	0.75	40
р. Ура – с. Ура-Губа	продолжительный ряд наблюдений		
р. Печа – с. Падун	продолжительный ряд наблюдений		
р. Пак – 3 км от устья	-		
р. Кола – Исток	продолжительный ряд наблюдений		
р. Кола – 1429-ый км Октябрьской ж.д.	длинный ряд наблюдений		
р. Кола – Кола	р. Умба – Исток	0.82	58
р. Кица – ст. Лопарская	продолжительный ряд наблюдений		
р. Туманная – пос. Туманный	-		
р. Поной – с. Краснощелье	-		
р. Поной – с. Каневка	продолжительный ряд наблюдений		
р. Чаваньга – с. Чаваньга	р. Кола – Исток	0.77	16
р. Варзуга – с. Варзуга	продолжительный ряд наблюдений		
р. Умба – Исток	-		
р. Умба – пор. Паялка	продолжительный ряд наблюдений		
р. Ена – пос. Ена	-		
р. Монча – г. Мончегорск	-		
р. Куреньга – г. Оленегорск	р. Кола – Кола	0.79	21
р. Гольцовка – ст. Имандра	-		
р. Малая Белая – ст. Хибины	продолжительный ряд наблюдений		
р. Юкспорйок – г. Кировск	-		
р. Тумча – пос. Алакуртти	-		

Подбор аналога для наблюдательных постов, имеющих менее продолжительный период позволяет распространить методы прогнозов сроков появления первичных ледовых явления и установления ледостава на территориях, не имеющих или имеющих прерывистые наблюдения за ледовым и гидрологическими режимами в условиях современного изменения климата.

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 гидрологический 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.

Заключение

Для достижения поставленных целей и задач, оценки актуальности работы, более детального изучения методов прогноза характеристик ледового режима был выполнен анализ работ исследователей за ледовым режимом рек и озер Арктической зоны. Проанализированы работы в области моделирования прогнозов сроков появления льда. Полученные выводы по состоянию изученности подтвердили необходимость в актуализации прогнозных методов для рек и озер Кольского полуострова в условиях современного изменения климата. На основе анализа гидрометеорологической изученности исследуемого региона и собранных данных наблюдений за ледовым и водным режимами, климатическими характеристиками сформирована база данных для оценки изменения сроков появления ледовых явлений и построения прогностических моделей.

Исследование современного состояния климата и его многолетних изменений подтвердило тенденцию к росту температуры воздуха холодного периода, индексов суровости зимы и условий замерзания. Наибольшие изменения индексов суровости зимы и сумм отрицательных температур воздуха отмечены в центральной части региона, тогда как прибрежные районы в большей степени испытывают сглаживающее влияние Баренцева и Белого морей. Данные особенности изменения климатических характеристик напрямую отражаются на сроках появления первичных ледовых явлений и дат установления ледостава.

В настоящей работе рассмотрен ледовый режим рек и озер Кольского полуострова за 1950 – 2019 годы. Анализ многолетних рядов наблюдений за ледовым режимом показал смещение сроков появления льда и установления ледостава на более поздние сроки на всей исследуемой территории, что указывает на реакцию системы на климатические изменения. Выявлены пространственные особенности формирования льда, обусловленные географическим положением, морфометрическими характеристиками русел, а также степенью естественной и антропогенной зарегулированности стока.

Проведена классификация типов ледовых явлений и условий их формирования, что позволило выделить наиболее характерные сценарии замерзания. Также оценены будущие изменения климата и возможные изменения осеннего ледового режима рек и озер Мурманской области.

Анализ существующих эмпирических и теоретических методов прогноза сроков замерзания показал, что в условиях современного изменения климата Арктической зоны Российской Федерации требуется уточнение прогностических зависимостей и обновление используемых подходов. В связи с этим были разработаны модели с применением методов машинного и глубокого обучения для прогноза сроков появления первичных ледовых явлений и установления ледостава на реках и озёрах Кольского полуострова. Выявлено, что регрессионные модели на основе алгоритмов градиентного бустинга по деревьям решений (XGBoost, CatBoost, а также ансамблевые модели типа Transformer) обеспечивают наилучшее сочетание точности и устойчивости: средняя абсолютная ошибка для большинства постов лежит в пределах 2–4 дней, при этом значительная доля прогнозов (до 80–90 %) укладывается в интервал погрешности $\pm 3 - 4$ суток. Нейросетевые архитектуры регрессионного типа (GRU, CNN+LSTM, TCN) продемонстрировали удовлетворительные, но недостаточные для оперативного применения характеристики точности, тогда как разработанная гибридная модель классификации дат появления первичных ледовых явлений может быть эффективно использована для отдельных рек при наличии устойчивых статистических связей. Дополнительно обоснована возможность применения метода гидрологической аналогии в сочетании с методами машинного обучения для прогноза сроков появления льда на постах, не имеющих продолжительных рядов наблюдений. В совокупности, разработанные в рамках настоящего исследования методы, использующие методы машинного и глубокого обучения, хорошо согласуются с современными направлениями развития прогнозов гидрологических и климатических характеристик; регрессионные модели на основе деревьев

решений могут быть рекомендованы для применения на всей территории Кольского полуострова, тогда как гибридный классификационный подход целесообразно использовать для прогноза дат появления первичных ледовых явлений на отдельных гидрологических постах.

Ключевые результаты настоящего исследования подтверждают успешное выполнение поставленных задач и достижение поставленной цели:

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.

Полученные результаты задают основы для дальнейшего развития исследований в данном направлении и практического применения методов прогноза ледового режима:

1. Перспективным направлением для развития исследования является адаптация к будущим климатическим изменениям с помощью учета сценарных климатических расчетов.

2. Потенциальным направлением может служить совершенствование нейросетевых архитектур.

3. Объединение разработанных моделей с геоинформационными системами и данными дистанционного зондирования (спутниковые наблюдения за ледовым покровом и температурой поверхности) позволит повысить пространственную детализацию и оперативность оценки состояния ледового режима.

Список литературы

1. Агафонова С.А. Исследования ледового режима рек Арктической зоны России в XX и XXI вв. // Арктика и Антарктика. 2019. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovaniya-ledovogo-rezhima-rek-arkticheskoy-zony-rossii-v-xx-i-xxi-vv> (дата обращения: 28.05.2025).
2. Агафонова С.А. Ледовый режим рек севера Европейской территории России и его влияние на гидроэкологическую безопасность территории.: дис. ... канд. геогр. наук. Москва: МГУ, 2009. URL: <https://www.dissercat.com/content/teoriya-interfeisov-biznes-sistem>
3. Агафонова С. А., Айбулатов Д.Н., Фролова Н.Л., Козлов Д.В. Современное изменение ледового режима рек бассейна Волги //Природообустройство. – 2014. – №. 3. – С. 60-62.
4. Агафонова С. А., Банщикова Л. С. Расчётная толщина льда на реках севера азиатской части России //Гидротехническое строительство. – 2022. – №. 10. – С. 20-25.
5. Агафонова С. А., Василенко А. Н., Фролова Н. Л. Факторы образования ледовых заторов на реках бассейна Северной Двины в современных условиях //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2016. – №. 2. – С. 82-90
6. Агафонова С.А., Фролова Н.Л., Василенко А.Н., Широкова В.А. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках арктической зоны европейской территории России // Вестник МГУ. Сер. 5. География. 2016. № 6. – С. 41–49.
7. Агафонова С.А., Фролова Н.Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины // Водные ресурсы. 2006. Т. 33, № 6. С. 1–9.
8. Агафонова С. А., Фролова Н. Л. Особенности ледового режима рек бассейна Северной Двины //Водные ресурсы. – 2007. – Т. 34. – №. 2. – С. 141-149.

9. Айзель Г.В. Применение методов машинного обучения для моделирования толщины снежного покрова. Лёд и Снег. 2017; 57(1):34-44. DOI: 10.15356/2076-6734-2017-1-34-44
10. Атавин А. А., Зиновьев А. Т., Кудишин А. В. Гидроледотермический режим в бьефах Крапивинского гидроузла. Прогноз и вопросы управления // Ползуновский вестник. – 2004. – №. 2. – С. 39-44.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. Брегман Г.Р. «О методах фоновых прогнозов вскрытия рек.», Труды НИУ ГУГМС, 1941, сер. IV, вып. 3, с. 3-55.
15. Бефани Н. Ф., Калинин Г. П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 390 с.
16. Борщ С.В., Гинзбург Б.М., Ефремова Н.Д. Долгосрочный фоновый прогноз сроков вскрытия рек европейской территории СНГ // «Метеорология и гидрология, 2001, № 7, с. 101-110.
17. Борщ С. В., Гинзбург Б. М., Солдатова И. И. Оценка влияния глобального потепления на сроки появления льда и разрушения ледяного покрова на реках

на основе совместного использования моделей формирования ледового и водного режимов // Метеорология и гидрология. 1998. № 5. С. 97-105.

18. Борщ С. В., Гинзбург Б. М., Солдатова И. И. Применение моделей формирования ледовых явлений на реках для оценки вероятного изменения ледового режима при различных сценариях будущего климата // Водные ресурсы. 2001. Т. 28. № 2. С. 217-223.

19. Борщ С. В., Симонов Ю. А., Христофоров А.В. Выбор методов прогнозирования речного стока // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2024. № 1 (391). С. 71-117 DOI: 10.37162/2618-9631-2024-1-71-117

20. Бузин В.А. Факторы образования и прогноз заторов льда на реках Севера европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2010. № 4. С. 63–74.

21. Бузин В.А., Горошкова Н.И., Стриженок А.В. Максимальные заторные уровни воды северных рек России в условиях изменения климата и антропогенного воздействия на процесс заторообразования // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 55–61.

22. Бузин В.А., Чачина Н.С., Шаночкин С.В. Прогнозы максимальных зазорных и заторных уровней воды рек Северная Двина и Даугава // Тр. ГГИ. 1986. Вып. 323. С. 19–27

23. Бузин В. А. Заторы льда и заторные наводнения на реках. СПб.: Гидрометеоиздат, 2004. 203 с.

24. Бузин В. А. Метод прогноза максимальных уровней воды при заторах льда на средних реках. // Метеорология и гидрология. 2001. № 9. С. 84—89.

25. Бузин В. А. Методы прогнозов заторных и зазорных явлений. // Труды V гидрологического съезда. 1989. Т. 7. С. 312-319.

26. Бузин В. А. Методы расчета и прогноза зазорных и заторных уровней воды. Дис. д-ра техн. наук: 11.00.07. Спб, 1995. 283 с.

27. Бузин В. А. О наводнениях на реках, вызванных заторами льда // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 5. С. 524-530.

28. Бузин В. А. Факторы, определяющие максимальный заторный уровень воды // Труды ГГИ. 1980. Вып. 270. С. 33-39.
29. Бузин В. А., Банщикова Л. С. Условия, факторы и мониторинг процесса заторообразования на реках севера ЕТР// Ледовые и термические процессы на водных объектах России. Архангельск, 2007. С. 57-58.
30. Бузин В. А., Зиновьев А. Т. Ледовые процессы и явления на реках и водохранилищах. Методы математического моделирования и опыт их реализации для практических целей (обзор современного состояния проблемы). Барнаул: Изд-во ООО «Пять плюс», 2009. 168 с.
31. Бузин В. А., Копалиани З. Д. Наводнения, обусловленные заторами льда на реках России: риски их возникновения и прогнозирование // Международная выставка и конгресс ЭКВАТЭК 2008. Сборник докладов Международной конференции «Управление водно-ресурсными системами в экстремальных условиях». Москва 4-5 июня 2008 г.
32. Бураков Д.А., Ковшова Е.П., Ромасько В.Ю. Прогноз элементов ледового режима р. Енисей в осенне-зимний период в нижних бьефах высоконапорных ГЭС // Метеорология и гидрология. 2008. № 5. – С. 93–102.
33. Вангенгейм Г.Я. К вопросу типизации и схематизации синоптических процессов. // Метеорология и гидрология, 1938, № 3, С. 38–58.
34. Вангенгейм Г.Я. Опыт применения синоптических методов к изучению и характеристике климата. // Известия ГГО, 1933, № 2–3, С. 3–16.
35. Васильев П.П. «Прогноз основных элементов погоды с использованием результатов интегрирования гидродинамических моделей атмосферы.», Труды Международного симпозиума «Методы среднесрочных прогнозов погоды», Л., Гидрометеоиздат, 1989, С. 85-113.
36. Винников С. Д., Берденников В. П. Метод расчета ледяного затора торошения // Труды V всесоюзного гидрологического съезда. Т. 7. 1989. С. 297-303.
37. Водные ресурсы России и их использование. Ред. И.А. Шикломанов. Санкт-Петербург. 2008. 598 с.

38. Волкова Д.Д., Румянцева Е.В. Многолетняя динамика ледового режима средних рек Арктической зоны Сибири // Теория и методы полярной науки: Материалы междунар. молодеж. науч. конф. по полярной геодезии, гляциологии, гидрологии и геофизике. СПб, 17–19 мая 2018.– С. 76–84.
39. Вуглинский В. С, Тройская Т. П. Изменения ледового режима рек и водоемов России и их возможные последствия для экономики // Современные проблемы гидрометеорологии. СПб.: Астерион, 2006. С. 229-244
40. Вуглинский В.С. Оценка изменений характеристик ледового режима водных объектов для различных регионов страны в современных климатических условиях // Вестник СПбГУ. Сер. 7. Геология, география. 2014. № 3.– С. 32–45.
41. Георгиевский Ю.М., Шаночкин С.В. Гидрологические прогнозы // СПб.: РГГМУ, 2007. – 436 с.
42. Георгиевский Ю.М. Краткосрочные и долгосрочные прогнозы ледовых явлений на реках, озерах и водохранилищах. - Л.: ЛПИ, 1986. - 49 с.
43. Гидрологическая изученность. Т. 1. Кольский полуостров / под ред. Ю. А. Елшина. —Л.: Гидрометеиздат, 1969. —134 с
44. Гинзбург Б. М. Вероятностные характеристики сроков замерзания и вскрытия рек и водохранилищ Советского Союза // Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 118. Л.: Гидрометиздат, 1973. 116 с.
45. Гинзбург Б. М. Естественные составляющие полей сроков замерзания и вскрытия рек // Труды Гидрометцентра СССР. Вып. 236. Л.: Гидрометиздат, 1981. С. 70-82.
46. Гинзбург Б. М. Методические указания по определению характеристик ледового режима рек северной части Сибири (от 55°с.ш.). Москва, 1984. С. 40.
47. Гинзбург Б. М. Сроки замерзания и вскрытия рек в конце XX века и возможные их изменения в XXI веке // Метеорология и гидрология. 2005. № 12. С. 88–97.
48. Гинзбург Б.М., Борщ С.В., Ефремова Н.Д., Сильницкая М.И. «Метод фонового долгосрочного прогноза сроков начала замерзания рек и

водохранилищ европейской территории России и Белоруссии», «Метеорология и гидрология», 1998, № 6. С. 84-92.

49. Гинзбург Б. М., Борщ С. В., Ефремова Н. Д., Полякова К. Н., Сильницкая М. И. Методы фонового долгосрочного и среднесрочного прогноза сроков вскрытия рек ЕТР // Метеорология и гидрология. 2001. №11. С. 67—78.

50. Гинзбург Б.М., Сильницкая М.И. Влияние пространственного распределения температуры поверхности океанов на сроки появления льда на реках европейской территории СНГ, Метеорология и гидрология, 1997, № 4, С. 77-84.

51. Гинзбург Б.М., Сильницкая М.И. Влияние распределения температуры поверхности океанов на сроки вскрытия рек европейской территории России, Метеорология и гидрология, 2000, № 6, С. 86-91.

52. Гинзбург Б.М., Сильницкая М.И. Влияние распределения температуры поверхности океанов на сроки замерзания и вскрытия рек азиатской территории России. Метеорология и гидрология, 2004, № 1, С. 82-88.

53. Гинзбург Б.М., Сильницкая М.И., Полякова К.Н. Методика уточнения долгосрочного прогноза сроков замерзания рек и водохранилищ европейской территории России со средней заблаговременностью, Метеорология и гидрология, 1999, № 6, с. 84-89.

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

55. Гинзбург Б. М., Солдатова И. И. Многолетние колебания сроков замерзания и вскрытия рек в различных географических зонах // Метеорология и гидрология. 1996. № 6. С. 101-108.

56. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. – Москва, 2025. – 104 с.

57. Добровольский С. Г., Истомина М. Н. Наводнения мира //М.: ГЕОС. – 2006. – Т. 256. – 152 с.

58. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 242 с.
59. Землянкова А. А., Нестерова Н. В., Макарьева О. М. Изменение характеристик речного льда на северо-востоке России // Ответственный редактор. – 2021. – С. 378.
60. Землянкова А. А., Нестерова Н. В., Макарьева О. М. Изменение ледового режима рек северо-востока России // Арктика и Антарктика. – 2024. – №. 1. – С. 20-33.
61. Зиновьев А. Т. Математическое моделирование гидрологических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС на реках Сибири // Барнаул: Институт водных и экологических проблем СО РАН. Диссертация на соискание доктора технических наук – 2014.
62. Зуев В. В., Уйманова В.А., Вершинин Д.А., Павлинский А.В. Оценка изменений характеристик ледового режима Нижнего Енисея в современных климатических условиях // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2025. – №. 2. – С. 40-51.
63. Иглин С. М., Морейдо В. М., Головнин К. И. Прогнозирование редких гидрологических явлений методами машинного обучения на примере ледовых заторов на реке Печоре // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2025. – №. 1. – С. 87-97
64. Канашин С. А. Применение методов машинного обучения для прогноза осенних ледовых явлений на реке Умба // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 52. С. 52–64. DOI: [10.26516/2073-3402.2025.52.52](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.52.52)
65. 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.

66. 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.

67. 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.

68. 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.

69. Карнович В.Н., Кулешова Т.В. Долгосрочный прогноз максимальных уровней воды при заторах льда на Северной Двине // Метеорология и гидрология. 1984. № 4. С. 89–94.

70. Климат России / под ред. Кобышевой Н.В. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 654 с.

71. Козлов Д.В. Развитие теории и методов гидравлических, ледотехнических и гидротермических расчетов водоемов и водотоков с ледяным покровом: диссертация доктора технических наук. Москва, 2002. – 361 с.

72. Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Пичура В.И. Оценка и прогнозирование стока малых рек в условиях антропогенных воздействий и изменения климата // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6.; URL:

<https://science-education.ru/ru/article/view?id=7640> (дата обращения: 16.11.2025).

73. Лобанов В. А., Горошкова Н. И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2019. – №. 55. – С. 86-98.

74. Малыгин И.В. Методика прогноза образования ледовых заторов на реках на основе теории распознавания образов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2014. № 3. С. 43–47

75. Малыгин И.В., Алешин И.М. Прогнозирование заторов льда на р. Лене методами машинного обучения // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21. № 3. С. 18–26. DOI: 10.21455/GPB2022.3-3.

76. Махинов А. Н., Ким В. И. Влияние изменений климата на гидрологический режим реки Амур // Тихоокеанская география. – 2020. – №. 1. – С. 30-39.

77. Методика долгосрочного прогноза дат замерзания рек и озер Мурманской области // Мурманское управление гидрометеорологической службы. – Мурманск, 1972. – 89 с.

78. Методический кабинет Гидрометцентра России [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://method.meteorf.ru/> (дата обращения: 27.05.2025).

79. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. Монография под ред. Лешкевич Т.В. 2012. – 510 с. URL: http://downloads.igce.ru/publications/metodi_ocenki/end.pdf (дата обращения: 14.10.2025)

80. Михайличенко А. А. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА АЛГОРИТМОВ КЛАССИФИКАЦИИ В ЗАДАЧАХ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2022. №4 (311). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiticheskiy-obzor->

metodov-otsenki-kachestva-algoritmov-klassifikatsii-v-zadachah-mashinnogo-obucheniya (дата обращения: 04.05.2025).

81. Морейдо В.М., Гарцман Б.И., Соломатин Д.П., Сучилина З.А. Возможности краткосрочного прогнозирования стока малой реки с использованием методов машинного обучения // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2020. Т. 2. Вып. 4. С. 375-390. DOI: 10.34753/HS.2020.2.4.375
82. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Гидрометиздат, 1962, 193 с.
83. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2017 год. Санкт-Петербург 2018 – ФГБУ «ААНИИ»
84. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2018 год. Санкт-Петербург 2019 – ФГБУ «ААНИИ»
85. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2019 год. Санкт-Петербург 2020 – ФГБУ «ААНИИ»
86. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2020 год. Санкт-Петербург 2021 – ФГБУ «ААНИИ»
87. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2021 год. Санкт-Петербург 2022 – ФГБУ «ААНИИ»
88. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2022 год. Санкт-Петербург 2023 – ФГБУ «ААНИИ»
89. Обзор состояния и работы гидрологической сети в Арктической зоне Российской Федерации за 2023 год. Санкт-Петербург 2024 – ФГБУ «ААНИИ»
90. Одрова Т. В. Гидрофизика водоемов суши. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 312 с.
91. Опасные ледовые явления на реках и водохранилищах России Монография под общей ред. проф., д.т.н. Козлова Д.В..М.: Изд-во РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. 2015. – 348 с,
92. Орлов В.Г., Сикан А.В. Основы инженерной гидрологии. Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ. 2003. – 187 с.

93. Романенко Ф.А., Шиловцева О. А. Изменение температурного режима на побережье Белого моря в XIX–XX вв. // Материалы X научной конференции Беломорской биологической станции МГУ: Сборник статей. – М.: Изд. «Гриф и К», 2006.– С. 224-230.
94. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып.3. Прогноз ледовых явлений на реках и водохранилищах. Гидрометиздат, 1989, 168 с.
95. Рыкачев М. А. Вскрытие и замерзание вод Российской империи. — СПб. Изд. АН, 1886, —309 с.
96. Савичев А.И., Мироничева Н.П., Цепелев В.Ю. Особенности колебаний атмосферной циркуляции в Атлантико-Евразийском секторе полушария за последние десятилетия // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 398. Научно-теоретический журнал. – СПб.: РГГМУ, 2015. – С. 120-131.
97. Савченкова Е. И. Естественные функции полей дат появления льда на реках // Труды ГГИ. Вып. 117. 1974. С. 74-81.
98. Савченкова Е.И. Опыт исследования связей появления плавающего льда на некоторых реках СССР с особенностями циркуляции атмосферы Северного полушария, Труды Гидрометцентра СССР, 1970, вып. 67, С. 3-36.
99. Савченкова Е.И., Каракаш Е.С., Ефремова Н.Д., Антипова Е.Г. Современные принципы разработки методов долгосрочного прогноза замерзания и вскрытия рек, Труды IV Всесоюзного гидрологического съезда, 1973, том 7, с. 273-279.
100. Семенова Н.К., Сазонов А.А., Крыленко И.Н. Прогнозирование возможности образования заторов льда с помощью методов машинного обучения // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: сб. докладов Междунар. науч. конф. Санкт-Петербург, 23–31 октября 2020 г. СПб.: Изд-во: ВВМ, 2020. С. 358–361.
101. Сильницкая М.И. «Метод среднесрочного прогноза появления льда на реках севера европейской части России», «Метеорология и гидрология», 1993, № 5, с. 78-85.

102. Смахтин В. К. Многолетние изменения характеристик ледового режима озер Забайкалья // Озера Евразии: проблемы и пути их решения. – 2019. – С. 322-326.
103. Соколов А.А. Гидрография СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1952. – 287 с.
104. Солдатова И. И. Многолетние изменения сроков наступления ледовых явлений на реках СНГ. Дис. канд. геогр. наук: 11.00.07. М., 1996. 131 с.
105. Солдатова И. И. О сроках ледовых явлений на реках в условиях современного климата // Метеорология и гидрология. 1996. №4. С. 87—94.
106. Соловьева З.С. Закономерности временной изменчивости сроков вскрытия низовьев и устьев рек Сибири // Труды ААНИИ. 1983. Т. 378. – С. 113–122.
107. Сумачев А.Э. Совершенствование методов прогнозирования характеристик ледового режима рек бассейнов Баренцева и Белого морей.: дис. канд. техн. наук. СПб: ГГИ, 2022. URL: <https://iwer.ru/ru/diss/Sumachev/Dissertatsiya.pdf>
108. Сумачев А. Э., Банщикова Л. С., Грига С. А. Применение методов обучения искусственных нейронных сетей при прогнозировании высших уровней воды на примере рек Двинско-Печорского бассейнового округа //Метеорология и гидрология. – 2024. – №. 4. – С. 104-115.
109. Терзиев Ф.С., Каладкий В.И., Гоптарев Н.П. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Берингово море. М.: Изд-во "Гидрометеиздат". Вып.1. Гидрометеорологические условия, 1990, 292 с. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/1231> (дата обращения: 05.10.2025)
110. Тимофеева А. Б., Шаратунова М. В. Многолетняя изменчивость толщины припая в море Лаптевых по данным полярных станций // Российская Арктика. 2021. №1 (12). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mnogoletnyaya-izmenchivost-tolschiny-priपाaya-v-more-laptevyyh-po-dannym-polyarnykh-stantsiy> (дата обращения: 05.10.2025).
111. Топтунова О.Н., Анискина О. Г. Изменения циклонических режимов северного и Южного полушарий в условиях меняющегося климата // Научный

журнал КубГАУ. 2015. №114. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/izmeneniya-tsiklonicheskikh-rezhimov-severnogo-i-yuzhnogo-polushariy-v-u-sloviyah-menyayuschegosya-klimata> (дата обращения: 29.05.2025).

112. Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, общее резюме, Москва, 2022.

113. Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Георгиев А.П., Семенов А. В. и др. Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты // Арктика: экология и экономика. — 2012 — №2(6). — С. 80-93.

114. Фролова Н. Л., Магрицкий Д.В., Агафонова С. А., Повалишников Е.С. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. – 2018. – №. 145. – С. 233-251.

115. Шуляковский Л.Г. Основы методики гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 286 с.

116. Шуляковский Л.Г. Появление льда и начало ледостава на реках, озерах и водохранилищах. Расчеты для целей прогнозов. - Л.: Гидрометеиздат, 1960. - 216 с.

117. Шуляковский Л. Г., Басурина В.М. Расчет начала ледостава на реках в естественных условиях и в условиях регулирования стока. — Труды Гидрометцентра СССР, 1967, вып. 8, с. 12—29.

118. Шуляковский Л. Г., Еремина В. И. К методике прогноза заторных уровней воды. // Метеорология и гидрология. 1952. № 1. С. 46-51.

119. Atashi V., Taheri Gorji H. Enhanced flood prediction using LSTM and climate parameters: multi-station analysis of snowmelt-induced flooding in the Red River of the North // Journal of Hydroinformatics. – 2025. – Vol. 27, No. 2. – P. 245–260. – DOI: 10.2166/hydro.2025.236.

120. Ayzel G., Moreido V., Varentsova N., et. al OPENFORECAST: The First Open-Source Operational Runoff Forecasting System in Russia // *Water*. 2019. Vol. 11, no. 8. P. 1546.
121. Beltaos S. *River Ice Jams* Water Resources Publication, 1996. 372 p.
122. Beltaos S., Prowse T. D. Climate impacts on extreme ice jam events in Canadian rivers. // *Hydrological Science Journal*, 2001. Vol. 46. Is. 1. pp. 157 – 182. doi:10.1080/02626660109492807
123. Beltaos S., Burrell B.C. Climatic change and river ice breakup // *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, Vol. 30. Is.1. pp. 145-155. DOI: [10.1139/102-042](https://doi.org/10.1139/102-042)
124. Beltaos S. River ice breakup processes: recent advances and future directions // *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 2007. – T. 34. – №. 6. – pp. 703- 716.
125. Beltaos S. Progress in the study and management of river ice jams // *Cold Regions Science and Technology* 51 (2008). pp. 2–19.
126. Beltaos S. Assessing ice-jam flood risk: methodology and limitations // *Proceedings of the 20th IAHR International Symposium on Ice*, Lathi, Finland. – 2010. – pp. 14-17.
127. Beltaos S. Distributed function analysis of ice jam flood frequency // *Cold Regions Science and Technology*. – 2012. – T. 71. – pp. 1-10.
128. Beltaos S. Freezeup jamming and formation of ice cover // *Committee on River Ice Processes and the Environment*, Canadian Geophysical Union, Hydrology Section: Edmonton, AB, Canada. – 2013. – pp. 181-256.
129. Beltaos S. Comparing the impacts of regulation and climate on ice-jam flooding of the Peace-Athabasca Delta // *Cold Regions Science and Technology*. – 2014. – T. 108. – pp. 49-58.
130. Beltaos S., Burrell B. C. Hydroclimatic aspects of ice jam flooding near Perth-Andover, New Brunswick // *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 2015. – T. 42. – №. 9. – pp. 686-695.
131. Beltaos S. Frequency of ice-jam flooding of Peace-Athabasca Delta // *Canadian Journal of Civil Engineering*. – 2018. – T. 45. – №. 1. – pp. 71-75.

132. Beltaos S., Bonsal B. Climate change impacts on Peace River ice thickness and implications to ice-jam flooding of Peace-Athabasca Delta, Canada // *Cold Regions Science and Technology*. – 2021. – Т. 186. – P. 103279.
133. Bilello M.A. Method for Predicting River and Lake Ice Formation in the Fall // *Journal of Applied Meteorology*. 1964. Vol. 3, № 1. – P. 38–44.
134. Blaskey, D., Y. Cheng, A. Newman, J. Koch, et al. Using Remote Sensing, Statistical, and Machine Learning Techniques to Assess Alaskan River Ice Phenology and Thickness. 2024 AGU Meeting, Washington, DC, December 09 - 13, 2024.
135. Chang W., Chen X., He Z., Zhou S. A Prediction Hybrid Framework for Air Quality Integrated with W-BiLSTM(PSO)-GRU and XGBoost Methods // *Sustainability*. — 2023. — Т. 15. — № 22. — Ст. 16064. — DOI: 10.3390/su152216064. — Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/22/16064> (дата обращения: 05.05.2025).
136. Chen T., Guestrin C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. — 2016. — P. 785–794. DOI: 10.1145/2939672.2939785
137. Chu T., Lindenschmidt K. E. Effects of River Geomorphology on River Ice Freeze-up and Break-up Rates Using MODIS Imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2019. 45(2). — P. 176–191. DOI: <https://doi.org/10.1080/07038992.2019.1635004>
138. Demin, V. I., Zyuzin Yu. L., 2006: On climatic changes in the Khibiny Mountains (Kola Peninsula, Russia). *Physics of Auroral Phenomena, Proceedings of the XXIX Annual Seminar, Apatity, Kola Science Centre, Russian Academy of Science*. – P. 281–284.
139. de Amorim L. B., Cavalcanti, G. D. C., Cruz, R. M. O. The choice of scaling technique matters for classification performance // *Applied Soft Computing*. — 2023. — Vol. 133. — Article ID: 109924. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109924>

140. Duguay C. R., Bernier M., Gauthier Y., Kouraev A. Remote sensing of lake and river ice // In: Tedesco M. (ed.) Remote Sensing of the Cryosphere. Chichester: Wiley-Blackwell, 2015. pp. 273–306. DOI: 10.1002/9781118368909.ch12
141. Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*. – 2016. – Vol. 9, No. 5. – P. 1937–1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
142. Fan H., Zhao Y., Liu Z., Li D., Wang B. Flood flow prediction based on combined CNN-GRU-XGBoost model [Электронный ресурс] // ResearchGate. — 2023. — Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/372423866_Flood_flow_prediction_based_on_combined_CNN-GRU-XGBoost_model (дата обращения: 05.05.2025).
143. Glorot X., Bordes A., Bengio Y. Deep Sparse Rectifier Neural Networks // *Proceedings of the 14th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS)*. — 2011. — P. 315–323.
144. Friedman J., Hastie T., Tibshirani R. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. — 2nd ed. — Springer, 2009. — 745 p.
145. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning*. — Cambridge, MA: MIT Press, 2016. — 775 p.
146. Graf, R.; Tomczyk, A.M. The Impact of Cumulative Negative Air Temperature Degree-Days on the Appearance of Ice Cover on a River in Relation to Atmospheric Circulation. *Atmosphere*, 9. 2018. 204 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos9060204>
147. Graves A., Schmidhuber J. Framewise phoneme classification with bidirectional LSTM and other neural network architectures // *Neural Networks*. — 2005. — Vol. 18. — P. 602–610.
148. Hallerbäck S., Huning L. S., Love C., Persson M., Stensen K., Gustafsson D., AghaKouchak A. Climate warming shortens ice durations and alters freeze and break-up patterns in Swedish water bodies // *The Cryosphere*. — 2022. — Vol. 16. — P. 2493–2503. — DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-16-2493-2022>.

149. Hancock, J.T., Khoshgoftaar, T.M. Survey on categorical data for neural networks // *Journal of Big Data*. — 2020. — T. 7. — Ст. 28. — DOI: 10.1186/s40537-020-00305-w
150. He H., Bai Y., Garcia E. A., Li S. ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning // *Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*. — 2008. — P. 1322–1328.
151. Hung Tao Shen Mathematical modeling of river ice processes // *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 62, Issue 1.2010 — pp. 3-13. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.02.007
152. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization // *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. — 2015. — arXiv:1412.6980.
153. Kirillin G., Leppäranta M., Terzhevik A., et al. Physics of seasonally ice-covered lakes: A review // *Aquatic Sciences*. 2012. T. 74, № 4. С. 659–682. DOI: 10.1007/s00027-012-0279-y
154. Kuhn M., Johnson K. *Applied Predictive Modeling*. — Springer, 2013. — 600 p.
155. Leppäranta M. *Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover*. Berlin: Springer, 2015. 301 p. DOI: 10.1007/978-3-642-29081-7.
156. Lavrova O.Yu., Anna I. Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Bocharova T. Yu. Interannual variability of ice cover in the Caspian Sea, *Journal of Hydrology X*, Volume 17, 2022. DOI: [1016/j.hydroa.2022.100145](https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2022.100145)
157. Liu C., Zhang, S., Zhang, H., Wang, Q., et. al. Prediction of River Ice Breakup Forecasting the River Ice Break-Up Date in the Upper Reaches of the Heilongjiang River Based on Machine Learning // *Water*. — 2025. — Vol. 17, No. 3. — Article 434. DOI: 10.3390/w17030434.
158. Madaeni F., Chokmani K., Lhissou R., Homayouni S., et al. Convolutional neural network and long short-term memory models for ice-jam predictions // *The Cryosphere*. — 2022. — Vol. 16. — P. 1447–1468. — DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-16-1447-2022>.

159. Magnuson J.J., Robertson D.M., Benson B.J. et al. Historical Trends in Lake and River Ice Cover in the Northern Hemisphere // *Science*. — 2000. — Vol. 289, № 5485. — P. 1743–1746.
160. Marshall G.J., Vignols R.M., Rees W.G. Climate change in the Kola Peninsula, Arctic Russia, during the last 50 years from meteorological observations // *Journal of Climate*. — 2016. — Vol. 29, No. 18. — P. 6823–6840.
161. Orozco López E., Kaplan D., Linhoss A. Interpretable Transformer Neural Network Prediction of Diverse Environmental Time Series Using Weather Forecasts // *Water Resources Research*. — 2024. — Vol. 60, No. 10. — Article e2023WR036337. DOI: 10.1029/2023WR036337.
162. Ougahi J. H., Rowan J. S. Enhanced streamflow forecasting using hybrid modelling integrating glacio-hydrological outputs, deep learning and wavelet transformation // *Scientific Reports*. — 2025. — Vol. 15. — Article 2762. — DOI: 10.1038/s41598-025-87187-1.
163. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A.V., Gulín A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // *Advances in Neural Information Processing Systems*. — 2018. — Vol. 31.
164. Prowse, T.D., Alfredsen, K., Beltaos, S., et. al Past and Future Changes in Arctic Lake and River Ice // *Ambio*. — 2011. — Vol. 40, Suppl. 1. — P. 53–62. — DOI: 10.1007/s13280-011-0216-7.
165. Prowse T. D., Beltaos S. Climatic control of river-ice hydrology: a review // *Hydrological Processes*. 2002. T. 16(4). — pp. 805–822. DOI: 10.1002/hyp.369.
166. Prowse TD, Bonsal BR, Duguay CR, Lacroix MP. River-ice break-up/freeze-up: a review of climatic drivers, historical trends and future predictions. *Annals of Glaciology*. 2007; 46:443-451. DOI:10.3189/172756407782871431
167. Rainio O., Teuho J., Klén R. Evaluation metrics and statistical tests for machine learning // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 6086. DOI: 10.1038/s41598-024-56706-x.

168. Sokolova M., Lapalme G. A systematic analysis of performance measures for classification tasks // *Information Processing & Management*. 2009. Vol. 45, No. 4. P. 427–437. DOI: 10.1016/j.ipm.2009.03.002.
169. Song, D.; Zhang, Y.; Shan, X.; Cui, J., et. al. Over-Learning Phenomenon of Wavelet Neural Networks in Remote Sensing Image Classification // *Entropy*. 2017. Vol. 19, No. 3. DOI: 10.3390/e19030101
170. Subhadarsini S., Kumar D.N., Govindaraju R.S. Enhancing hydro-climatic and land parameter forecasting using Transformer networks // *Journal of Hydrology*. — 2025. — Vol. 655. — Article ID: 132906. — ISSN 0022-1694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.132906.
171. Sun, W., Trevor, B. A Comparison of Fuzzy Logic Models for Breakup Forecasting of the Athabasca River. In: *Proceedings of the 18th CRIPE Workshop*, 2015.
172. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., et al. (2017). Attention Is All You Need // *Advances in Neural Information Processing Systems*. — 2017. — Vol. 30. — P. 5998–6008. — DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.
173. Vignols, R.M., Marshall, G.J., Rees, W.G., Zaika, Y., Phillips, T., & Blinova, I. (2019). Assessing snow cover changes in the Kola Peninsula, Arctic Russia, using a synthesis of MODIS snow products and station observations. *The Cryosphere*, 13. — P. 333–349. DOI: 10.5194/tc-13-333-2019
174. Vuglinsky V.S. Assessment of Changes in Ice Regime Characteristics of Russian Lakes and Rivers under Current Climate Conditions // *Natural Resources*. 2017. Vol. 8. — P. 416–431.
175. Vuglinsky V. S. Peculiarities of ice events in Russian Arctic rivers // *Hydrol. process*. 2002. № 16. P. 905-913.
176. Yang R.-M., Yang D., Li H., Liu B., Ye B. Dramatic thinning of Alaskan river ice and its climatic controls // *Advances in Climate Change Research*. — 2022. — Vol. 13, No. 5. — P. 623–633. — DOI: 10.1016/j.accre.2022.08.001.
177. Zhang Y., Zhao Z., Zheng J. CatBoost: A new approach for estimating daily reference crop evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Northern China //

Journal of Hydrology. — 2020. — Vol. 588. — Article 125087. DOI: j.jhydrol.2020.125087.

178. Zhao L. River Ice Breakup Forecasting Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic Systems. Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, Edmonton, AB, Canada, 2012.

Список сокращений

АГК – автоматизированный гидрологический комплекс.

ВАК – высшая аттестационная комиссия.

ЕТР – Европейская территория России.

ИНС – искусственные нейронные сети.

ИСЗ – индекс суровости зимы.

ИУЗ – индекс условий замерзания

ПЛЯ – первичные ледовые явления.

СГДМ – сумма градусо-дней мороза

ТПО – температура поверхности океана

УГМС – Управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Adam – Adaptive Moment Estimation, алгоритм оптимизации в нейронных сетях.

ADASYN – Adaptive Synthetic Sampling Approach for Imbalanced Learning (адаптивный метод синтетического дополнения данных для несбалансированных выборок).

ANN – Artificial Neural Networks (искусственные нейронные сети).

BiLSTM – Bidirectional Long Short-Term Memory (двунаправленная LSTM-модель).

CatBoost – градиентный бустинг на симметричных деревьях, оптимизированный для категориальных признаков.

CNN – Convolutional Neural Network (сверточная нейронная сеть).

CMIP6 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 6.

DL – Deep Learning (глубинное обучение).

GRU – Gated Recurrent Unit (рекуррентный блок с управляющими «воротами»).

LSTM – Long Short-Term Memory (модель с долгой краткосрочной памятью).

MAE – Mean Absolute Error (средняя абсолютная ошибка).

ML – Machine Learning (машинное обучение).

ReLU – Rectified Linear Unit, функция активации с отсечением отрицательных значений.

RF – Random Forest, ансамблевый метод деревьев решений.

RMSE – Root Mean Square Error (среднеквадратическая ошибка).

RNN – Recurrent Neural Network (рекуррентная нейронная сеть).

SGD – Stochastic Gradient Descent (стохастический градиентный спуск).

SMOTE – Synthetic Minority Over-sampling Technique (метод синтетического увеличения доли редкого класса).

SSP2-4.5 – сценарий изменения климата Shared Socioeconomic Pathway 2-4.5.

SSP5-8.5 – сценарий изменения климата Shared Socioeconomic Pathway 5-8.5.

SVM – Support Vector Machine (метод опорных векторов).

TCN – Temporal Convolutional Network (временная сверточная сеть).

XGBoost – Extreme Gradient Boosting, алгоритм градиентного бустинга деревьев решений.

Приложения

Приложение 1. Гидрологическая изученность и сеть метеорологических станций на Кольском полуострове.

Таблица 1. Сведения о речных постах

Название водного объекта и пункта наблюдений	Код пункта наблюдений	Расстояние (км) от		Площадь водосбора км ²	Период действия		Отметка нуля поста (м)	Координаты	
		истока	устья		открыт	закрыт		широта	долгота (гр.мин.)
р.Печенга - ст.Печенга	71018	93.0	8.30	1680	19.09.1957	Действ.	13.54	69.31	31.10
р.Титовка - 15.5 км от устья	71035	68.0	15.5	942	06.08.1953	17.02.1997	64.15	69.29	31.49
р.Ура - с.Ура-Губа	71044	60.0	3.00	1020	12.12.1934	Действ.	1.45	69.16	32.48
р.Печа - с.Падун	71067	78.0	1.00	1600	27.04.1930	Действ.	23.00	68.34	31.43
р.Пак - 3 км от устья	71072	19.0	3.00	129	30.03.1941	20.06.1999	20.17	68.46	32.22
р.Кола - исток	71098	1.00	82.0	575	20.04.1934	Действ.	132.29	68.21	33.16
р.Кола - 1429-ый км Октябрьской ж.д.	71104	75.0	8.00	3780	18.10.1927	Действ.	23.53	68.50	33.05
р.Кола - г.Кола	71105	82.0	0.80	3850	16.10.1927	17.04.1997	1.33	68.53	33.02
р.Кица - ст.Лопарская	71109	85.0	2.20	1150	05.02.1932	Действ.	100.40	68.37	33.17
р.Туманная - пос.Туманный	71146	2.30	4.20	127	11.05.1963	Действ.	104.00	68.53	35.41
р.Поной - с.Краснощелье	71165	136	290	3810	07.03.1940	Действ.	147.98	67.21	37.02
р.Поной - с.Каневка	71168	312	114	10200	20.08.1932	Действ.	124.81	67.08	39.40
р.Чаваньга - с.Чаваньга	71185	49.0	3.00	1180	28.07.1962	Действ.	19.67	66.08	37.45
р.Варзуга - с.Варзуга	71186	231	23.0	7940	07.03.1935	Действ.	8.71	66.24	36.38
р.Умба - исток	71193	0.50	123	2380	27.02.1932	Действ.	148.54	67.32	34.19
р.Умба - пор.Паялка	71199	119	3.70	6470	14.06.1930	Действ.	3.43	66.41	34.19
р.Ена - пос.Ена	71241	72.0	5.50	1620	01.06.1933	Действ.	151.41	67.37	31.04
р.Монча - г.Мончегорск	71258	80.0	6.00	1480	14.08.1933	Действ.	128.00	67.58	32.52

Название водного объекта и пункта наблюдений	Код пункта наблюдений	Расстояние (км) от		Площадь водосбора км ²	Период действия		Отметка нуля поста (м)	Координаты	
		истока	устья		открыт	закрыт		широта	долгота (гр.мин.)
р.Куреньга - г.Оленегорск	71260	2.50	3.10	509	12.10.1933	Действ.	129.93	68.06	33.19
р.Гольцовка - ст.Имандра	71267	12.0	1.50	89.8	08.09.1961	Действ.	130.09	67.50	33.14
р.Малая Белая - ст.Хибины	71268	12.0	1.50	79.9	14.06.1929	Действ.	154.32	67.41	33.15
р.Юкспорйок - г.Кировск	71277	7.90	1.80	33.3	27.09.1968	Действ.	316.76	67.38	33.42
р.Западная Лица (Большая Лица) - ст.Моккет(ж.д.мост)	71038	60.0	41.0	720	21.07.1957	01.09.1987	102.35	69.20	31.70
р.Тумча - пос.Алакуртти	49017	168.0	4.0	2100	24.07.1953	Действ.	131.26	66.96	30.33

Таблица 2. Сведения об озерных постах

Название водного объекта и пункта наблюдений	Код пункта наблюдений	Площадь водоема км ²	Площадь водосбора км ²	Период действия		Отметка нуля поста (м)	Координаты	
				открыт	закрыт		широта	долгота (гр.мин.)
Пермус-озеро-г. Оленегорск	71965	24.4	503	12349	Действ.	140.00	68.10	33.28
Имандра-ст. Хибины	71953	812	12300	10698	Действ.	125.08	67.68	33.25
Имандра-пгт. Зашеек	71948	812	12300	11319	Действ.	125.55	67.40	32.55
Умб-озеро-исток р. Умбы	71936	313	2130	11456	Действ.	148.81	67.53	34.31
Серебрянское-пос. Серебрянский	71932	556	9940		Действ.	145.00	68.83	35.58
Ловозеро-с. Ловозеро	71928	200	3770	11886	Действ.	152.81	67.98	35.08
Пулозеро-ст. Пулозеро	71920	8.62	498	10155	Действ.	115.66	68.36	33.29
В. Туломское-с. Ниванкюль	71910	745	17500	18142	Действ.	71.01	68.61	31.76
Куэтс-ярви-пгт. Никель	71901	17	679	17573	Действ.	18.56	69.41	30.21
Княжегубское - с. Ковдозеро	49913	608			Действ.	33.29	66.76	31.56

Название водного объекта и пункта наблюдений	Код пункта наблюдений	Площадь водоема км2	Площадь водосбора км2	Период действия		Отметка нуля поста (м)	Координаты	
				открыт	закрыт		широта	долгота (гр.мин.)
Иовское - пос. Зареченск	49911	294			Действ.	70.22	66.67	31.38

Таблица 3. Сведения о метеорологических станциях

Название метеорологической станции	Индекс	Координаты	
		широта (гр.мин.)	долгота (гр.мин.)
Ковдор	22204	67.56	30.45
Вайда-Губа	22003	69.94	31.97
Териберка	22028	69.16	35.14
Янискоски	22101	68.97	28.78
Мурманск	22113	68.96	33.05
Святой Нос	22140	68.16	39.74
Кандалакша	22217	67.15	32.41
Краснощелье	22235	67.35	37.05
Каневка	22249	67.13	39.67
Умба	22324	66.68	34.34
Сосновец остров	22355	66.49	40.68
Калевала	22408	65.20	31.18

Приложение 2. Корреляционные матрицы дат появления первичных ледовых явлений и установления ледостава рек и озер Кольского полуострова.

Таблица 1. Корреляционные матрицы дат появления первичных ледовых явлений рек Кольского полуострова

Код поста	71018	71035	71038	71044	71067	71072	71098	71104	71105	71109	71146	71165	71168	71085	71186	71193	71199	71241	71258	71260	71267	71268	71277	49017
71018	1.00	0.87	0.69	0.42	0.85	0.53	0.24	0.88	0.73	0.92	0.86	0.58	0.64	0.59	0.69	0.17	0.40	0.60	0.41	0.52	0.37	0.23	0.50	0.94
71035	0.87	1.00	0.88	0.31	0.40	0.39	0.22	0.61	0.56	0.79	0.75	0.36	0.49	0.62	0.63	-0.26	0.71	0.59	0.37	0.61	0.53	0.37	0.63	0.93
71038	0.69	0.88	1.00	0.30	0.46	0.29	0.11	0.51	0.51	0.56	0.50	0.47	0.38	0.45	0.37	-0.06	0.62	0.59	0.13	0.37	0.28	0.24	0.59	0.64
71044	0.42	0.31	0.30	1.00	0.34	0.57	0.15	0.35	0.25	0.41	0.01	0.04	0.16	0.15	0.18	0.12	0.12	0.14	0.23	0.09	0.48	0.34	0.03	0.34
71067	0.85	0.40	0.46	0.34	1.00	0.48	-0.13	0.76	0.65	0.86	0.82	0.73	0.62	0.51	0.64	0.07	0.45	0.80	0.50	0.54	0.43	0.32	0.54	0.91
71072	0.53	0.39	0.29	0.57	0.48	1.00	0.58	0.62	0.34	0.59	0.28	0.56	0.37	0.15	0.45	-0.05	0.32	0.09	0.67	0.18	0.74	0.41	0.14	0.77
71098	0.24	0.22	0.11	0.15	-0.13	0.58	1.00	-0.14	0.37	-0.14	-0.33	-0.27	-0.12	-0.29	-0.04	-0.16	-0.08	-0.15	0.05	-0.09	-0.03	0.08	-0.08	0.32
71104	0.88	0.61	0.51	0.35	0.76	0.62	-0.14	1.00	0.51	0.94	0.89	0.83	0.64	0.58	0.66	0.14	0.46	0.77	0.50	0.51	0.42	0.27	0.54	0.88
71105	0.73	0.56	0.51	0.25	0.65	0.34	0.37	0.51	1.00	0.66	0.60	0.46	0.51	0.45	0.55	0.29	0.36	0.62	0.39	0.46	0.34	0.47	0.76	0.61
71109	0.92	0.79	0.56	0.41	0.86	0.59	-0.14	0.94	0.66	1.00	0.89	0.85	0.76	0.58	0.74	0.20	0.45	0.80	0.48	0.52	0.45	0.23	0.54	0.88
71146	0.86	0.75	0.50	0.01	0.82	0.28	-0.33	0.89	0.60	0.89	1.00	0.84	0.78	0.44	0.76	0.38	0.52	0.85	0.41	0.54	0.27	0.05	0.43	0.89
71165	0.58	0.36	0.47	0.04	0.73	0.56	-0.27	0.83	0.46	0.85	0.84	1.00	0.92	0.43	0.83	0.21	0.33	0.69	0.21	0.31	0.17	0.12	0.24	0.79
71168	0.64	0.49	0.38	0.16	0.62	0.37	-0.12	0.64	0.51	0.76	0.78	0.92	1.00	0.44	0.82	0.22	0.46	0.85	0.55	0.59	0.43	0.16	0.64	0.64
71085	0.59	0.62	0.45	0.15	0.51	0.15	-0.29	0.58	0.45	0.58	0.44	0.43	0.44	1.00	0.65	0.19	0.51	0.55	0.34	0.32	0.37	0.33	0.48	0.34
71186	0.69	0.63	0.37	0.18	0.64	0.45	-0.04	0.66	0.55	0.74	0.76	0.83	0.82	0.65	1.00	0.20	0.54	0.76	0.55	0.53	0.55	0.31	0.61	0.77
71193	0.17	-0.26	-0.06	0.12	0.07	-0.05	-0.16	0.14	0.29	0.20	0.38	0.21	0.22	0.19	0.20	1.00	0.24	0.23	0.20	0.44	-0.06	0.37	0.30	-0.18
71199	0.40	0.71	0.62	0.12	0.45	0.32	-0.08	0.46	0.36	0.45	0.52	0.33	0.46	0.51	0.54	0.24	1.00	0.48	0.55	0.71	0.52	0.57	0.72	0.69
71241	0.60	0.59	0.59	0.14	0.80	0.09	-0.15	0.77	0.62	0.80	0.85	0.69	0.85	0.55	0.76	0.23	0.48	1.00	0.49	0.56	0.42	0.25	0.60	0.99

Код поста	71018	71035	71038	71044	71067	71072	71098	71104	71105	71109	71146	71165	71168	71085	71186	71193	71199	71241	71258	71260	71267	71268	71277	49017
71258	0.41	0.37	0.13	0.23	0.50	0.67	0.05	0.50	0.39	0.48	0.41	0.21	0.55	0.34	0.55	0.20	0.55	0.49	1.00	0.63	0.60	0.67	0.68	0.46
71260	0.52	0.61	0.37	0.09	0.54	0.18	-0.09	0.51	0.46	0.52	0.54	0.31	0.59	0.32	0.53	0.44	0.71	0.56	0.63	1.00	0.45	0.51	0.86	0.64
71267	0.37	0.53	0.28	0.48	0.43	0.74	-0.03	0.42	0.34	0.45	0.27	0.17	0.43	0.37	0.55	-0.06	0.52	0.42	0.60	0.45	1.00	0.62	0.56	0.72
71268	0.23	0.37	0.24	0.34	0.32	0.41	0.08	0.27	0.47	0.23	0.05	0.12	0.16	0.33	0.31	0.37	0.57	0.25	0.67	0.51	0.62	1.00	0.70	0.37
71277	0.50	0.63	0.59	0.03	0.54	0.14	-0.08	0.54	0.76	0.54	0.43	0.24	0.64	0.48	0.61	0.30	0.72	0.60	0.68	0.86	0.56	0.70	1.00	0.47
49017	0.94	0.93	0.64	0.34	0.91	0.77	0.32	0.88	0.61	0.88	0.89	0.79	0.64	0.34	0.77	-0.18	0.69	0.99	0.46	0.64	0.72	0.37	0.47	1.00

Таблица 2. Матрица периода совместных наблюдений для ряда дат появления первичных ледовых явлений рек Кольского полуострова.

Код поста	71018	71035	71038	71044	71067	71072	71098	71104	71105	71109	71146	71165	71168	71085	71186	71193	71199	71241	71258	71260	71267	71268	71277	49017
71018	38	27	27	38	37	26	35	38	37	37	15	15	38	15	38	14	38	18	17	22	21	35	15	11
71035	27	40	32	35	40	31	32	40	39	32	9	12	38	12	38	12	39	13	13	21	17	30	10	13
71038	27	40	32	35	40	31	32	40	39	32	9	12	38	12	38	12	39	13	13	21	17	30	10	13
71044	38	35	38	76	72	41	58	76	53	69	36	49	76	37	76	46	73	39	39	40	43	67	36	25
71067	37	40	40	72	82	42	57	82	59	66	33	49	77	35	77	47	75	36	36	39	40	64	33	23
71072	26	31	34	41	42	42	36	42	40	37	10	18	42	13	42	17	42	14	14	22	18	35	11	13
71098	35	32	33	58	57	36	60	60	47	57	26	33	60	28	60	35	58	30	30	34	34	56	27	20
71104	38	40	40	76	82	42	60	91	65	70	37	52	83	38	83	52	81	40	40	40	44	68	37	26
71105	37	39	40	53	59	40	47	65	65	47	14	27	58	15	58	29	59	18	18	26	22	46	15	15
71109	37	32	34	69	66	37	57	70	47	70	37	44	70	38	70	43	67	40	40	40	44	67	37	26
71146	15	9	10	36	33	10	26	37	14	37	37	25	37	34	37	24	34	36	36	24	36	36	36	13
71165	15	12	15	49	49	18	33	52	27	44	25	52	52	25	52	48	49	26	24	18	24	42	24	13
71168	38	38	39	76	77	42	60	83	58	70	37	52	83	38	83	52	80	40	40	40	44	68	37	26
71085	17	12	13	38	34	13	28	38	16	38	32	24	38	33	38	23	35	32	33	25	36	37	32	15

Код поста	71018	71035	71038	71044	71067	71072	71098	71104	71105	71109	71146	71165	71168	71085	71186	71193	71199	71241	71258	71260	71267	71268	71277	49017
71186	38	38	39	76	77	42	60	83	58	70	37	52	83	38	83	52	80	40	40	40	44	68	37	26
71193	14	12	15	46	47	17	35	52	29	43	24	48	52	24	52	52	49	26	24	17	24	42	24	13
71199	38	39	40	73	75	42	58	81	59	67	34	49	80	35	80	49	81	37	37	38	41	65	34	25
71241	18	13	14	39	36	14	30	40	18	40	36	26	40	33	40	26	37	40	38	25	38	38	37	13
71258	17	13	14	39	36	14	30	40	18	40	36	24	40	35	40	24	37	38	40	27	40	40	37	14
71260	22	21	18	40	39	22	34	40	26	40	24	18	40	25	40	17	38	25	27	40	31	39	24	18
71267	21	17	18	43	40	18	34	44	22	44	36	24	44	37	44	24	41	38	40	31	44	44	37	18
71268	35	30	32	67	64	35	56	68	46	67	36	42	68	37	68	42	65	38	40	39	44	68	37	26
71277	15	10	11	36	33	11	27	37	15	37	36	24	37	33	37	24	34	37	37	24	37	37	37	13
49017	11	13	9	25	23	13	20	26	15	26	13	13	26	14	26	13	25	13	14	18	18	26	13	26

Таблица 3. Корреляционные матрицы дат установления ледостава рек Кольского полуострова.

Код поста	71018	71035	71038	71044	71067	71072	71098	71104	71105	71109	71146	71165	71168	71085	71186	71193	71199	71241	71258	71260	71267	71268	71277	49017
71018	1.00	0.32	0.75	0.52	0.37	0.02	0.34	0.48	-0.02	-0.01	0.17	0.38	0.31	0.34	0.17		0.16	0.52	-1.00	0.50	0.49		-0.09	0.15
71035	0.32	1.00	0.38	0.26	0.16	0.46	0.22	0.29	-0.06	0.01	0.58	0.13	0.09	0.40	0.00	-0.93	-0.16	-0.09	0.25	0.16	0.35		0.36	0.22
71038	0.75	0.38	1.00	0.47	0.31	0.19	-0.03	0.75	-0.08	0.03	0.13	0.10	0.36	0.71	0.12	-0.33	0.35	0.44	-1.00	0.57	0.50	1.00	0.37	0.42
71044	0.52	0.26	0.47	1.00	0.41	0.02	0.39	0.25	0.27	0.43	0.30	0.33	0.47	0.43	0.47	-0.54	-0.22	-0.08	-0.15	0.38	0.58		0.66	0.26
71067	0.37	0.16	0.31	0.41	1.00	0.14	0.24	0.47	0.35	0.31	0.51	0.51	0.48	0.44	0.42	0.05	-0.15	-0.07	-1.00	0.08	0.43	1.00	0.42	0.30
71072	0.02	0.46	0.19	0.02	0.14	1.00	-0.11	0.17	-0.25	0.29	0.45	-0.03	0.07	-0.10	0.13	0.00	-0.21	-0.39	0.07	-0.38	-0.16	1.00	-0.32	0.38
71098	0.34	0.22	-0.03	0.39	0.24	-0.11	1.00	-0.02	0.31	0.04	0.34	-0.23	0.10	0.77	0.11	-0.35	-0.10	0.20	-0.16	0.41	0.57	1.00	0.38	0.45
71104	0.48	0.29	0.75	0.25	0.47	0.17	-0.02	1.00	0.22	0.15	0.58	0.21	0.42	0.47	0.22	0.41	0.24	0.20	-0.71	0.60	0.58	1.00	0.38	0.68
71105	-0.02	-0.06	-0.08	0.27	0.35	-0.25	0.31	0.22	1.00	0.41	0.17	0.37	0.36	0.55	0.36	0.82	0.08	-0.40	0.99	0.79	0.17		0.41	0.16
71109	-0.01	0.01	0.03	0.43	0.31	0.29	0.04	0.15	0.41	1.00	0.44	0.53	0.62	0.25	0.66	-0.42	-0.17	-0.55	-0.35	-0.06	0.16	1.00	0.53	0.28
71146	0.17	0.58	0.13	0.30	0.51	0.45	0.34	0.58	0.17	0.44	1.00	0.14	0.52	0.49	0.35		0.01	0.33	0.15	0.50	0.57		0.20	0.68
71165	0.38	0.13	0.10	0.33	0.51	-0.03	-0.23	0.21	0.37	0.53	0.14	1.00	0.39	0.39	0.49	-0.02	-0.48	-0.52		-1.00			-0.86	-0.24
71168	0.31	0.09	0.36	0.47	0.48	0.07	0.10	0.42	0.36	0.62	0.52	0.39	1.00	0.49	0.67	-0.18	-0.06	-0.25	-0.99	0.26	0.53	1.00	0.47	0.60

Код поста	71018	71035	71038	71044	71067	71072	71098	71104	71105	71109	71146	71165	71168	71085	71186	71193	71199	71241	71258	71260	71267	71268	71277	49017
71085	0.34	0.40	0.71	0.43	0.44	-0.10	0.77	0.47	0.55	0.25	0.49	0.39	0.49	1.00	0.64		0.04	-0.19		0.74	0.65		0.51	0.16
71186	0.17	0.00	0.12	0.47	0.42	0.13	0.11	0.22	0.36	0.66	0.35	0.49	0.67	0.64	1.00	0.19	-0.24	-0.17	-0.31	0.08	0.47	1.00	0.60	0.34
71193		-0.93	-0.33	-0.54	0.05	0.00	-0.35	0.41	0.82	-0.42		-0.02	-0.18		0.19	1.00	0.50	-1.00		1.00		1.00		1.00
71199	0.16	-0.16	0.35	-0.22	-0.15	-0.21	-0.10	0.24	0.08	-0.17	0.01	-0.48	-0.06	0.04	-0.24	0.50	1.00	0.13	-0.67	0.48	0.22		-0.21	0.09
71241	0.52	-0.09	0.44	-0.08	-0.07	-0.39	0.20	0.20	-0.40	-0.55	0.33	-0.52	-0.25	-0.19	-0.17	-1.00	0.13	1.00	1.00	0.24	0.43		0.13	0.04
71258	-1.00	0.25	-1.00	-0.15	-1.00	0.07	-0.16	-0.71	0.99	-0.35	0.15		-0.99		-0.31		-0.67	1.00	1.00		-0.35		0.22	
71260	0.50	0.16	0.57	0.38	0.08	-0.38	0.41	0.60	0.79	-0.06	0.50	-1.00	0.26	0.74	0.08	1.00	0.48	0.24		1.00	0.61		0.77	0.44
71267	0.49	0.35	0.50	0.58	0.43	-0.16	0.57	0.58	0.17	0.16	0.57		0.53	0.65	0.47		0.22	0.43	-0.35	0.61	1.00		0.55	0.51
71268			1.00		1.00	1.00	1.00	1.00		1.00			1.00		1.00	1.00						1.00		
71277	-0.09	0.36	0.37	0.66	0.42	-0.32	0.38	0.38	0.41	0.53	0.20	-0.86	0.47	0.51	0.60		-0.21	0.13	0.22	0.77	0.55		1.00	1.00
49017	0.15	0.22	0.42	0.26	0.30	0.38	0.45	0.68	0.16	0.28	0.68	-0.24	0.60	0.16	0.34	1.00	0.09	0.04		0.44	0.51		1.00	1.00

Таблица 4. Матрица периода совместных наблюдений для ряда дат установления ледостава рек Кольского полуострова.

Код поста	71018	71035	71038	71044	71067	71072	71098	71104	71105	71109	71146	71165	71168	71085	71186	71193	71199	71241	71258	71260	71267	71268	71277	49017
71018	39	28	28	37	38	26	38	39	39	35	13	14	39	16	39	0	39	25	4	17	21	0	14	10
71035	28	40	32	35	40	30	40	40	32	30	9	12	35	14	39	3	38	25	3	18	17	0	10	13
71038	28	40	32	35	40	30	40	40	32	30	9	12	35	14	39	3	38	25	3	18	17	0	10	13
71044	37	35	36	73	70	38	49	73	56	66	35	46	70	26	70	8	70	48	4	21	21	1	19	24
71067	38	40	40	70	83	41	61	83	57	65	33	49	71	23	76	10	75	46	4	21	21	2	20	23
71072	26	30	33	38	41	41	40	41	35	34	9	17	38	15	41	10	39	26	3	19	18	2	11	13
71098	38	40	40	49	61	40	66	66	48	44	12	28	53	16	59	10	57	28	4	20	20	2	13	13
71104	39	40	40	73	83	41	66	91	59	68	36	52	76	26	81	10	80	49	4	21	21	2	20	25
71105	39	32	33	56	57	35	48	59	59	54	23	31	58	17	57	6	58	38	4	21	21	1	16	20
71109	35	30	32	66	65	34	44	68	54	68	34	44	67	24	65	7	64	47	4	21	19	2	18	25
71146	13	9	9	35	33	9	12	36	23	34	36	25	35	18	33	0	34	32	4	4	12	0	18	12
71165	14	12	15	46	49	17	28	52	31	44	25	52	47	11	49	10	48	23	0	2	1	2	7	13

Код поста	71018	71035	71038	71044	71067	71072	71098	71104	71105	71109	71146	71165	71168	71085	71186	71193	71199	71241	71258	71260	71267	71268	71277	49017
71168	39	35	38	70	71	38	53	76	58	67	35	47	76	26	73	9	72	48	4	21	21	2	20	24
71085	17	14	15	26	23	15	16	26	20	24	17	10	26	21	26	0	26	23	0	12	16	0	11	10
71186	39	39	40	70	76	41	59	81	57	65	33	49	73	25	81	10	77	46	4	21	21	2	19	24
71193	0	3	7	8	10	10	10	10	6	7	0	10	9	0	10	10	8	2	0	2	0	2	0	2
71199	39	38	39	70	75	39	57	80	58	64	34	48	72	26	77	8	80	46	4	20	21	1	19	24
71241	25	25	22	48	46	26	28	49	38	47	32	23	48	24	46	2	46	49	4	21	20	0	19	24
71258	4	3	3	4	4	3	4	4	4	4	4	0	4	1	4	0	4	4	4	1	4	0	4	0
71260	17	18	15	21	21	19	20	21	21	21	4	2	21	10	21	2	20	21	1	21	13	0	6	14
71267	21	17	18	21	21	18	20	21	21	19	12	1	21	15	21	0	21	20	4	13	21	0	14	6
71268	0	0	2	1	2	2	2	2	1	2	0	2	2	0	2	2	1	0	0	0	0	2	0	0
71277	14	10	11	19	20	11	13	20	16	18	18	7	20	11	19	0	19	19	4	6	14	0	20	2
49017	10	13	9	24	23	13	13	25	20	25	12	13	24	8	24	2	24	24	0	14	6	0	2	25

Таблица 5. Корреляционные матрицы дат появления первичных ледовых явлений озер Кольского полуострова.

Озеро-пост	Верхне-Тулومское - с. Ниванкюль	Имандра-Зашеек	Имандра-Хибины	Иовское - пос. Зареченск	Княжегубское - с. Ковдозеро	Куэтс-ярви - пгт. Никель	Ловозеро - с. Ловозеро	Пермус-озеро - г. Оленегорск	Пулозеро-ст. Пулозеро	Серебрянское - пос. Серебрянский	Умб-озеро - исток р. Умбы
Верхне-Тулумское - с. Ниванкюль	1.00	0.66	0.69	0.87	0.77	0.74	0.49	0.34	0.49	0.84	0.57
Имандра-Зашеек	0.66	1.00	0.75	0.74	0.58	0.77	0.48	0.28	0.57	0.79	0.56
Имандра-Хибины	0.69	0.75	1.00	0.75	0.52	0.75	0.36	0.29	0.44	0.70	0.63
Иовское - пос. Зареченск	0.87	0.74	0.75	1.00	0.76	0.77	0.57	0.39	0.56	0.79	0.62
Княжегубское - с. Ковдозеро	0.77	0.58	0.52	0.76	1.00	0.64	0.34	0.37	0.37	0.71	0.52

Озеро-пост	Верхне-Тулумское - с. Ниванкюль	Имандра-Зашеек	Имандра-Хибины	Иовское - пос. Зареченск	Княжегубское - с. Ковдозеро	Куэтс-ярви - пгт. Никель	Ловозеро - с. Ловозеро	Пермус-озеро - г. Оленегорск	Пулозеро-ст. Пулозеро	Серебрянское - пос. Серебрянский	Умб-озеро - исток р. Умбы
Куэтс-ярви - пгт. Никель	0.74	0.77	0.75	0.77	0.64	1.00	0.38	0.38	0.53	0.73	0.63
Ловозеро - с. Ловозеро	0.49	0.48	0.36	0.57	0.34	0.38	1.00	0.28	0.66	0.43	0.51
Пермус-озеро - г. Оленегорск	0.34	0.28	0.29	0.39	0.37	0.38	0.28	1.00	0.31	0.40	0.29
Пулозеро-ст. Пулозеро	0.49	0.57	0.44	0.56	0.37	0.53	0.66	0.31	1.00	0.58	0.63
Серебрянское - пос. Серебрянский	0.84	0.79	0.70	0.79	0.71	0.73	0.43	0.40	0.58	1.00	0.63
Умб-озеро - исток р. Умбы	0.57	0.56	0.63	0.62	0.52	0.63	0.51	0.29	0.63	0.63	1.00

Таблица 6. Матрица периода совместных наблюдений для ряда дат появления первичных ледовых явлений озер Кольского полуострова.

Озеро-пост	Верхне-Тулумское - с. Ниванкюль	Имандра-Зашеек	Имандра-Хибины	Иовское - пос. Зареченск	Княжегубское - с. Ковдозеро	Куэтс-ярви - пгт. Никель	Ловозеро - с. Ловозеро	Пермус-озеро - г. Оленегорск	Пулозеро-ст. Пулозеро	Серебрянское - пос. Серебрянский	Умб-озеро - исток р. Умбы
Верхне-Тулумское - с. Ниванкюль	44	44	37	40	39	43	44	41	44	34	44
Имандра-Зашеек	44	54	47	43	42	48	53	50	54	37	50
Имандра-Хибины	44	54	47	43	42	48	53	50	54	37	50

Озеро-пост	Верхне-Тулomское - с. Ниванкюль	Имандра-Зашеек	Имандра-Хибины	Иовское - пос. Зареченск	Княжегубское - с. Ковдозеро	Куэтс-ярви - пгт. Никель	Ловозеро - с. Ловозеро	Пермус-озеро - г. Оленегорск	Пулозеро-ст. Пулозеро	Серебрянское - пос. Серебрянский	Умб-озеро - исток р. Умбы
Иовское - пос. Зареченск	37	47	48	36	35	41	47	43	48	30	43
Княжегубское - с. Ковдозеро	40	43	36	46	45	42	43	40	43	37	43
Куэтс-ярви - пгт. Никель	43	48	41	42	41	48	47	46	48	36	48
Ловозеро - с. Ловозеро	44	53	47	43	42	47	54	49	54	37	49
Пермус-озеро - г. Оленегорск	41	50	43	40	39	46	49	50	50	34	47
Пулозеро-ст. Пулозеро	44	54	48	43	42	48	54	50	55	37	50
Серебрянское - пос. Серебрянский	34	37	30	37	37	36	37	34	37	37	37
Умб-озеро - исток р. Умбы	44	50	43	43	42	48	49	47	50	37	50

Таблица 7. Матрица периода совместных наблюдений для ряда дат установления ледостава озер Кольского полуострова.

Озеро-пост	Верхне-Тулумское - с. Ниванкюль	Имандра-Зашеек	Имандра-Хибины	Иовское - пос. Зареченск	Княжегубское - с. Ковдозеро	Куэ́тс-ярви - пгт. Никель	Ловозеро - с. Ловозеро	Пермус-озеро - г. Оленегорск	Пулозеро-ст. Пулозеро	Серебрянское - пос. Серебрянский	Умб-озеро - исток р. Умбы
Верхне-Тулумское - с. Ниванкюль	1.00	0.59	0.57	0.76	0.69	0.60	0.55	0.55	0.47	0.80	0.44
Имандра-Зашеек	0.59	1.00	0.69	0.78	0.68	0.70	0.55	0.55	0.64	0.72	0.66
Имандра-Хибины	0.57	0.69	1.00	0.78	0.68	0.74	0.34	0.56	0.46	0.62	0.66
Иовское - пос. Зареченск	0.76	0.78	0.78	1.00	0.87	0.74	0.60	0.58	0.51	0.80	0.70
Княжегубское - с. Ковдозеро	0.69	0.68	0.68	0.87	1.00	0.74	0.56	0.56	0.43	0.71	0.61
Куэ́тс-ярви - пгт. Никель	0.60	0.70	0.74	0.74	0.74	1.00	0.49	0.71	0.39	0.63	0.51
Ловозеро - с. Ловозеро	0.55	0.55	0.34	0.60	0.56	0.49	1.00	0.46	0.66	0.62	0.47
Пермус-озеро - г. Оленегорск	0.55	0.55	0.56	0.58	0.56	0.71	0.46	1.00	0.59	0.59	0.58
Пулозеро-ст. Пулозеро	0.47	0.64	0.46	0.51	0.43	0.39	0.66	0.59	1.00	0.51	0.53
Серебрянское - пос. Серебрянский	0.80	0.72	0.62	0.80	0.71	0.63	0.62	0.59	0.51	1.00	0.67
Умб-озеро - исток р. Умбы	0.44	0.66	0.66	0.70	0.61	0.51	0.47	0.58	0.53	0.67	1.00

Таблица 8. Матрица периода совместных наблюдений для ряда дат установления ледостава озер Кольского полуострова.

Озеро-пост	Верхне-Тулумское - с. Ниванкюль	Имандра-Зашеек	Имандра-Хибины	Иовское - пос. Зареченск	Княжегубское - с. Ковдозеро	Куэ́тс-ярви - пгт. Никель	Ловозеро - с. Ловозеро	Пермус-озеро - г. Оленегорск	Пулозеро-ст. Пулозеро	Серебрянское - пос. Серебрянский	Умб-озеро - исток р. Умбы
Верхне-Тулумское - с. Ниванкюль	44	44	37	40	39	43	44	39	44	34	44
Имандра-Зашеек	44	54	47	43	42	48	53	48	54	37	50
Имандра-Хибины	44	54	47	43	42	48	53	48	54	37	50
Иовское - пос. Зареченск	37	47	48	36	35	41	47	42	48	30	43
Княжегубское - с. Ковдозеро	40	43	36	46	45	42	43	38	43	37	43
Куэ́тс-ярви - пгт. Никель	43	48	41	42	41	48	47	44	48	36	48
Ловозеро - с. Ловозеро	44	53	47	43	42	47	54	47	54	37	49
Пермус-озеро - г. Оленегорск	39	48	42	38	37	44	47	48	48	32	45
Пулозеро-ст. Пулозеро	44	54	48	43	42	48	54	48	55	37	50
Серебрянское - пос. Серебрянский	34	37	30	37	37	36	37	32	37	37	37
Умб-озеро - исток р. Умбы	44	50	43	43	42	48	49	45	50	37	50

Приложение 3. Копия свидетельства о регистрации прав интеллектуальной собственности на разработанную в рамках данной работы базу данных.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2025622437

**«Многолетние гидрометеорологические характеристики
ледового режима рек и озер Кольского полуострова»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Государственный гидрологический
институт» (RU)**

Авторы: **Канашин Сергей Андреевич (RU), Банщикова
Любовь Святославовна (RU)**

Заявка № 2025621960

Дата поступления 19 мая 2025 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 03 июня 2025 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 0692e7c1c6300bf54f240f670bca2026
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.07.2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов