

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Василенко Александр Николаевич

**Ледотермический режим рек Арктической зоны России
и его потенциальные изменения в 21 в.**

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре гидрологии суши
географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель

– **Фролова Наталья Леонидовна,**
член-корреспондент РАН, доктор
географических наук, профессор

Официальные оппоненты

– **Гармаев Ендон Жамъянович, академик РАН,**
доктор географических наук, директор
Байкальского института природопользования
Сибирского отделения РАН

Екайкин Алексей Анатольевич,
доктор географических наук, ведущий научный
сотрудник отдела географии полярных стран
Арктического и антарктического научно-
исследовательского института

Баникова Любовь Святославовна,
кандидат географических наук, старший
научный сотрудник, зав. отделом научно-
технической информации Государственного
гидрологического института

Защита диссертации состоится «12» декабря 2025 г. в 15 часов 00 минут
на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1,
Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801.

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной
библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на
портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3672>

Автореферат разослан « » ноября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук



А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Ледотермический режим оказывает разноплановое воздействие на водные экосистемы и связанные с реками природно-территориальные комплексы. Температура воды регулирует насыщение речных вод кислородом, выступает важным фактором интенсивности самоочищения рек, а продолжительность безлёдного периода и температура воды в потоке обусловливают выживаемость и распространение гидробионтов. В то же время ледовые явления на реках, с одной стороны, создают препятствия для водопользования и несут ряд угроз прибрежным территориям, с другой стороны, ледяной покров рек используется для организации переправ, дорог, судоремонта. Тепловой сток рек, в свою очередь, является важным фактором формирования микроклимата речных долин, гидрологического режима прибрежной зоны приёмных водоёмов, может выступать фактором термоабразии.

В Арктической зоне России характеристики ледотермического режима рек подвержены значительной пространственно-временной изменчивости в силу разнообразия природных условий. Климатические изменения в высоких широтах происходят более интенсивно, чем в умеренных. Ледотермический режим рек российской Арктики, являющийся фактором развития транспортной и иной инфраструктуры; источником ценных биоресурсов, подвержен влиянию меняющегося климата и антропогенного освоения речных долин, однако степень его изменения в последние десятилетия требует уточнения.

Под российской Арктикой понимается территория РФ севернее 60 с.ш. без учёта островов Северного Ледовитого океана. Эта территория охватывает официально установленную Арктическую зону России (АЗР) и сопредельные территории.

Степень разработанности темы исследования. Методологической и теоретической основой работы стали представления о формировании ледотермических характеристик рек и их пространственно-временного распределения, полученные в период с конца XIX по начало XXI вв. Сведения о сроках замерзания и вскрытия рек собирали М.В. Ломоносов, П.П. Семенов-Тян-Шанский. В 1886 г. М.А. Рыкачёвым и в 1906 г. В.Б. Шостаковичем были созданы первые карты ледового режима рек Российской Империи. В дальнейшем вопросы пространственно-временного распределения сроков формирования и исчезновения ледовых явлений, в первую очередь в низовьях крупнейших сибирских рек, изучались специалистами Арктического института (современный ААНИИ) в рамках развития Северного морского пути. В послевоенное время этим вопросам занимались коллективы авторов «Ресурсов поверхностных вод», ряд работ был выполнен В.С. Антоновым и Ю.В. Налимовым для низовий крупнейших рек Сибири по результатам экспедиций Арктического института в период 1961–1970 гг. С 1970-х гг. до наших дней ряд обобщений выполнили А.Н. Чижов, Р.В. Донченко, С.А. Агафонова, Л.С. Банщикова, Н.Л. Фролова. В настоящее время наиболее актуальный картографический материал по всей территории российской Арктики приведён в [Agafonova et al., 2017] по данным наблюдений до 2016 г. Потенциальные будущие характеристики ледового режима рек на основе модельных оценок будущей среднемесячной температуры

воздуха, сумм температуры воздуха за различные периоды, сроков устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C приводятся в работах В.С. Вуглинского, Б.М. Гинзбурга, И.И. Солдатовой, С.А. Агафоновой, Н.Л. Фроловой и др. За рубежом такие задачи решаются в работах T. Prowse, S. Bealtos, T. Brooks, W. Hibler, F. Harlow, D. Ficklin и др.

Термический режим рек изначально изучался как фактор формирования и исчезновения льда на реках и как абиотический компонент водных экосистем. В российской Арктике пространственные обобщения по данным наблюдений были выполнены в работах Е.М. Соколовой 1951 г. и в монографиях «Ресурсы поверхностных вод» на основе достаточно коротких рядов данных. Уже в XXI в. в России факторы формирования термического режима оценивались Н.И. Алексеевским, Е.О. Кузьминой, Д.В. Магрицким, В.А. Дмитриевой, В.Л. Самохваловым, Н.В. Уховым. В качестве основных факторов, в основном для центральной и южной части Европейской территории России (ЕТР), были выделены температура воздуха, высота водосбора, а в дельтах рек – уменьшение объема вод в разветвленных протоках.

Тепловой сток арктических рек изучался как фактор формирования ледотермического режима Северного Ледовитого океана, а также как фактор термообразии речных берегов. Формирование теплового стока в первую очередь стоком воды показано в работах Б.Д. Зайкова, Ю.Л. Елшина, А.Г. Георгиади, Д.В. Магрицкого. Роль водохранилищ в изменениях термического режима освещена в работах Т.В. Одровой, И.С. Космакова, В.С. Антонова, Д.В. Магрицкого и др. Последствия ввода водохранилищ в эксплуатацию после 2000 г. в бассейнах Оби, Енисея, Лены и Колымы на сегодняшний день не оценены. Многолетние изменения термического режима арктических рек рассматриваются в работах А.Г. Георгиади и Д.В. Магрицкого. Ряды данных, используемых для оценки многолетних изменений как в российских, так и в зарубежных работах, обычно ограничены 2010 г.

За рубежом вопросы термического режима рек освещены в работах D. Caissie, M. van Viet, B. Liu, H. Park, D. Yang, B. Webb, M. Toffolon, S. Piccolroaz, R. Lammers, A. Shiklomanov, N. Wanders, P. Pekarova, M. Kędra, Ł. Wiejaczka, A. Beaufort, E. Latkovska, A. Jurgelėnaitė, D. Hannan, G. Garner и др. Многие зарубежные работы выполненные для территории России, касаются в первую очередь р. Лены, в значительной степени с использованием математических моделей и ограниченных по времени записей логгеров. Изучение термического режима проводится в основном на реках умеренной климатической зоны. Временное разрешение исследований многолетней изменчивости температуры воды чаще всего – среднегодовое или среднесезонное.

Расширение баз данных о ледотермическом режиме арктических рек, изучение пространственно-временной его изменчивости с учётом современных данных, оценка факторов его формирования в высоких широтах, оценка роли строительства новых водохранилищ на реках приобретают особое значение в условиях современного и будущего освоения российской Арктики.

Целью данного исследования стало изучение особенностей пространственно-временной изменчивости ледотермического режима рек на территории российской Арктики на основе наиболее современных данных наблюдений и создание долгосрочных оценок изменений ледотермического режима рек.

Задачи работы:

- актуализировать и расширить созданные ранее на кафедре гидрологии суши МГУ базы данных о температуре воды и ледовых явлениях;
- выполнить комплексный статистический анализ и выявить особенности трансформаций характеристик ледотермического режима рек в пространстве и во времени;
- оценить тепловой сток крупнейших рек в современный период с учётом ввода в эксплуатацию новых ГЭС;
- проанализировать трансформации температуры воды и теплового стока в устьевых областях рек;
- дать оценку характеристик ледового режима рек российской Арктики на середину и конец XXI в. с использованием моделей проекта CMIP6.

Предметом данного исследования является пространственно-временная изменчивость среднемесячной температуры воды и сроков ледового режима арктических рек в период 1961–2021 гг., а **объектом** – температура воды в реках российской Арктики (севернее 60 с.ш.) и характеристики сроки наступления фаз замерзания и вскрытия на реках Арктической зоны России.

Материалы и методы. Статистический анализ применён к данным наблюдений с 319 действующих гидрологических постов за период 1961–2021 гг. и данным реанализа ERA5. Оценены современные характеристики ледотермического режима рек, обновлены картографические материалы, выявлены значимые тренды, получены регрессионные уравнения, по которым, с использованием данных о температуре воздуха по сценариям SSP126 и SSP585 моделей проекта ISIMIP даны оценки их будущих значений.

Научная новизна работы заключается в создании одной из крупнейших в мире баз данных о термическом и ледовом режиме арктических рек, в подробном статистическом анализе полученной информации. Выявлены регионы наиболее интенсивных изменений ледотермического режима рек, показана внутригодовая изменчивость рассматриваемых характеристик в современный период. Уточнено воздействие строительства и модернизации больших ГЭС в последние десятилетия на термический режим рек и уточнены величины теплового стока в Северный Ледовитый океан, с учётом его трансформации в устьевых областях. На основе наиболее современных оценок будущих метеорологических параметров, полученных из моделей проекта CMIP6, включённых в протокол ISIMIP, и наиболее современных гидрологических данных, выполнены оценки будущей продолжительности периода с ледовыми явлениями и ледостава.

Практическая значимость. Проведенная оценка момента нарушения однородности рядов данных о термическом и ледовом режимах актуальна для анализа

современной ситуации при проведении инженерно-гидрометеорологических изысканий и принятий конкретных управлеченческих решений. Показано, что рост температуры воды в летний период сравнительно мал и отстает от интенсивности роста температуры воздуха практически повсеместно.

Выявлены районы наибольших и наименьших изменений ледотермического режима, что дает возможность принять меры для снижения потенциальных негативных последствий. Данные об увеличении продолжительности сезона с положительными температурами воды могут быть использованы в экологических оценках развития флоры и фауны арктических рек, а данные об изменениях периодов замерзания и вскрытия рек могут использоваться для планирования хозяйственной деятельности и мероприятий по предотвращению опасных гидрологических явлений.

Построенные карты ледотермического режима могут применяться для гидрографических описаний в рамках инженерно-гидрометеорологических изысканий, а также в рамках разработок оценок воздействия на окружающую среду.

Основные защищаемые положения:

1. В последние 60 лет на реках российской Арктики выявлены статистически значимые тенденции потепления вод и сокращения периода с ледовыми явлениями, которые выражаются в существенном, до 2,5 К увеличении температуры воды в переходные сезоны, а также в смещении сроков формирования и исчезновения ледовых явлений на величину до 11 суток за последние 30 лет.

2. Тепловой сток рек устойчиво растет по всей российской Арктике, а антропогенное снижение теплового стока рек в середине XX в. за счет строительства водохранилищ скомпенсировано климатическими изменениями.

3. Недоучёт трансформации теплового стока в низовьях и устьевых областях рек приводит к завышению теплового стока в Северный Ледовитый океан с территории России на 4%, однако в отдельных устьевых областях разнонаправленные трансформации теплового стока могут составлять от +7–8% (Северная Двина, Печора) до –28% (Енисей).

4. В течение XXI в. ожидается сокращение периода с ледовыми явлениями на сроки до 2–3 месяцев, при значительно большем сокращении периода ледостава. Суммарная продолжительность периодов замерзания и вскрытия увеличивается в 2–3 раза уже к середине XXI в. и мало меняется при различных сценариях климатических изменений.

Степень достоверности и аprobация результатов. Автором значительно расширена существовавшая база данных о термическом режиме рек, продлена по времени существующая база данных о ледовом режиме рек. Весь статистический и картографический анализ, работы по районированию ледотермического режима и его изменений, обобщения материалов исследований, анализ факторов формирования ледотермического режима рек выполнен автором лично. Кроме того, автор принял участие в полевых работах на реках Печоре, Колыме, а также на многих реках бассейна Белого моря, материалы которых позволили внести ряд уточнений в данную работу. Сбор и обработка данных проводилась в рамках проектов РФФИ № 18-05-

60021 «Сток рек и изменение водного и ледотермического режима устьевых областей и морских побережий Российской Арктики в XXI в.); РНФ № 14-17-00155 «Параметризация характеристик речного стока для диагностики возникновения опасных гидрологических явлений и их экологических последствий» и № 24-17-00084 «Гидрологические последствия изменения климата и антропогенного воздействия в криолитозоне».

Результаты диссертационного исследования докладывались автором на конференциях памяти Ю.Б. Виноградова «Третьяи Виноградовские чтения. Границы гидрологии» (Санкт-Петербург, 28–30.03.2018), «Четвертые Виноградовские чтения. «Гидрология: от познания к мировоззрению» (Санкт-Петербург, 3–9.12.2020), «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен» (Санкт-Петербург, 9–13.10.2023), «Шестые Виноградовские чтения. Гидрология нового поколения» (Санкт-Петербург, 13–19.10.2025); на VIII и IX Международных научно-практических конференциях «Морские исследования и образование» «Maresedu–2019» (Москва, 28–31.10.2019) и «Maresedu–2020» (Москва, 24–31.10.2020); Международной конференции «Биомониторинг в Арктике» (Архангельск, 26–27.11.2018); Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации» (Санкт-Петербург, 13–16.03.2019); European Geosciences Union Assembly 2019 (Вена, Австрия 7–12.04.2019); III и IV Всероссийских конференциях «Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» имени Л.Н. Карлина (Санкт-Петербург, 18–19.12.2019, 16–17.12.2020); Всероссийской научной конференции «Моря России: исследования береговой и шельфовой зон» (XXVIII Береговая конференция) (Севастополь, 21–25.09.2020); международном научном онлайн-семинаре «Research challenges of Arctic and Subarctic ecosystems under globalization of natural and social processes» (Салехард (онлайн) 21.09.2021); 4th International conference on the status and future of the world's large rivers (Москва (онлайн) 3–6.08.2021); Всероссийской конференции с международным участием «Динамика и взаимодействия геосфер Земли» (Томск, 8–11.11.2021); Международном симпозиуме «Связь климатических изменений с изменениями биологического и ландшафтного разнообразия Арктики и Субарктики» (Салехард (онлайн) 2–3.12.2021); IV Международном симпозиуме «Науки о Земле: история, современные проблемы и перспективы» (Москва (онлайн) 21.04.2022), VIII Объединенном метеорологическом и гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 31.10.2024), Всероссийской с международным участием конференции «Водные и экологические проблемы Обь-Иртышского бассейна: новые вызовы, передовые решения» (Ханты-Мансийск, 15.11.2024), V международной научной конференции «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (г. Барнаул, 09.09.2025).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические науки).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 201 источника. Работа изложена на 149 страницах текста, включает 54 рисунка и 30 таблиц. Список литературы включает 107 работ на русском языке и 88 работы на иностранном, а также 6 Интернет-источников.

Благодарности. Автор выражает благодарность сотрудникам кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за всестороннюю помошь в полевых и камеральных работах и дружескую поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, указана степень её разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризована научная новизна и практическая значимость диссертации, представлены основные защищаемые положения, указана степень достоверности и апробация результатов.

Глава 1. Общая географическая характеристика исследуемого региона

В разделе 1.1 рассмотрены варианты выделения южной границы исследования. В качестве северной границы принята береговая линия Северного Ледовитого океана в связи с отсутствием гидрологических наблюдений на островах. Граница Арктической зоны России установлена законодательно [Указ Президента РФ..., 2017]. Административные границы не согласуются ни с природными (северная граница леса), ни с климатическими (среднегодовая изотерма, равная 0°C), и не включают большую часть бассейнов рек, впадающих в моря Северного Ледовитого океана. Поэтому, в данной работе за южную границу исследований принята 60° с.ш. на территории РФ. Эта территория в дальнейшем обозначается как российская Арктика. В разделе приводятся сведения о физико-географических странах в пределах этой территории [Макунина, 1985], соответствии данных физико-географических стран гидрографическим регионам, степени распространения многолетнемёрзлых пород (ММП), мелкомасштабным гидрологическим характеристикам, гидрологической изученности. К исследуемой территории полностью или частично относятся следующие гидрографические районы (в соответствие с Государственным водным кадастром): Кольский полуостров, Карелия, Север ЕТР, Западная Сибирь (до бассейна Енисея), Енисей (бассейны Енисея, Пясины и Таймыры), Лена (восточнее региона Енисей до бассейна Колымы), Северо-Восток (бассейны Колымы, Анадыря и рек Чукотки).

Наблюдениями не освещены восточная и центральная части Кольского полуострова, практически отсутствуют наблюдения в средних течениях рек Карелии, нет наблюдений на полуострове Канин нос, в междуречье Печоры и Мезени, в северной части Большеземельской Тундры, Пай-Хое, Уральских горах, полуостровах Ямал, Гыдан и Таймыр, на малых и большинстве средних рек Северо-Сибирской низменности; слабо освещены наблюдениями реки Яно-Индигирской и Колымской низменностей, практически не освещены наблюдениями реки Чукотки.

В Европейском секторе рассматриваемой территории ММП в бассейнах с гидрологическими наблюдениями встречаются только на правобережье Печоры. На территории Западно-Сибирской равнины ММП имеют несплошное распространение, однако занимают более 50% территории. Восточнее же преобладает практически сплошное распространение ММП. В гидрогеологическом отношении большая часть рассматриваемой территории относится к складчатым зонам с вертикальными потоками подземных вод по системам разломов. К артезианским бассейнам относятся только северные части Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин. Восточнее Енисея на реках, как минимум средних, распространены подрусловые талики различных типов.

В **разделе 1.2** описываются особенности формирования климата, в первую очередь температуры воздуха изучаемой территории в условиях существования полярной ночи и полярного дня, и особенностей взаимодействия воздушных масс Арктики с воздушными массами умеренных широт. Отмечено, что во все сезоны, кроме зимнего, после 1976 г. наблюдается рост температуры воздуха, усиливающийся с юга на север и с запада на восток. Наибольшие изменения наблюдаются на приморских равнинах российской Арктики. Интенсивность изменений достигает $1,2^{\circ}\text{C}/10$ лет. В период 2012–2022 гг. пространственное распределение величин трендов стало более однородным. По данным реанализа ERA5 оценены изменения температуры воздуха в окрестностях гидрологических постов для отдельных месяцев года. Наиболее значительные изменения температуры воздуха первой половины года отмечаются в марте–апреле и в июне. Наибольшие изменения характерны для низменных территорий Западно-Сибирской равнины, низовий Енисея, Северо-Сибирской низменности, Яно-Индигирской и Колымской низменностей. Отметим, что в летний период минимальные изменения выявлены на севере ЕТР и в горной части Северо-Востока.

В **разделе 1.3** приводится история исследований ледового и термического режимов рек в пределах выделенной территории. Показана недостаточная изученность режима температуры воды в реках как на региональном, так и на макрорегиональном уровнях. Для всех характеристик ледотермического режима отсутствуют наиболее современные данные для описания режима и многолетних изменений.

Глава 2. Материалы и методы

В **разделе 2.1** описываются источники данных о прибрежной температуре воды и ледовых явлениях на гидрологических постах («Гидрологические ежегодники»), о прибрежной температуре воды на морских гидрологических станциях в пределах устьевых областей рек (Портал «ЕСИМО»), реанализа ERA5 [<https://cds.climate.copernicus.eu/>]. Описываются методики наблюдения и первичной обработки (до опубликования) данных наблюдений за температурой воды и ледовыми явлениями. Отмечено, что температура воды можетискажаться местными факторами (притоками, влиянием грунтовых вод), а полнота описания ледовых явлений менялась

со временем. Тем не менее, в продолжительных рядах наблюдений возможно выявить тенденции, обусловленные внешними климатическими факторами.

В разделе 2.2 формулируются принципы отбора исходных данных. Для температуры воды была выбрана месячная дискретность данных, поскольку на этом уровне ведущими факторами её формирования являются климатические [Garner, Hannah, 2015]. Среди характеристик ледового режима были отобраны характерные фенологические сроки ледового режима: появления льда, установления ледостава, начала ледохода и очищения ото льда. Период времени для анализа был принят 1961–2021 гг., так в 50-е годы прошлого века проведён ряд оценок репрезентативности наблюдений, приведший к смене участков наблюдений на постах.

С учётом произошедшего в конце XX – начале XXI вв. уменьшения количества гидрологических постов и значительных пропусков в данных в 90-е годы XX в. в работе использовались только те гидрологические посты, на которых для каждой характеристики ледового или термического режима хотя бы существует пять лет наблюдений в период 1991–2000 и 2001–2010 гг., а также не менее, чем 10 лет с наблюдениями в периоды 1961–1990 и 1991–2021 гг.

В работе использовались только те гидрологические посты, на которых всем описанным выше требованиям удовлетворяли ряды температуры воды за каждый месяц с мая по октябрь включительно и/или все ряды сроков наступления фаз ледового режима. Всего для анализа используются данные наблюдений с 319 гидрологических постов, среди них 287 гидрологических постов с данными наблюдений за температурой воды и 144 поста с данными о ледовых явлениях (рис. 1).

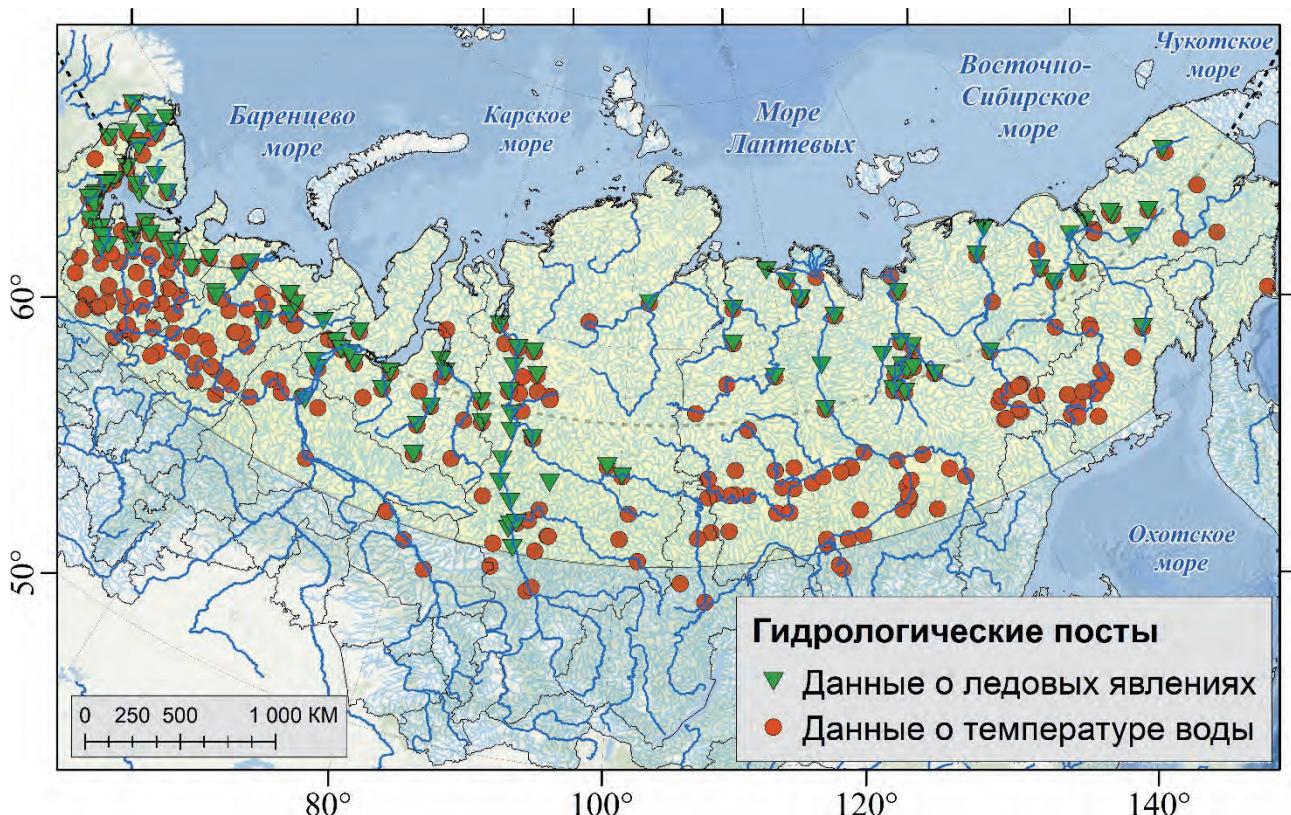


Рисунок 1 – Выбранные для исследования гидрологические посты

Для 90 гидрологических постов имелись данные как по характеристикам ледовых явлений, так и по температуре воды.

В разделе 2.3 описаны методы обработки гидрометеорологической информации. В работе использовались три основных метода оценки изменений ледотермического режима рек (уровень значимости всех тестов составлял 5%):

- 1) выявление статистически значимого линейного тренда в рядах наблюдений;
- 2) выявление нарушений однородности с помощью теста Манна–Уитни относительно переломных лет (по Буишанду);
- 3) сравнение средних значений температуры воды за условно современный и предшествующий базовый период времени.

Дополнительно было проведён анализ относительно 30-летних периодов до и после 1990 г., показано, что после переломных лет выявляется большее количество случаев нарушения однородности рядов рассматриваемых характеристик. Это первая подобная оценка в России и первый столь массовый анализ рядов ледотермического режима относительно переломных лет.

В связи со сравнительно малыми длинами рядов различия средних за отдельные периоды уточнялись с использованием стандартной ошибки среднего арифметического.

В разделе 2.4 описаны принципы оценок будущего ледотермического режима рек. В качестве предиктантов используются продолжительности периода с ледовыми явлениями и периода ледостава, а в качестве предикторов – количество дней с отрицательной температурой воздуха и сумма отрицательных температур воздуха в период с октября по май. Данные для каждого гидрологического поста и ближайшего узла реанализа ERA5 осреднялись 10-летним скользящим средним, затем для всех гидрологических постов оценивались регрессионные зависимости: линейная с каждым из предикторов, двумерная линейная регрессия по обоим предикторам, полиномиальная (2 степени) зависимость с каждым из предикторов. Полученные уравнения с высокими коэффициентами детерминации ($R^2 > 0,7$) использовались для оценок будущих характеристик.

В качестве будущих метеорологических параметров использовались модели GFDL-ESM4 (США), IPSL-CM6A-LR (Франция), MRI ESM2-0 (Япония) и UKESM1-0-LL (Великобритания), рекомендованные в рамках проекта ISIMIP (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project) для оценки будущих гидрологических характеристик на глобальном уровне. Пятая модель MPI-ESM1-2-HR (Германия), рекомендованная в данном проекте, продемонстрировала неудовлетворительные результаты и была исключена. Были использованы сценарии SSP126 («мягкий») и SSP585 («жёсткий») проекта CMIP6. Оценки были даны на 2031–2060 гг. и 2071–2100 гг.

Для каждого полученного уравнения выполнялись расчёты с использованием данных четырёх моделей. Для обеих рассматриваемых характеристик в периоды 2031–2060 гг. и 2071–2100 гг. результаты расчётов осреднялись. В данной диссертации приведена первая оценка будущего ледотермического режима рек российской

Арктики с использованием комплекса моделей ISIMIP и результатов эксперимента CMIP6.

Глава 3. Современные характеристики и многолетняя изменчивость ледотермического режима рек

В разделе 3.1 описаны результаты выделения переломных лет в рядах выбранных характеристик ледотермического режима рек. Переломные годы сроков начала ледохода на реках в отдельных регионах Арктической зоны приходятся в среднем на 1981–1999 гг., а сроков очищения ото льда – на 1985–2000 гг. В период вскрытия переломные годы произошли раньше, чем в период замерзания во всех регионах, кроме Ленского и Енисейского. Наиболее поздние переломные годы отмечаются в низовьях Енисея, а также на реках Ленского региона. Обращают на себя внимание различия переломных лет температуры воды в отдельные месяцы. Раньше всего изменения произошли в летние (календарные) месяцы, в основном для рек со сравнительно большой водоносностью. Изменения температуры воды в период открытого русла произошли раньше всего на Кольском полуострове и на Севере ЕТР, несколько позже – на Северо-Востоке. Переломные годы рядов температуры воды наступили в близкие сроки на малых, средних и больших реках, что соответственно определяется в значительной мере географическими факторами. Наиболее ранние сроки характерны для рек горных районов. В мае–августе изменения произошли преимущественно в период 1991–2000 гг., в сентябре и октябре – в период 2001–2010 гг. Условия после переломных лет приняты в этой работе как современные, поскольку переломные годы ассоциируются с нарушением стационарности и однородности рядов. Современные характеристики сроков весенних ледовых явлений приведены на рис. 2.

Температура воды в период нагрева (май–июнь) подчиняется в основном законам широтной зональности, которая, однако, нарушается в горных регионах. Наиболее низкие температуры в эти месяцы наблюдаются в верхнем течении Печоры, при впадении множества малых горных притоков, не освещённых наблюдениями; на малых реках южной части бассейна Онеги, а в июне ещё и в верховьях Нижней Тунгуски, Индигирки и Анадыря, что может быть связано с широким распространением наледей. В июле–августе среднемесячная температура воды достигает в отдельные годы 20°C и более. При этом, сравнительно низкая, до 10°C температура воды может наблюдаться на реках горных районов, а также на отдельных водотоках в бассейнах Онеги и Нижней Тунгуски. В сентябре–октябре зональное пространственное распределение температуры сменяется меридиональным. Раннее остывание воды наблюдается на малых реках бассейнов Северной Двины, Мезени, Печоры, а также в бассейне Пура. Пространственное распределение характеристик температуры воды приведено на рис. 3.

Сроки появления льда и установления ледостава на реках российской Арктики достаточно тесно связаны (коэффициент корреляции Пирсона $r > 0,72$) с температурой воды в сентябре и преимущественно в октябре. Появление льда на реках начинается в первую декаду октября в горных районах Сибири, на Западно-Сибирской равнине и в

Уральских горах ледообразование начинается во второй декаде октября (рис. 4). В равнинной части бассейна Печоры, в бассейне Мезени и в низовьях Кулоя появление льда происходит в основном в последней декаде октября. При этом для Пинеги, которая, как и Кулой, протекает через карстовое Беломорско-Кулойское плато, характерно более позднее ледообразование. В бассейне Северной Двины ледообразование происходит в среднем в первой декаде ноября, равно как и на большей части Кольского полуострова, без учёта малых рек юго-западной его части.

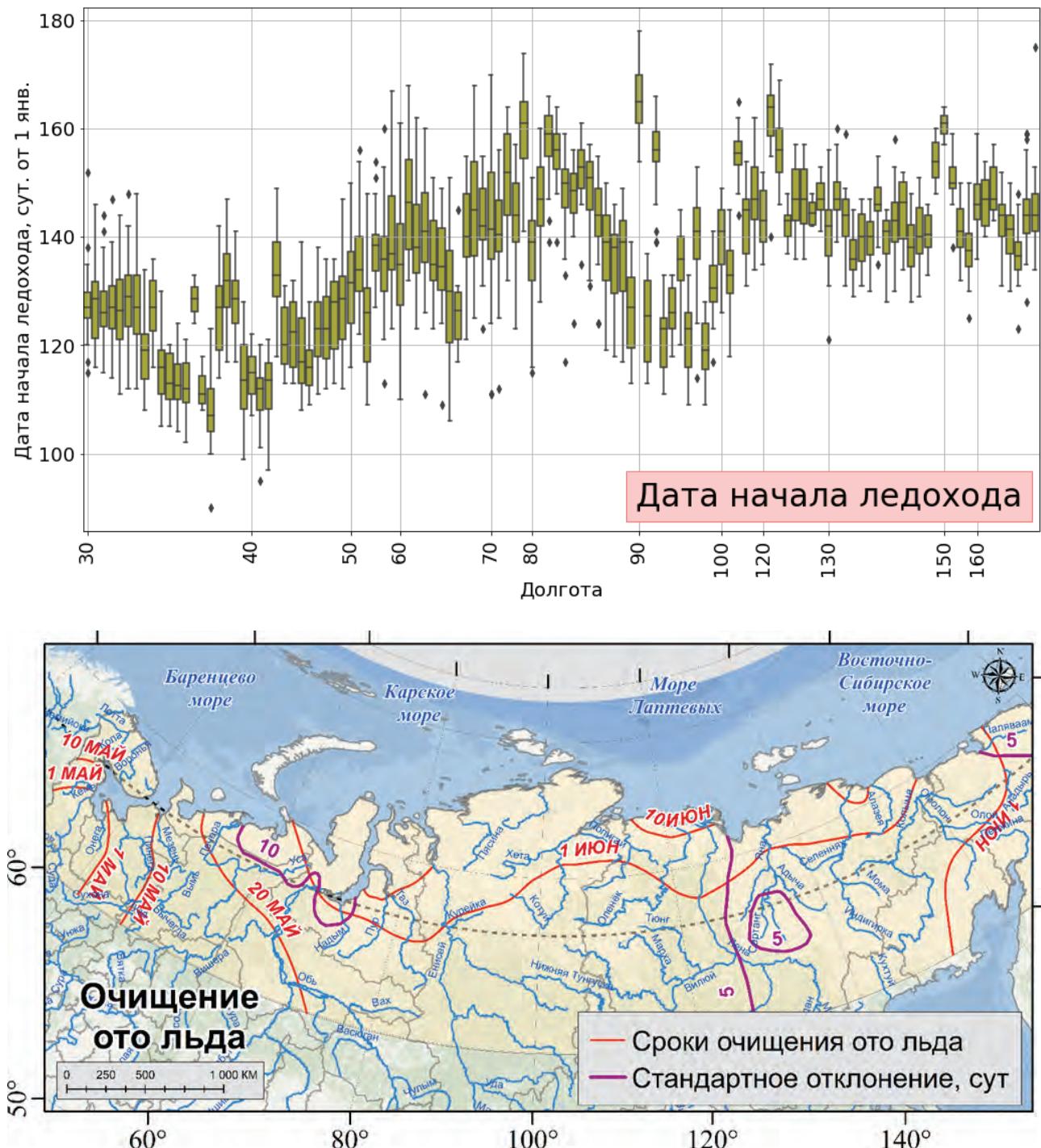


Рисунок 2 – Распределение 3 квартилей (0,25 – 0,5 – 0,75), величины 1,5 интерквартильного размаха, а также выбросов сроков начала ледохода по долготе (сверху) и современные характеристики сроков очищения ото льда (снизу)

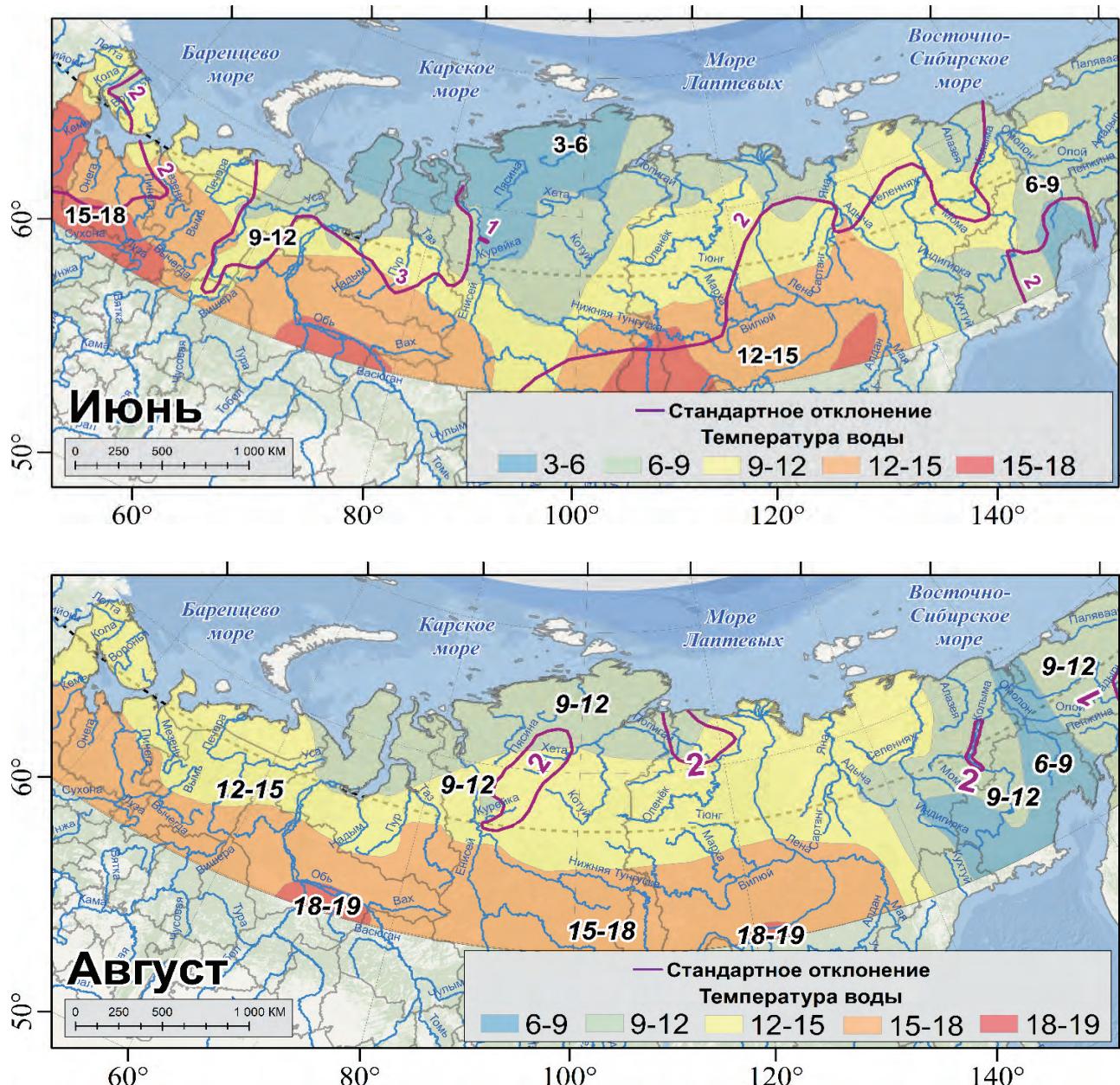


Рисунок 3 – Пространственное распределение характеристик термического режима рек в отдельные месяцы тёплого периода года

Выявлено, что среднемесячная температура воздуха не имеет тесной линейной связи с характеристиками ледовых явлений в горных районах Сибири и с температурой воды в период половодья и в период замерзания рек.

В разделе 3.2 показано, что статистически значимые тренды рассматриваемых характеристик ледотермического режима рек выявлены в основном для многолетнего периода 1961–2021 гг., после переломных лет значимых трендов практически нет. Наибольшее число значимых трендов приходится на характеристики сроков ледового режима, а также на температуру воды в период нагрева (май–июнь) и остывания (сентябрь–октябрь). Несколько больший процент значимых трендов наблюдается на средних и больших реках по сравнению с малыми. Статистически значимым трендам сроков начала ледохода и/или очищения ото льда практически во всех случаях

соответствуют статистически значимые тренды температуры воды в мае или июне. В осенний период статистически значимым трендам температуры воды в сентябре и октябре на 89% рассматриваемых постов в обеих базах данных соответствуют значимые тренды сроков появления льда и/или установления ледостава (табл. 1).

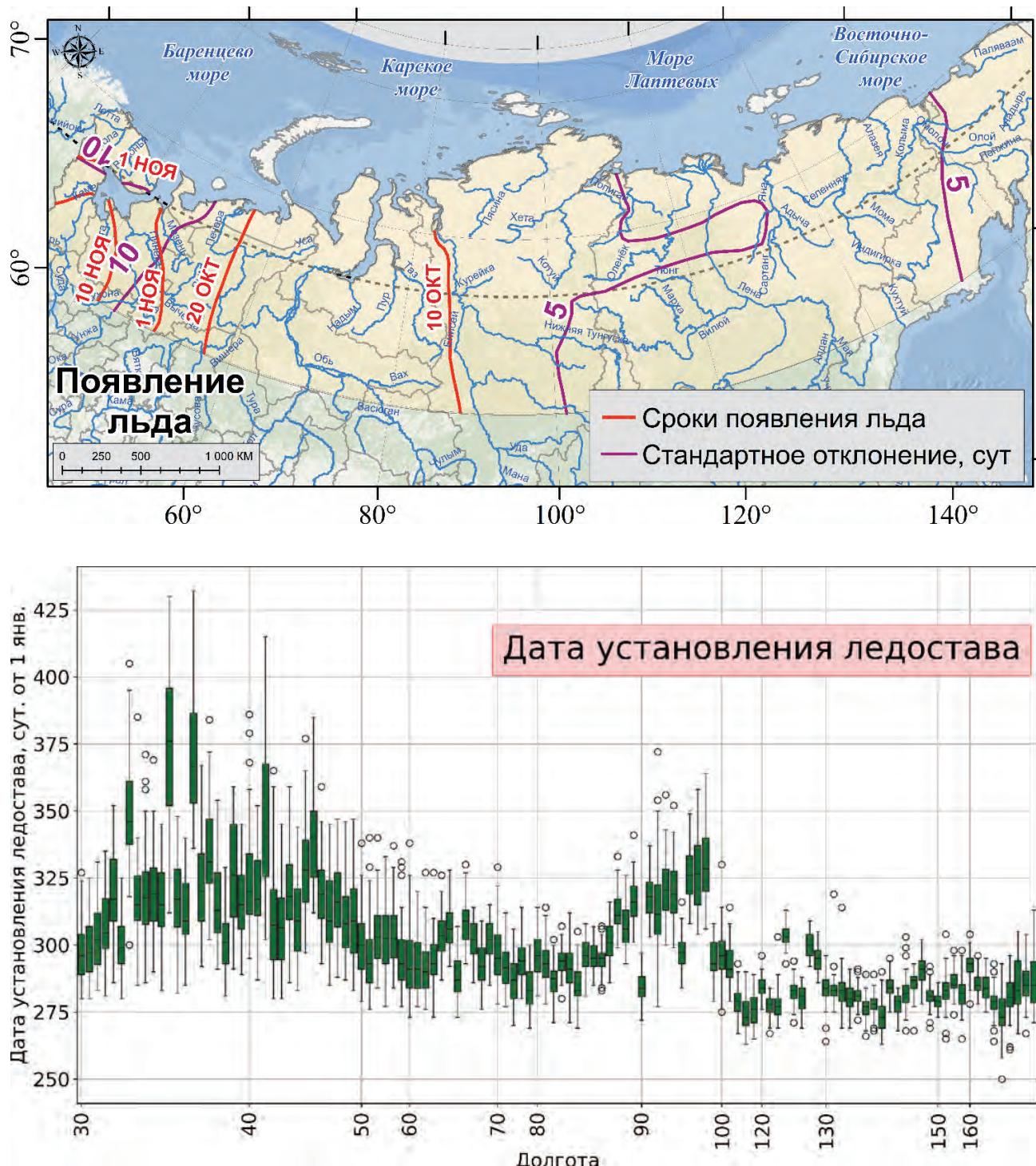


Рисунок 4 – Современные характеристики сроков очищения от льда (верхний ряд) и распределение 3 квартилей (0,25 – 0,5 – 0,75), величины 1,5 интерквартильного размаха, а также выбросов сроков установления ледостава по долготе

Таблица 1 – Процент гидрологических постов со статистически значимыми трендами характеристик ледотермического режима за период 1961–2021 гг.

| Регион | Сроки | | Температура воды | | | | | | Сроки | |
|-----------------------|-----------------|-------------------|------------------|------|------|--------|----------|---------|----------------|------------------------|
| | Начала ледохода | Очищения ото льда | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Появления льда | Установления ледостава |
| Северо-Восток | 75 | 83 | 50 | 37 | 33 | 40 | 57 | 67 | 75 | 83 |
| Лена | 73 | 91 | 74 | 69 | 42 | 20 | 35 | 31 | 56 | 81 |
| Енисей | 52 | 39 | 62 | 70 | 46 | 19 | 14 | 54 | 82 | 73 |
| Север Западной Сибири | 88 | 75 | 83 | 83 | 10 | 23 | 50 | 60 | 94 | 81 |
| Северный край | 73 | 55 | 59 | 29 | 12 | 26 | 62 | 70 | 87 | 65 |
| Карелия | 41 | 67 | 92 | 33 | 17 | 42 | 92 | 75 | 91 | 36 |
| Кольский полуостров | 33 | 42 | 90 | 80 | 30 | 50 | 90 | 50 | 100 | 33 |

Для средней месячной температуры воды характерны возрастающие тренды. Для характеристик ледовых явлений характерны тренды смещения осенних сроков на более поздние, а весенних сроков на более ранние. В Восточной Сибири, в особенности на Колыме могут наблюдаться значимые тренды охлаждения вод в летний период.

Величины изменений характеристик ледотермического режима рек в большинстве случаев сравнительно невелики. Сроки начала весеннего ледохода и очищения ото льда сместились на большинстве рек на более ранние до 10 суток после переломных лет. Большие величины изменений характерны для равнин западнее Енисея и приморских низменностей моря Лаптевых, а меньшие (до 5 суток) – для горных рек дальневосточной части рассматриваемой территории (рис. 5).

Относительно переломных лет для характеристик ледотермического режима более, чем в 65% случаев выявлено нарушение однородности критерием Манна–Уитни (U-тест). Переломные годы сами по себе ассоциируются с нарушением однородности рядов, и результаты U-теста подтверждают значимость выявленных изменений характеристик ледотермического режима рек.

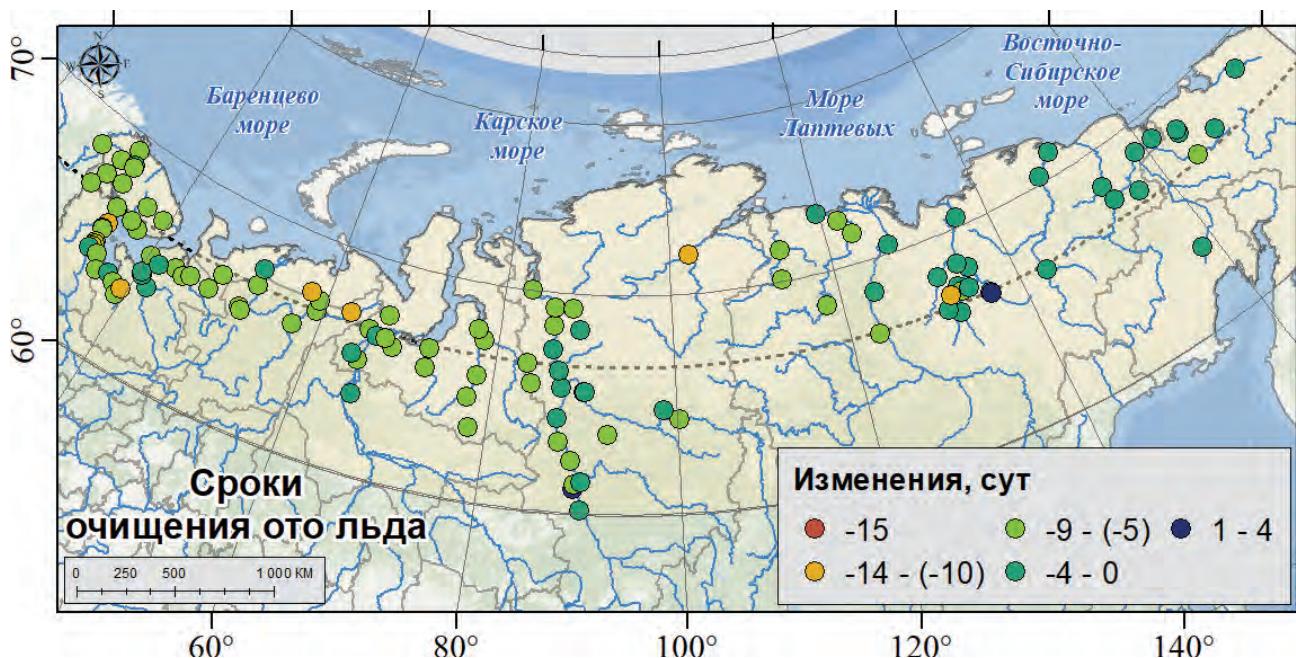


Рисунок 5 – Изменения сроков очищения ото льда относительно переломных лет

Наблюдаемые изменения температуры воды имеют значительную величину в мае–июне, в период половодья на реках. Наибольшие изменения наблюдаются до 2,5 К в бассейнах Пура и Таза. Сходные изменения наблюдаются в сентябре–октябре на Кольском полуострове и в Карелии, однако реки этого района в основном протекают через озёра, в других районах российской Арктики изменения температуры в сентябре–октябре выше, чем в июле–августе, но ниже, чем в мае–июне. Минимальные изменения выявлены в июле–августе, более того, в соответствие с ранее отмеченными отрицательными трендами наблюдается снижение температуры воды в среднем и нижнем течении Колымы.

Величина изменений снижается восточнее бассейнов Оби и Таза. Наиболее значительные изменения наблюдаются на реках с площадью водосбора менее 10 000 км². На реках, вытекающих из озёр, в июне изменения могут достигать 4–4,5 К (рис. 6). Стоит отметить, что величина изменений на большинстве рек не превышает 1 К во все месяцы тёплого периода года.

Величины изменений осенних характеристик ледотермического режима рек в многолетнем разрезе в большинстве случаев сравнительно невелики. Сроки появления льда и установления ледостава сместились на более поздние на большинстве рек на величины до 10–15 суток. Большие величины изменений характерны для равнин западнее Енисея и приморских низменностей моря Лаптевых, меньшие (до 5 суток) – для горных рек дальневосточной части рассматриваемой территории (рис. 7).

Наибольшие изменения характерны для рек, вытекающих из озёр и протекающих через озёра, а также для рек карстовой области Беломорско-Кулойского плато. Отметим, что на соседних участках больших рек могут наблюдаться различные величины изменений, но эти различия невелики – от одних до трёх суток.

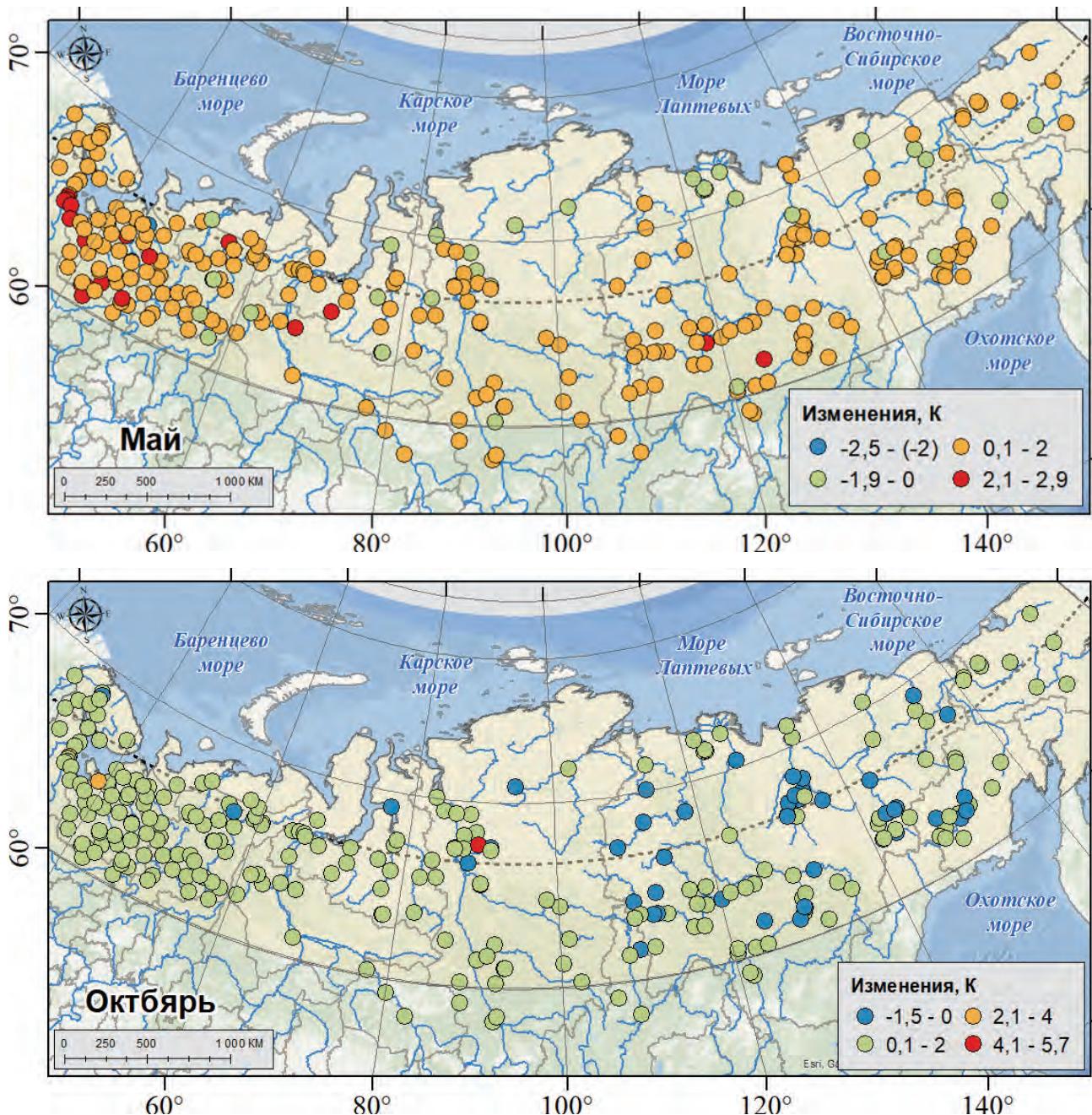


Рисунок 6 – Изменения температуры воды в мае (сверху) и октябре (снизу)

Сопоставление полученных нами оценок изменения характеристик ледотермического режима рек с ранее полученными в иных научных работах показало, что интенсивность изменений температуры воды в российской Арктике на порядок выше, чем в расположенных южнее регионах Прибалтики, Центральной Европы. В горных районах Китая может наблюдаться интенсивность изменений температуры воды, близкая к таковой в горных районах Азиатского сектора российской Арктики. При этом скорость изменений характеристик ледового режима рек близка к средней по Северному полушарию. Для отдельных районов и локальных участков показано, что величины изменений характеристик ледотермического режима рек после переломных лет превышают таковые для других временных периодов, к примеру: после 1990 или после 1976 г.

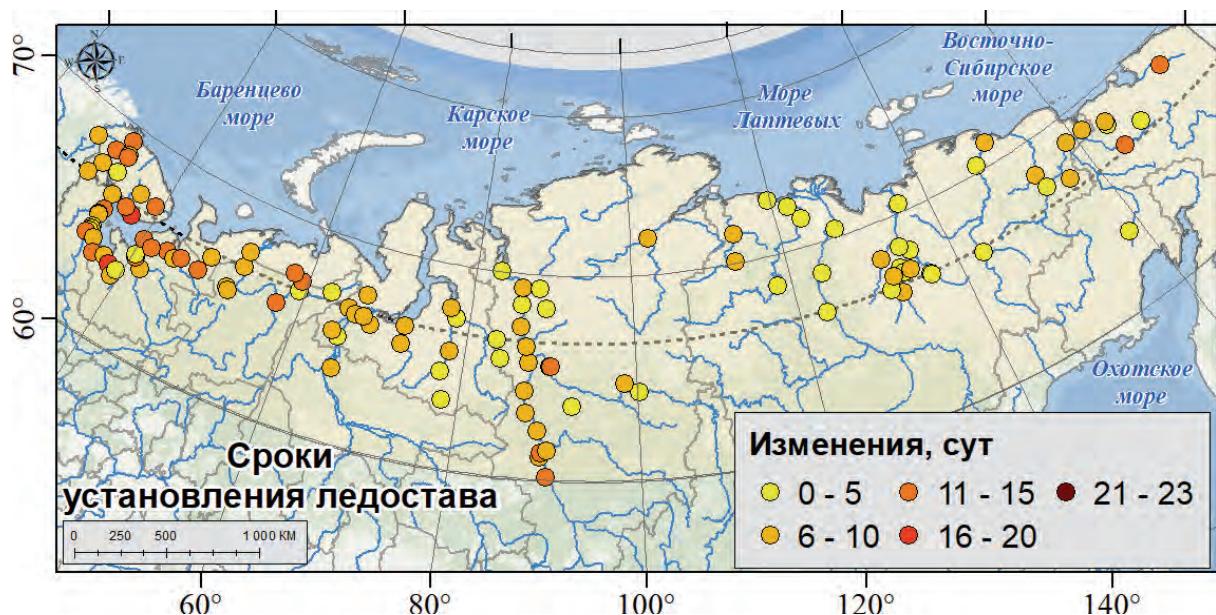


Рисунок 7 – Изменения сроков установления ледостава относительно переломных лет

Глава 4. Современные характеристики и многолетняя изменчивость теплового стока рек

В разделе 4.1 показано, что суммарный приток тепла к устьевым областям рек по данным многолетних наблюдений (1981–2022 гг.) составляет как минимум 62,7 ЭДж/год. Из этой величины 76,6% приносится реками Обь, Лена и Енисей. Известно, что погрешность вычисления величины теплового стока Лены из-за искажения температуры воды притоками на участке замыкающего гидрологического поста (г/п) Кюсюр составляет $\pm 3,4$ ЭДж/год [Tananaev et al., 2019]. Тепловой сток Колымы вычислен по данным г/п Колымское, поскольку температура воды искажена в замыкающем створе по наблюдениям автора [Магрицкий и др., 2022]. Тепловой сток Оленёка вычислен по данным о температуре воды г/п Таймылыр, и стоку воды г/п 7,5 км ниже устья р. Буур. Тепловой сток р. Печоры вычислен для г/п Усть-Цильма, т.к. замыкающий г/п Оксино находится в затоне с широкой отмелью. Тепловой сток Индигирки принят средним за период 1981–1996 гг. (рис. 8).

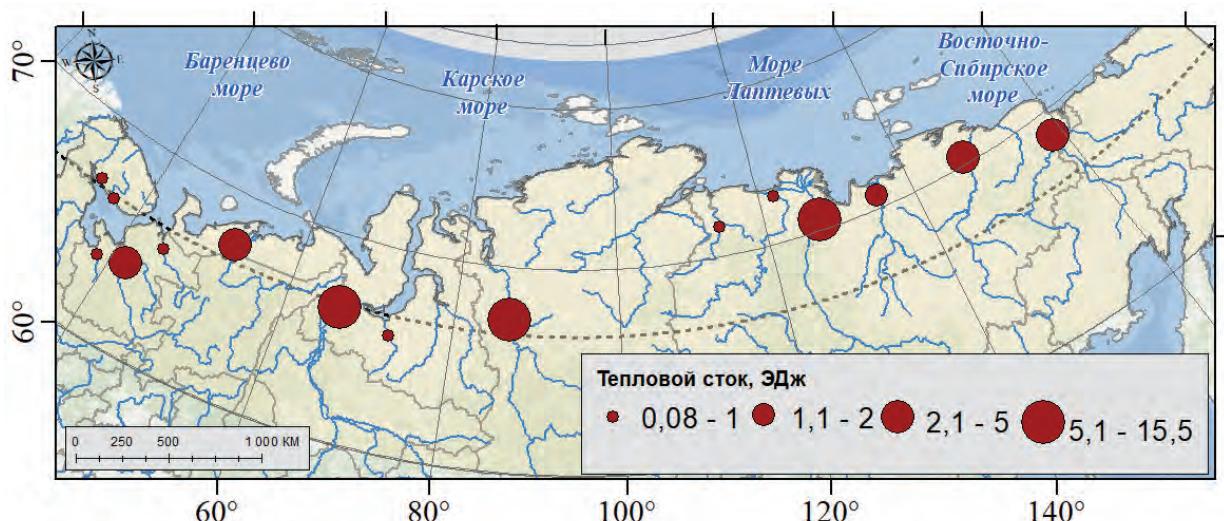


Рисунок 8 – Тепловой сток рек российской Арктики ($> 0,08$ ЭДж/год)

Тепловой сток большинства рассматриваемых рек в последние 15–20 лет растет относительно предшествующего (до переломного года) периода, с наибольшим увеличением на Северо-Востоке и на западном побережье Белого моря. Рост величин притока тепла к устьевым областям достигает 10–25%, в отдельных случаях – 73% (табл. 2).

Таблица 2 – Абсолютное и относительное изменение теплового стока и наличие значимого тренда теплового стока на реках российской Арктики после переломного года, без учёта рядов короче 10 лет после переломного года

| Река – Пост | Δ, ЭДж/год | Δ, % | Наличие значимого тренда |
|------------------------------------|------------|------|--------------------------|
| р. Яна – ст.Юбилейная | 0,3 | +26 | Возрастающий |
| р. Лена – с. Кюсюр | 1,8 | +12 | Нет |
| р. Оленёк – с. Таймырыр | 0,2 | +29 | Нет |
| р. Анабар – с. Саскылах | 0,1 | +32 | Возрастающий |
| р. Енисей – г. Игарка | 2,5 | +18 | Возрастающий |
| р. Надым – г. Надым | -0,02 | -6 | Нет |
| р. Обь – г. Салехард | 2,1 | +16 | Нет |
| р. Печора – с. Усть-Цильма | 0,2 | +6 | Нет |
| р. Мезень – с. Дорогорское | 0,04 | +7 | Нет |
| р. Северная Двина – с. Усть-Пинега | 0,4 | +17 | Возрастающий |
| р. Малошуйка – пос. Малошуйка | 0,00 | -18 | Нет |
| р. Сума – с. Сумский посад | 0,00 | +73 | Возрастающий |
| р. Шуя – с. Шуерецкое | 0,00 | +25 | Нет |
| р. Кузема – пос. Кузема | 0,01 | +12 | Нет |
| р. Умба – пор. Паялка | 0,02 | +24 | Возрастающий |
| р. Варзуга – с. Варзуга | 0,01 | +14 | Нет |
| р. Поной – с. Каневка | 0,00 | +2 | Нет |

В первую очередь увеличился тепловой сток в июне, что обусловлено ростом температуры воды. Значительно вырос тепловой сток мая и октября, одновременно с удлинением периода с температурой воды выше 0°C, и повышением температуры воды переходных сезонов. Значимость роли отдельных факторов формирования теплового стока не является постоянной, в последние 15–20 лет увеличилась роль температуры воды в мае–июне и октябре. Также меняется роль стока воды в летний период, но в многолетнем разрезе ведущим фактором формирования теплового стока рассматриваемых рек является сток воды.

В разделе 4.2 проводится сравнение среднемесячной температуры воды на реках ниже водохранилищ (1936–2021 гг.) в период до строительства ГЭС и после ввода в эксплуатацию каждой последующей ГЭС, а также в период до строительства ГЭС и в период 1991–2021 гг. Во все рассматриваемые периоды времени также проводится сравнение изменений температуры воздуха и воды относительно периода до гидротехнического освоения бассейнов. Показано, что строительство ГЭС привело к снижению летней температуры воды (июль–август) и росту температуры в весенний и осенний периоды, причём степень изменения температуры воды снижается с запада

на восток. Дальность изменения температуры воды ограничивается на реках первыми 500–1000 км от плотины, при этом температура воды в среднем на реках повышается и на ряде рек становится сопоставимой с таковой до начала климатических изменений и гидротехнического освоения рек.

Значительную роль во вдольреческих изменениях температуры воды играет тепловой сток притоков. Важным исключением является Енисей, на котором наблюдается снижение температуры воды при гидротехническом освоении бассейна, как минимум в силу большего количества водохранилищ в бассейне. В бассейнах рек, большая часть водохранилищ на которых имеет поверхностные водосбросы, происходит рост температуры воды в мае–июне, что связано помимо глубины расположения водосброса также с морфометрическими особенностями водохранилищ и особенностями регулирования стока. Отметим также, что воздействие на температуру воды начинается уже на стадии строительства ГЭС.

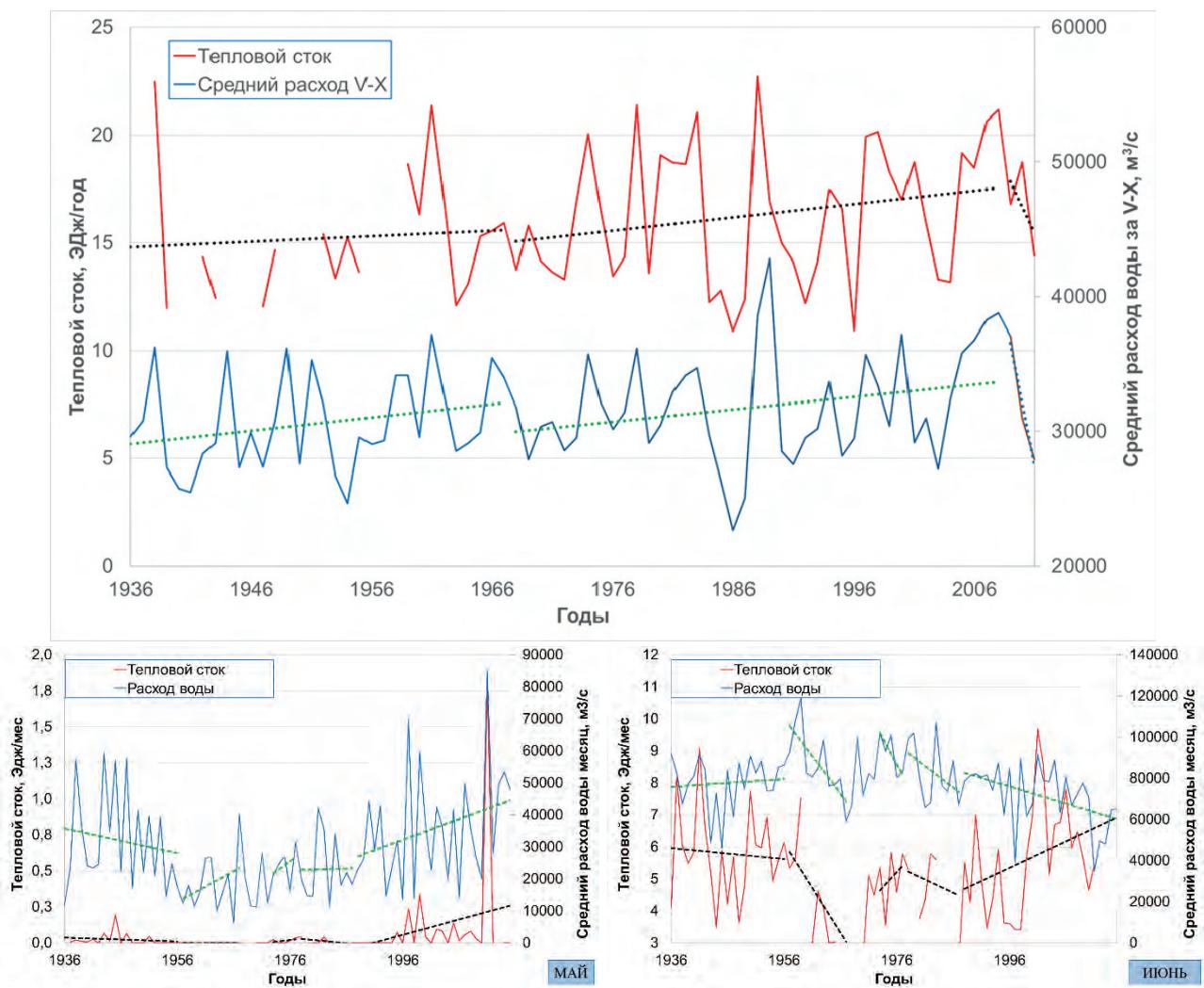


Рисунок 9 – Многолетний ход годового теплового стока и средних расходов воды на гидрологическом посту р. Лена – г/п Кюсюр за период с мая по октябрь (верхний ряд); многолетний ход месячного теплового стока и средних расходов воды за месяц на гидрологическом посту р. Енисей – г. Игарка. Цветными точечными линиями показаны тренды в периоды до гидротехнического освоения бассейнов и в отдельные периоды его гидротехнического освоения (нижний ряд)

Тепловой сток в низовьях крупнейших арктических рек меняется в соответствии с изменениями стока воды, при этом на Оби и Колыме значительно растёт тепловой сток июня, что на Оби связано с климатообусловленным ростом температуры воды, а на Колыме - со строительством ГЭС. Годовой тепловой сток зарегулированных рек в современный период времени сопоставим с таковым до гидротехнического освоения бассейнов арктических рек, т.е. вызванное строительством ГЭС снижение теплового стока рек сивелировано происходящими климатическими изменениями (рис. 9).

Полученные в нашей работе результаты сопоставимы с полученными ранее другими авторами по рядам данных до 2007–2010 гг., до ввода в эксплуатацию ряда новых водохранилищ, оценками изменения теплового стока крупнейших рек в их низовьях.

Глава 5. Трансформации термического режима в устьевых областях рек

В разделе 5.1 показано, что температура воды в приливных эстуариях Онеги и Мезени в течение безлёдного периода незначительно (в пределах 1°C) снижается от вершины эстуария к морю, при этом с ростом величины прилива выравнивание температуры воды в эстуариях происходит быстрее. Тепловой сток в устьевых областях рек данного типа практически не меняется внутри устьевой области (УОР).

В дельтах Северной Двины и Печоры наблюдается постепенный рост температуры воды в дельтовых рукавах по сравнению с низовьями реки, при этом в переходные месяцы отмечается искажение температуры воды на замыкающем створе Северной Двины относительно вершины дельты из-за влияния Пинеги. Рост температуры воды в дельтовых рукавах происходит в основном благодаря снижению водности каждого из них, но может наблюдаться и охлаждение воды в силу затенения большого количества мелких проток дельты. В дельте Печоры значительного снижения температуры воды на пунктах измерений не отмечено, но потенциально возможно при таянии ММП, что было отмечено при полевых работах с участием автора на Колыме [Магрицкий и др., 2022]. Пересчёт теплового стока с учётом данных о распределении стока воды по рукавам дельт показал, что тепловой сток обеих рек занижен на 7–8%.

В разделе 5.2 описываются менее изученные устьевые области рек азиатской части страны. Показано, что тепловой сток Оби незначительно увеличивается к устьевому створу, благодаря впадению относительно теплых сравнительно небольших судоходных проток. Тепловой сток Енисея же значительно завышен на г/п Игарка. Пересчёт теплового стока без данных о стоке р. Хантайка показал величину завышения на 28%. Тепловой сток в устьевых областях рек моря Лаптевых трансформируется достаточно слабо, однако, данных для подтверждения данного тезиса недостаточно. Полевые работы в устье Колымы показали, что как минимум в летний сезон при антициклональной погоде возможен как значительный нагрев прибрежных вод притоками, так и охлаждение при прохождении циклонов, а также при поступлении талых вод ММП. При этом температура воды вниз по достаточно протяжённым дельтовым рукавам снижается.

Глава 6. Оценка будущих характеристик ледотермического режима рек

Среди различных характеристик ледотермического режима рек для сверхдолгосрочных оценок в данной работе выбраны продолжительность периода с ледовыми явлениями и продолжительность ледостава. Основой для оценок стала устойчивая связь предиктантов с суммой отрицательной температуры воздуха и продолжительностью периода с отрицательной температурой воздуха за период с октября по май. Для каждого полученного уравнения выполнялись расчёты с использованием данных каждой климатической модели. Для обеих рассматриваемых характеристик в каждый период (2031–2060 гг. и 2071–2100 гг.) результаты расчётов осреднялись. В данной диссертации приведена первая оценка потенциального будущего ледотермического режима рек российской Арктики с использованием комплекса моделей ISIMIP и результатов эксперимента СМИР6.

Результаты оценок будущего ледотермического режима показывают при обоих рассмотренных сценариях (SSP 126 и SSP 585) для двух периодов в будущем (2031–2060 гг. и 2071–2100 гг.): а) сокращение периода с ледовыми явлениями и ледостава практически на всех рассмотренных участках рек; б) более значительное сокращение периода ледостава по сравнению с сокращением периода с ледовыми явлениями.

При «мягком» сценарии изменений в середине XXI в. ожидается сокращение периода ледостава на сроки от 3 до 58 суток, при изменениях периода с ледовыми явлениями на величины от +7 до –34 суток. К концу века, при том же сценарии основные тенденции пространственного распределения потенциальных будущих продолжительностей периода ледостава и периода с ледовыми явлениями, аналогичны описанным выше для периода 2031–2060 гг. Различаются только величины потенциальных изменений. Степень трансформации обеих характеристик в конце столетия изменяется относительно середины столетия сопоставимо с наблюдаемой на сегодняшний день: ±3–5 суток для периода с ледовыми явлениями и уменьшение на 5–8 суток для периода ледостава. Наибольшие изменения ожидаются на Кольском полуострове и в восточной части бассейна Печоры.

Оценки будущего ледотермического режима на конец XXI в. по сценарию SSP126 сопоставимы (различия в оценках в среднем 1 сутки, максимум 6 суток) с оценками по сценарию SSP 585 на середину столетия. В конце века при оценке по жёсткому сценарию ожидается сокращение периода с ледовыми явлениями на величины от 9 дней до 2 месяцев. Наименьшие изменения ожидаются в бассейнах Яны, Индигирки, Алазеи и Колымы, в первую очередь в горных их частях. Наибольшие изменения ожидаются в низовьях Таза и Пура. Сокращение периода с ледовыми явлениями на величины от 40 до 60 дней ожидается в приполярных и заполярных районах Севера ЕТР и севера Западной Сибири. При этом, южнее приблизительно 64°с.ш. ожидаемое сокращение периода с ледовыми явлениями меньше.

Важно отметить, что даже при жёстком сценарии к концу столетия не ожидается полного отсутствия ледовых явлений и ледостава повсеместно в российской Арктике. Даже при реализации «жёсткого» сценария климатических изменений суммарная продолжительность периода с ледовыми явлениями в дальневосточном секторе российской Арктике может составлять 6–8 месяцев. Максимальные же изменения

ожидаются в равнинной части рассматриваемой территории, преимущественно без распространения многолетнемёрзлых пород – на Севере ЕТР и на севере Западной Сибири. Здесь период с ледовыми явлениями может сократиться до 4–5 месяцев, что в отдельные годы наблюдается и в наши дни.

Обращает на себя внимание и факт значительно большего сокращения периода ледостава, показанный всеми моделями. Но, тем не менее, период ледостава также ожидается продолжительностью не менее 3–4 месяцев в регионах с наибольшими потенциальными изменениями и не менее 6–7 месяцев в регионах с наименьшими изменениями (рис. 10).

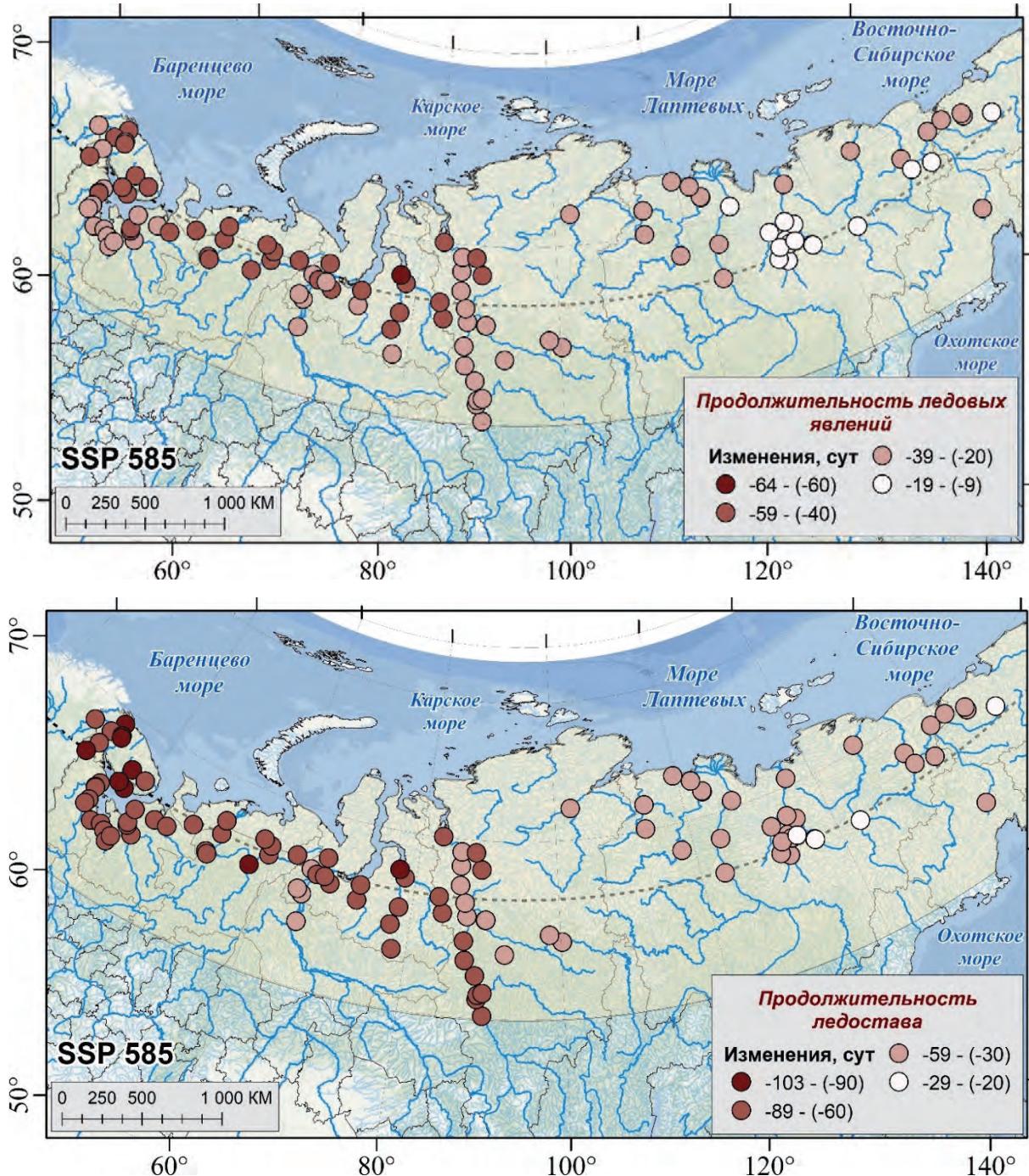


Рисунок 10 – Ожидаемые изменения продолжительности периода с ледовыми явлениями (сверху) и периода ледостава (снизу) на период 2071–2100 гг. при реализации сценария SSP585

Стоит заметить, что суммарная продолжительность периодов замерзания и вскрытия к середине века в приведённых оценках достаточно близка. Исключение составляет «жёсткий» сценарий на конец века, когда продолжительность данного периода больше, чем в других оценках в западной части российской Арктики и меньше в восточной. Отметим также, что для некоторых речных участков, особенно в Карелии и на Кольском полуострове суммарная продолжительность периода замерзания и вскрытия меняется мало, но для большинства оценок она увеличивается относительно современной в 2–3 раза (табл. 3).

Таблица 3 – Потенциальные изменения характеристик ледотермического режима рек при реализации различных сценариев СМИР6 в отдельных гидрографических регионах

| Характеристика | Продолжительность периода с ледовыми явлениями | | | | Продолжительность ледостава | | | |
|----------------|--|--------|-----------|-----------|-----------------------------|--------|-----------|--------|
| | Период | | 2031–2060 | 2071–2100 | 2031–2060 | | 2071–2100 | |
| Сценарий | SSP126 | SSP585 | SSP126 | SSP585 | SSP126 | SSP585 | SSP126 | SSP585 |
| Северо-Восток | +1 | 0 | 1 | -22 | -12 | -15 | -13 | -33 |
| Лена | -3 | -3 | -3 | -21 | -21 | -24 | -24 | -37 |
| Енисей | -9 | -10 | -9 | -34 | -29 | -34 | -33 | -60 |
| Север ЗС | -12 | -14 | -13 | -41 | -34 | -38 | -37 | -70 |
| Север ЕТР | -12 | -15 | -14 | -41 | -42 | -48 | -45 | -80 |
| Карелия | -6 | -10 | -9 | -36 | -41 | -46 | -44 | -81 |
| Кольский | -18 | -21 | -20 | -48 | -46 | -53 | -50 | -90 |

Полученные оценки продолжительности будущих периодов с ледовыми явлениями сопоставимы с более ранними работами. Последние оценки можно считать даже несколько более «жёсткими», что связано, по-видимому, с обновлением сценариев климатических изменений. Следует отметить, что впервые показаны значительные различия в степени изменения продолжительности ледостава по сравнению с продолжительностью периода с ледовыми явлениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы.

1. Статистический анализ временных рядов в значительно расширенных базах данных о температуре воды и сроках ледовых явлений позволил выявить и картировать максимально соответствующие современным климатическим условиям характеристики ледотермического режима рек российской Арктики и его пространственно-временной изменчивости. Продемонстрировано закономерное снижение среднемесячной температуры воды с юга на север и в меньшей степени с

юго-запада на северо-восток. Для ледового режима показано сохранение отмеченной ранее закономерности увеличения продолжительности периода с ледовыми явлениями с юго-запада на северо-восток, сохраняющейся как для осенних, так и для весенних характерных сроков наступления фаз ледового режима.

2. Показано, что в последние 60 лет наблюдается статистически значимая тенденция к увеличению среднемесячной температуры воды в арктических реках и статистически значимое сокращение периода с ледовыми явлениями благодаря значительному смещению сроков формирования ледовых явлений на более поздние. Потепление рек в российской Арктике более значительное, чем в расположенных южнее регионах мира, в особенности в переходные сезоны, а изменения ледового режима в среднем происходят с близкой интенсивностью по всему Северному полушарию. При этом, в последние 20–30 лет наблюдаемые изменения ледотермического режима не приобрели статистической значимости, что говорит о замедлении наблюдаемых процессов.

3. С использованием данных многолетних наблюдений показано, что недоучёт трансформации температуры воды в дельтах приводит к переоценке теплового стока крупнейших рек российской Арктики в Северный Ледовитый океан на величину порядка 3 ЭДж/год. При этом наблюдается увеличение теплового стока в последние 20–30 лет на величины до 26%. С учётом этих фактов тепловой сток рек в моря Северного Ледовитого океана с территории России составляет в среднем не менее 59,7 ЭДж/год. Показанная переоценка теплового стока в целом достаточно мала, но в пределах отдельных устьевых областей и низовий рек тепловой сток может изменяться на величины от –28% (низовья Енисея) до +7–8% (УОР Северной Двины и Печоры).

4. Антропогенное воздействие строительства водохранилищ на тепловой сток Оби и Енисея, проявлявшееся во второй половине XX в. и в XXI в. оказалось снижено климатическими факторами. При этом начало функционирования новых водохранилищ в бассейнах этих рек после 1990 г. не привело к снижению теплового стока рек в силу большей значимости происходящих климатических изменений. В тепловом стоке Лены и Колымы строительство водохранилищ практически не проявилось ни в период до интенсивных изменений климата, ни в современный период. При этом роль водохранилищ в локальной трансформации термического режима нижних бьефов всё ещё велика.

5. Показано, что согласно оценкам с использованием новейших моделей эксперимента СМИР6, сокращение периода с ледовыми явлениями меньше, чем потенциальное сокращение периода ледостава. При этом суммарная продолжительность периодов замерзания и вскрытия увеличивается в 2–3 раза уже к середине XXI в. и мало меняется при различных сценариях. Наименьшие изменения характерны для горных районов дальневосточного сектора Арктической зоны, в большей степени они ожидаются на реках равнин севера Западной Сибири и севера ЕТР, а наибольшие – на реках Кольского полуострова, не вытекающих из озёр.

РАБОТЫ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. 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. DOI отсутствует. 1,04 п.л. Импакт-фактор 0,24 (SJR). Доля участия 1/3.
2. Агафонова С.А., Фролова Н.Л., **Василенко А.Н.**, Широкова В.А. Ледовый режим и опасные гидрологические явления на реках Арктической зоны европейской территории России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2016. № 6. С. 41–49. DOI отсутствует. 1,04 п.л. Импакт-фактор 0,24 (SJR). Доля участия 1/4.
3. **Василенко А.Н.**, Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л. Закономерности изменений среднегодовой температуры воды рек Арктической зоны России в связи с изменениями климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 2. С. 8–22. DOI 10.35567/1999-4508-2020-2-1. 1,73 п.л. Импакт-фактор 0,61 (РИНЦ). Доля участия 2/3.
4. Agafonova S.A., **Vasilenko A.N.** Hazardous ice phenomena in rivers of the Russian Arctic zone under current climate conditions and the safety of water use // Geography, Environment, Sustainability. 2020. vol. 13. № 2. pp. 43–51. DOI 10.24057/2071-9388-2020-12. 1,04 п.л. Импакт-фактор 0,32 (SJR). Доля участия 1/2.
5. Терский П.Н., Панченко Е.Д., Горин С.Л., Агафонова С.А., **Василенко А.Н.**, Куликова Ж.М., Попрядухин А.А., Алабян А.М. Исследования зимнего режима устьев рек Белого моря в 2017–2020 гг. // Океанология. 2021. Т. 61. № 6. С. 1006–1008. DOI 10.31857/S0030157421060162. 0,35 п.л. Импакт-фактор 0,79 (РИНЦ). Доля участия 1/8.
6. Магрицкий Д.В., Фролова Н.Л., Агафонова С.А., Ефимов В.А., **Василенко А.Н.**, Сазонов А.А., Ефимова Л.Е. Гидрологические условия в устье реки Колымы летом 2019 года // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. № 1. С. 134–151. DOI отсутствует. 2,08 п.л. Импакт-фактор 0,24 (SJR). Доля участия 1/7.
7. Алабян А.М., **Василенко А.Н.**, Демиденко Н.А., Крыленко И.Н., Панченко Е.Д., Попрядухин А.А. Приливная динамика вод в дельте Печоры в летнюю межень // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2022. № 1. С. 167–179. DOI отсутствует. 1,50 п.л. Импакт-фактор 0,24 (SJR). Доля участия 1/6.
8. **Vasilenko A.N.**, Magritsky D.V., Frolova N.L., Shevchenko A.I. Features of a long-term heat flux formation of the large Russian Arctic rivers and its transformations in estuaries under the influence of climate-induced and dam-induced effects // Geography, Environment, Sustainability. 2022. vol. 15. № 4. pp. 158–170. DOI 10.24057/2071-9388-2022-105. 1,50 п.л. Импакт-фактор 0,32 (SJR). Доля участия 1/3.
9. Magritsky D.V., **Vasilenko A.N.**, Frolova N.L., Shevchenko A.I. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the northeast of the Asian part

of Russia. 1. Assessment of changes in water temperature // Water Resources. 2023. vol. 50. № 2. pp. 190–201. DOI 10.1134/S0097807823020124. 1,39 п.л. Импакт-фактор 0,31 (SJR). Доля участия 1/4.

10. Magritsky D.V., **Vasilenko A.N.**, Frolova N.L. Temporal and spatial patterns of changes in thermal regime of the rivers in the northeast of the Asian part of Russia. 2. Changes in the heat flux // Water Resources. 2023. vol. 50. № 2. pp. 202–214. DOI 10.1134/S0097807823020136. 1,50 п.л. Импакт-фактор 0,31 (SJR). Доля участия 1/3.

11. Терский П.Н., Горин С.Л., Панченко Е.Д., Алабян А.М., Ахмерова Н.Д., **Василенко А.Н.**, Иванов В.А., Крастынь Е.А., Куликова Ж.М., Мигунов Д.А., Попрядухин А.А., Фатхи М.О., Харламов М.А. Приливное устье реки Варзуги (Российская субарктика): первые сведения о зимнем гидрологическом режиме // Водные ресурсы. 2024. Т. 51. № 2. С. 145–156. DOI 10.31857/S0321059624020019. 1,39 п.л. Импакт-фактор 1,45 (РИНЦ). Доля участия 1/13.

12. **Vasilenko A.**, Frolova N., Grigoriev V.Yu., Magritsky D., Shevhenko A., Winde F. Spatio-temporal variability of water temperature of arctic rivers in Russia over the past 60 years // Applied Sciences. 2024. vol. 14. № 23. pp. 10942. DOI 10.3390/app142310942. 3,12 п.л. Импакт-фактор 0,52 (SJR). Доля участия 1/3.